



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Pengaruh Variasi *Coating* Pada Permukaan Pelat Baja ASTM A36 Terhadap Kekuatan Adhesi, Laju Korosi dan Ketahanan Beban Kejut

Nur Fadhilal¹⁾, Parlindungan Manik¹⁾, Wilma Amiruddin¹⁾

Laboratorium Las dan Material Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : nurfadhilal@students.undip.ac.id

Abstrak

Korosi pada struktur kapal merupakan salah satu penyebab utama penurunan integritas material dan keselamatan operasional. Upaya proteksi yang banyak digunakan adalah coating berbasis epoxy dengan penambahan nanopartikel zinc oxide (ZnO). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh profil kekasaran permukaan hasil sandblasting dan metode aplikasi coating terhadap kekuatan adhesi, laju korosi, serta ketahanan beban kejut pada baja ASTM A36 yang dilapisi epoxy dengan penambahan ZnO 3 %. Spesimen permukaan dibedakan menjadi dua kondisi, yaitu kasar dengan kekasaran 76–78 μm (Sa 2½) dan halus dengan kekasaran 44–49 μm (Sa 3). Coating dilakukan menggunakan tiga metode aplikasi, yaitu kuas, roll, dan spray. Pengujian meliputi uji adhesi dengan metode pull-off test, pengujian laju korosi dengan elektrokimia, serta uji ketahanan beban kejut dengan metode dropweight. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh spesimen metode spray pada permukaan halus memberikan hasil terbaik dengan nilai adhesi tertinggi sebesar $13,66 \pm 0,07$ MPa, laju korosi terendah sebesar $0,006560 \pm 0,0002$ mm/tahun, serta ketahanan beban kejut hingga 4,71 J tanpa kerusakan visual. Secara umum, permukaan halus menghasilkan daya rekat lebih tinggi dan laju korosi lebih rendah dibandingkan permukaan kasar. Temuan ini mengindikasikan bahwa kinerja coating lebih ditentukan oleh homogenitas lapisan dan kemampuan pembersihan dari pada oleh peningkatan kekasaran permukaan saja.

Kata Kunci : Korosi, Coating Epoxy, Zinc Oxide, Adhesi, Kekasaran Permukaan.

1. PENDAHULUAN

Baja ASTM A36 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan sebagai material struktural karena relatif ekonomis, mudah difabrikasi, dan memiliki kemampuan las yang baik. Dalam industri maritim, baja ASTM A36 dapat digunakan pada struktur lambung kapal, pelat konstruksi, maupun komponen pendukung lainnya yang beroperasi di lingkungan laut. Namun penggunaan baja ini masih memiliki keterbatasan, khususnya ketika material tersebut berada pada lingkungan yang agresif. Lingkungan laut yang mengandung ion klorida, oksigen terlarut, salinitas

tinggi, serta perubahan pH dapat mempercepat terjadinya korosi pada permukaan baja [1] [2].

Korosi pada baja di lingkungan laut merupakan proses degradasi material yang terjadi akibat reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan sekitarnya. Permasalahan ini menjadi salah satu perhatian utama dalam industri maritim karena dapat menurunkan kualitas material, mengurangi ketebalan baja secara bertahap. Apabila tidak dikendalikan dengan baik, korosi dapat berkembang menjadi kerusakan lokal, seperti korosi lubang, retakan, hingga kegagalan struktur yang berpotensi membahayakan keselamatan operasional kapal [3]. Selain itu, kondisi lingkungan laut yang semakin

kompleks, seperti peningkatan keasaman udara laut berpotensi mempercepat laju korosi pada baja karbon [4] [5] [6]. Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi aspek penting dalam industri maritim, mengingat struktur harus mampu bertahan tidak hanya terhadap lingkungan yang korosif, tetapi juga terhadap beban mekanis dan dinamis selama masa operasinya [7].

Pada struktur kapal, korosi tidak hanya menyebabkan kerusakan fisik pada material, tetapi juga dapat menurunkan kinerja struktur secara keseluruhan. Penurunan ketebalan pelat, berkurangnya kekuatan tarik, serta menurunnya ketahanan terhadap beban dinamis dapat memperpendek umur pakai struktur. Kondisi tersebut juga dapat meningkatkan kebutuhan perawatan dan biaya perbaikan selama masa operasi kapal [8]. Oleh karena itu, diperlukan metode perlindungan yang efektif untuk menghambat laju korosi dan menjaga kinerja baja ASTM A36 pada lingkungan laut [9] [10].

Salah satu metode perlindungan korosi yang banyak diterapkan adalah pelapisan atau *coating*. Metode ini bekerja dengan membentuk lapisan penghalang antara permukaan logam dan lingkungan korosif, sehingga dapat membatasi kontak langsung baja dengan udara, oksigen, maupun ion klorida. Di antara berbagai jenis *coating*, *epoxy* banyak digunakan karena memiliki daya lekat yang baik, ketahanan kimia yang tinggi, serta kemampuan proteksi korosi yang cukup efektif [11]. Meskipun demikian, lapisan *epoxy* masih berpotensi mengalami penurunan kinerja akibat terbentuknya pori, retak mikro, atau ketidakseragaman lapisan selama proses aplikasi maupun pengeringan [12] [13].

Selain formulasi *coating*, kondisi permukaan sebelum pelapisan merupakan faktor yang sangat menentukan kualitas lapisan. Persiapan permukaan memengaruhi kebersihan, topografi, keberadaan oksida sisa, serta mekanisme *interlocking* antara lapisan [14] [15]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan dapat meningkatkan adhesi awal, tetapi ketahanan jangka panjang juga sangat dipengaruhi oleh bentuk profil permukaan dan kimia permukaan [16][17]. Dengan demikian, hubungan antara kekasaran permukaan dan performa *coating* tidak selalu linier, sehingga perlu dianalisis secara spesifik pada sistem pelapisan yang digunakan [18].

Metode aplikasi *coating* juga berperan penting dalam menentukan kualitas dan kinerja lapisan yang dihasilkan. Salah satu upaya pengembangan sistem *coating* adalah penambahan nanopartikel seperti *zinc oxide* (ZnO), yang diketahui mampu memperbaiki sifat penghalang (*barrier properties*) dan stabilitas termal lapisan *epoxy* [19] [20]. Pada

lapisan *epoxy*, penambahan ZnO dapat memperpanjang jalur difusi udara dan ion klorida menuju permukaan logam, sehingga kontak antara baja dan lingkungan korosif dapat berkurang. Penggunaan material fungsional seperti *zinc oxide* telah terbukti mampu meningkatkan kinerja *coating* melalui mekanisme perlindungan berupa penghalang dan aktivitas elektrokimia [21].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penggunaan *coating epoxy* untuk perlindungan baja, pengaruh nanopartikel terhadap ketahanan korosi, serta pengaruh kekasaran permukaan terhadap adhesi *coating*. Penelitian mengenai *epoxy* yang di tambahkan ZnO menunjukkan bahwa ZnO dapat meningkatkan sifat barrier dan memperbaiki ketahanan korosi lapis [22] [23] [24]. Penelitian tentang kekasaran permukaan menunjukkan bahwa profil berperan penting terhadap adhesi dan ketahanan jangka panjang *coating* [25]. Sementara itu, penelitian mengenai metode aplikasi *coating* pada ASTM A36 menunjukkan bahwa cara aplikasi dapat memengaruhi kekuatan adhesi, pembentukan *void*, dan performa korosi *coating* [18] [26]. Parameter ketiga tersebut penting untuk menilai kinerja pelapisan pada aplikasi maritim yang tidak hanya berhubungan dengan lingkungan korosif, tetapi juga beban mekanis selama pengoperasian.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan ZnO sebesar 3% pada *coating epoxy* terhadap kekuatan adhesi, laju korosi, dan ketahanan beban kejut pada baja ASTM A36. Penelitian ini juga mempertimbangkan variasi metode aplikasi dan kekasaran permukaan sebagai faktor yang dapat mempengaruhi kualitas lapisan *coating*. Hipotesis dari penelitian ini adalah bahwa penambahan ZnO 3% dapat meningkatkan ketahanan korosi dan adhesi lapisan *epoxy* melalui peningkatan sifat penghalang lapisan. Selain itu, metode aplikasi *spray* diperkirakan mampu menghasilkan kinerja terbaik karena dapat membentuk lapisan yang lebih seragam dan padat, sedangkan kekasaran permukaan yang sesuai diharapkan dapat meningkatkan daya lekat lapisan terhadap baja [27] [28] [29]. Keterbaruan penelitian ini terletak pada variasi kekasaran permukaan hasil *sandblasting*, penambahan nanopartikel ZnO 3% pada *coating epoxy*, serta perbandingan metode aplikasi kuas, roll, dan *spray* dalam satu penelitian. Pendekatan tersebut belum banyak dilakukan pada penelitian sebelumnya, terutama pada material baja ASTM A36.

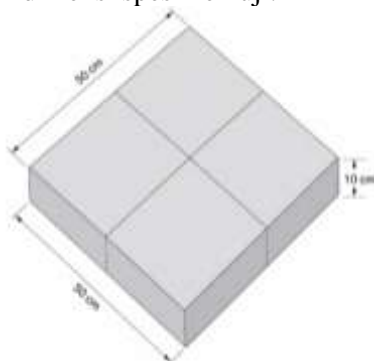
2. METODE

Metode ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis kinerja *coating epoxy* dengan penambahan nanopartikel ZnO 3% pada baja ASTM A36. Variabel bebas terdiri dari kekasaran permukaan Sa 2½ dan Sa 3 serta metode aplikasi *coating* yaitu kuas, roll, dan *spray*. Karakterisasi kinerja *coating* dilakukan melalui uji adhesi, uji laju korosi, dan uji ketahanan beban kejut. Uji adhesi dilakukan dengan metode *pull-off test* mengacu pada standar ASTM D4541 [30], untuk menentukan kekuatan perekat lapisan terhadap substrat. Uji laju korosi dilakukan dengan metode elektrokimia berdasarkan ASTM G102 [31], untuk menghitung laju korosi dari data hasil pengukuran elektrokimia. Sementara itu, uji ketahanan beban kejut dilakukan dengan metode *dropweight* mengacu pada ASTM D5420 [32].

2.1. Pengumpulan Data

Data dalam penelitian ini diperoleh melalui pengujian eksperimen di laboratorium yang didukung oleh referensi dari berbagai jurnal ilmiah dan sumber literatur terkait. Material yang digunakan adalah baja karbon rendah ASTM A36, yang dipilih karena kegunaannya yang luas dalam aplikasi struktural serta memiliki sifat mekanik yang representatif [33]. Proses persiapan spesimen uji dilakukan sesuai prosedur yang sudah ditetapkan sebelum tahap pengujian.

Tahap persiapan material dimulai dengan pemotongan pelat baja ASTM A36 dengan dimensi 50 mm x 50 mm x 10 mm. Spesimen dibuat dengan ukuran yang seragam guna konsistensi selama proses pengujian. Penelitian ini menerapkan tiga metode aplikasi *coating*, yaitu kuas, roll, dan *spray*, dengan dua tingkat kekasaran permukaan, yaitu halus (Sa 3) dan kasar (Sa 2½), yang mengacu pada klasifikasi profil kekasaran hasil proses *sandblasting* berdasarkan standar ISO 8503 [34], dan ASTM D4417 [35]. Untuk memperoleh data yang lebih akurat, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali percobaan. Total spesimen yang digunakan yaitu 54 spesimen. Gambar 1. merupakan dimensi spesimen uji.



Gambar 1. Dimensi Spesimen Uji.

Tahap persiapan permukaan (*surface Preparation*) merupakan tahap penting yang dilakukan sebelum aplikasi *pelapisan* untuk menjamin kinerja proteksi yang optimal. Proses ini dilakukan dengan metode *sandblasting* menggunakan abrasif *steel grit*, dengan dua tujuan utama, yaitu membersihkan permukaan spesimen dari berbagai kontaminan hingga mencapai tingkat kebersihan Sa 2½ dan Sa 3 sesuai ISO 8501-1 [36], serta membentuk profil kekasaran permukaan yang seragam. Kondisi permukaan yang bersih dan memiliki kekasaran yang terkontrol sangat diperlukan untuk memperoleh lapisan adhesi yang baik pada permukaan baja. Tingkat kebersihan permukaan dan profil kekasaran yang sesuai merupakan faktor penting dalam proses persiapan permukaan karena dapat meningkatkan ikatan mekanis pada *coating*, sehingga mampu meningkatkan kekuatan adhesi serta efektivitas perlindungan terhadap korosi [25]. Dengan demikian, kualitas dan ketahanan sistem pelapisan sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan. Persiapan permukaan yang tidak optimal dapat mengurangi efektivitas ikatan antara *coating* dan permukaan, sehingga meningkatkan risiko terjadinya kegagalan *coating*, seperti delaminasi, penurunan daya lekat, maupun korosi pada material dasar.

Coating merupakan salah satu metode proteksi korosi yang bekerja dengan membentuk lapisan penghalang (*barrier*) yang kontinu pada permukaan material, sehingga mencegah kontak langsung dengan lingkungan korosif. Efektivitas sistem pelapisan sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis *coating* yang sesuai dengan kondisi operasional, dengan mempertimbangkan aspek ketahanan terhadap korosi, biaya aplikasi, serta kemudahan perawatan. Berdasarkan material penyusunnya, sistem pelapisan dapat diklasifikasikan menjadi pelapis cair (*liquid coating*), seperti cat yang diaplikasikan dalam bentuk cair, dan pelapis berbasis beton (*concrete coating*). Pada aplikasinya, sistem pelapisan komersial umumnya tersusun atas tiga lapisan utama, yaitu primer *coat* yang berfungsi meningkatkan adhesi dan memberikan perlindungan awal terhadap korosi, *intermediate coat* yang berfungsi menambah ketebalan lapisan serta meningkatkan daya tahan sistem pelapisan, dan *topcoat* yang berfungsi sebagai lapisan pelindung terluar terhadap pengaruh lingkungan serta memberikan tampilan akhir pada permukaan material [37].

Bahan *coating* yang digunakan dalam penelitian ini adalah cat Hempadur Mastic 45881 yang diproduksi oleh Hempel A/S. Produk ini merupakan cat *epoxy* modifikasi yang menggunakan sistem curing berbasis poliamida

(*polyamide curing*) dengan kandungan padatan tinggi (*high solids*), sehingga mampu menghasilkan lapisan pelindung yang keras, kuat, dan memiliki kemampuan pembasahan (*wetting ability*) yang baik terhadap permukaan. Karakteristik tersebut memungkinkan *coating* membentuk lapisan yang lebih rapat serta meningkatkan daya lekat pada permukaan baja. Berdasarkan *Product Data Sheet* Hempel, Hempadur Mastic 45881 memiliki kode produk 45881 yang terdiri atas komponen dasar (*base*) 45889 dan bahan pengeras (*curing agent*) 95881, dengan rasio pencampuran 3:1 berdasarkan volume sebelum diaplikasikan pada permukaan material. Produk ini dirancang untuk aplikasi sebagai *intermediate coat* maupun *topcoat* pada sistem pelapisan *heavy duty*, dengan kemampuan membentuk lapisan berketebalan tinggi (*high film build*). Karakteristik tersebut menjadikan produk ini sesuai untuk aplikasi yang memerlukan perlindungan korosi jangka panjang. [38]. Pada penelitian ini, cat *epoxy* ditambahkan dengan nanopartikel *zinc oxide* (ZnO) untuk meningkatkan kinerja lapisan pelindung. Pemilihan cat *epoxy* sebagai bahan *coating* di dasarkan pada penggunaannya yang luas dalam industri perkapalan serta kemampuannya dalam memberikan perlindungan yang efektif terhadap korosi. Bahan yang digunakan dalam proses pembuatan dan pengujian *coating* meliputi cat *epoxy* sebagai bahan utama, *curing agent* sebagai pengeras, *thinner* sebagai pengencer, serta nanopartikel *zinc oxide* (ZnO) sebagai bahan aditif.

2.2. Pengujian Kekuatan Adhesi

Adhesi adalah kemampuan lapisan *coating* untuk membentuk dan mempertahankan ikatan yang kuat dengan permukaan melalui mekanisme interaksi fisik, mekanis, dan kimia. Parameter ini berperan penting dalam menentukan kinerja sistem pelapisan karena memengaruhi ketahanan lapisan terhadap pengelupasan, delaminasi, ketahanan *coating*. Di sisi lain, kohesi merupakan kekuatan ikatan internal antar molekul dalam material yang sama, sehingga menggambarkan kemampuan lapisan *coating* untuk mempertahankan integritas strukturnya. Oleh karena itu, adhesi dan kohesi merupakan dua parameter yang saling berkaitan dalam menentukan kualitas dan ketahanan suatu sistem pelapisan [39].

Dalam penelitian ini, pengujian kekuatan adhesi dilakukan dengan metode *pull of test* sesuai standar ASTM D 4541-02 [30]. Prosedur ini diawali dengan merekatkan *dolly* baja berdiamater 20 mm pada permukaan spesimen baik kondisi halus maupun kasar, menggunakan perekat *epoxy* yaitu lem araldite biru. Spesimen kemudian dikondisikan selama 24 jam pada suhu ruang terkontrol untuk

memastikan ikatan perekat telah mencapai kekuatan optimal. Pembebanan tarik dilakukan secara tegak lurus terhadap permukaan hingga *dolly* terlepas, dan gaya maksimum yang tercatat dikonversi menjadi kuat adhesi dalam satuan MPa [40].

2.3. Pengujian Laju Korosi

Laju korosi (*corrosion rate*) merupakan ukuran kecepatan penurunan kualitas material akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya, yang umumnya dinyatakan sebagai kehilangan ketebalan material per satuan waktu. Pada penelitian ini, laju korosi ditentukan secara kuantitatif dalam satuan *mil per year* (mpy) [7]. Pengukuran dilakukan menggunakan metode elektrokimia sel tiga elektroda (*three-electrode cell*) dengan mengacu pada standar ASTM G102[31].

Metode ini bekerja berdasarkan pengukuran potensial dan respon arus yang terjadi pada antarmuka antara spesimen sebagai elektroda kerja dan larutan elektrolit, sehingga laju korosi dapat ditentukan tanpa merusak spesimen. Pengujian dilakukan menggunakan Potentiostat Autolab PGSTAT128N yang dioperasikan melalui perangkat lunak NOVA. Seluruh pengujian dilaksanakan di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material, Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Untuk menjamin keakuratan hasil, seluruh pengukuran dilakukan pada kondisi pengujian yang terkontrol dan menggunakan peralatan yang telah dikalibrasi. Parameter pengujian dan hasil pengukuran laju korosi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat Ketahanan Korosi Berdasarkan Laju Korosi [41]

<i>Relative Corrosion Resistance</i>	<i>Approximate Metric Equivalent</i>				
	mpy	mm/year	µm/year	nm/yaer	pm/sec
<i>Outstanding</i>	<1	<0.02	<25	<2	<1
<i>Excellent</i>	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
<i>Good</i>	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
<i>Fair</i>	20-50	0.5-1	500-1000	50-100	20-50
<i>Poor</i>	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
<i>Unacceptable</i>	200+	5+	5000+	500+	200+

Hasil pengukuran laju korosi, seperti yang dirangkumkan pada Tabel 1, dianalisis untuk menentukan ketahanan korosi relatif (*relative corrosion resistance*) setiap variasi spesimen. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dapat dievaluasi kinerja proteksi dari setiap kombinasi metode aplikasi dan kondisi permukaan dalam menahan degradasi material. Adapun alat uji korosi ditunjukkan pada Gambar 2.

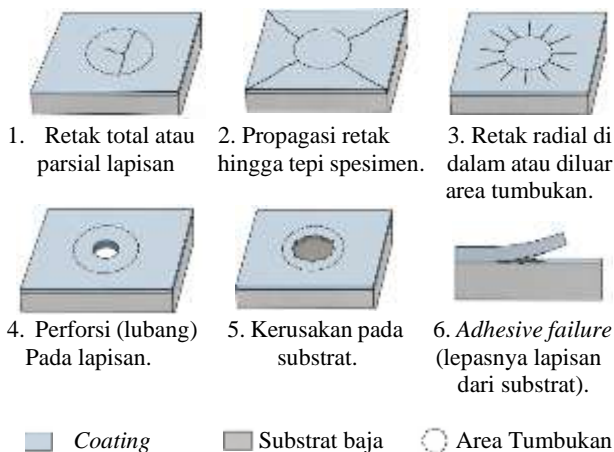


Gambar 2. Alat Uji Korosi

2.4. Uji Ketahanan Beban Kejut

Pengujian beban kejut dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem pelapisan dalam melindungi substrat dari pembebanan dinamis atau energi tumbukan. Kinerja pelapisan dinilai berdasarkan kemampuannya menahan retak dan mencegah penyebaran kerusakan akibat beban kejut yang diberikan. Pengujian pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM D5420 [32]. Metode yang digunakan adalah *drop weight test*, yaitu dengan menjatuhkan beban pada permukaan spesimen dari ketinggian tertentu. Kegagalan pelapisan dinyatakan terjadi apabila lapisan *coating* mengalami kerusakan, seperti retak, pengelupasan, atau terlihat permukaan logam dasar. Pengujian dilakukan dengan menjatuhkan beban dari ketinggian 80 cm.

Evaluasi kerusakan *coating* dilakukan melalui pengamatan visual berdasarkan kriteria yang ditetapkan dalam ASTM D5420-21 [32]. Kegagalan meliputi munculnya retak pada lapisan, baik sebagian maupun seluruhnya, penyebaran retak hingga mencapai tepi spesimen, terbentuknya retak radial di sekitar area tumbukan, perforasi atau lubang pada lapisan, kerusakan pada substrat, serta terjadinya kegagalan adhesi yang ditandai dengan terlepasnya lapisan *coating* dari permukaan. Sketsa bentuk kegagalan *coating* setelah pengujian beban kejut ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa bentuk kegagalan pelapisan setelah pengujian beban kejut.

Prosedur ini sejalan standar Eropa EN 1337-9 yang mengadopsi ISO-6272 [42], untuk pengujian ketahanan beban kejut pada material lapisan.

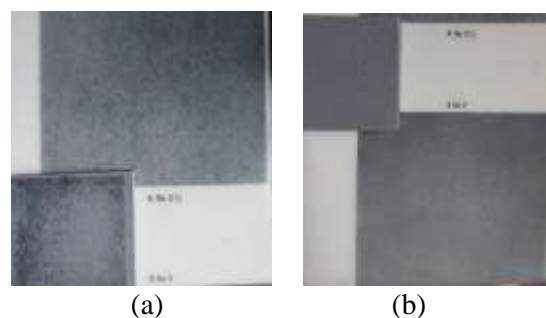
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah tahap persiapan sampel selesai, penelitian dilanjutkan dengan pelaksanaan eksperimen dan analisis data. Bagian ini menyajikan pembahasan komprehensif terhadap hasil yang diperoleh dari serangkaian pengujian yang telah dilakukan.

3.1. Surface Preparation

Preparasi permukaan (*surface preparation*) merupakan tahapan kritis yang menentukan kualitas adhesi dan kinerja akhir sistem pelapisan. Pada penelitian ini, penilaian awal terhadap seluruh spesimen baja ASTM A36 menunjukkan kondisi permukaan awal sesuai dengan *rust grade* A berdasarkan standar ISO 8501-1 [36]. Kondisi ini ditandai dengan keberadaan *mill scale* yang masih dominan serta kontaminasi karat yang minimal dan tersebar.

Kondisi awal yang seragam ini memungkinkan penerapan prosedur preparasi permukaan yang terkendali. Seluruh spesimen kemudian menjalani proses *sandblasting* untuk mencapai tingkat kebersihan Sa 2 ½ dan Sa 3, serta membentuk profil kekasaran (*anchor profile*) yang konsisten. Keseragaman kondisi awal dan proses preparasi menjadi dasar yang krusial untuk proses pengujian pengaruh variabel utama dalam penelitian ini, yaitu kekasaran permukaan (halus dan kasar) dan metode aplikasi *coating*. Isolasi ini memungkinkan evaluasi yang spesifik terhadap sifat adhesi dan ketahanan korosi yang diuji. Hasil visual spesimen setelah *sandblasting* untuk kedua tingkat kekasaran ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Hasil *Sandblasting* Standar Visual Sa 2 ½ (b) Standar Visual Sa 3.

Berdasarkan pengamatan visual dan pengukuran kuantitatif, proses *sandblasting* dalam penelitian ini berhasil memperoleh kekasaran permukaan dengan tingkat kebersihan Sa 2 ½ dan Sa 3 ISO 8501-1 [36], seperti yang ditunjukkan

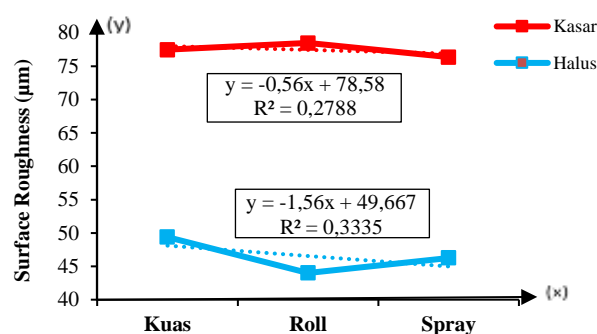
pada Gambar 2. Hasil ini mengindikasikan bahwa semua kontaminasi visual, termasuk karat *mill scale*, telah berhasil dihilangkan secara menyeluruh. Pengukuran kekasaran permukaan (*surface roughness*) menggunakan *surface profile gauge* sesuai standar ASTM D 4417 - B [43], menghasilkan dua kategori yang jelas yaitu permukaan halus dengan rata-rata 44-49 μm dan permukaan kasar 76-78 μm . Adapun hasil dari pengukuran kekasaran permukaan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan

Metode Aplikasi	Kondisi Permukaan	Rata-rata Kekasaran (μm)	Standar Deviasi
Metode Kuas	Kasar (Sa 2 ½)	77,50	$\pm 6,09$
	Halus (Sa 3)	49,38	$\pm 2,20$
Metode Roll	Kasar (Sa 2 ½)	78,50	$\pm 6,26$
	Halus (Sa 3)	44,00	$\pm 6,65$
Metode Spray	Kasar (Sa 2 ½)	76,38	$\pm 11,59$
	Halus (Sa 3)	46,26	$\pm 5,65$

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran kekasaran permukaan spesimen setelah proses *sandblasting*. Nilai rata-rata kekasaran permukaan pada kategori kasar berada pada rentang 76–78 μm , sedangkan pada kategori halus berada pada rentang 44–49 μm . Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa proses *sandblasting* yang dilakukan berhasil menghasilkan dua tingkat kekasaran permukaan yang berbeda secara jelas dan terkontrol sesuai dengan rancangan penelitian. Selain itu, nilai standar deviasi yang relatif rendah pada setiap spesimen menunjukkan bahwa proses persiapan permukaan memiliki tingkat reproduktibilitas yang baik, sehingga variasi kekasaran yang dihasilkan dapat dianggap konsisten dan representatif untuk pengujian selanjutnya.

Hasil pengukuran ini sejalan dengan penelitian [25] umumnya berada pada rentang 50–100 μm guna menghasilkan ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) yang baik pada lapisan *coating*. Pada penelitian ini, spesimen dengan tingkat kekasaran kasar masih berada dalam rentang yang direkomendasikan tersebut, sedangkan spesimen dengan tingkat kekasaran halus berada sedikit di bawah batas bawah rentang yang direkomendasikan. Adapun grafik dari pengukuran kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Hasil Pengukuran kekasaran Permukaan

Gambar 5 grafik kekasaran permukaan menunjukkan bahwa seluruh metode aplikasi memiliki pola yang sama, yaitu nilai kekasaran pada kondisi kasar selalu lebih tinggi dibandingkan kondisi halus. Hal ini menegaskan bahwa variabel kekasaran dalam penelitian ini telah terbentuk dengan baik dan dapat digunakan sebagai parameter pembandingan terhadap adhesi dan korosi.

Selain itu, hasil evaluasi menunjukkan bahwa tingkat kebersihan debu (*dust level*) berada pada kategori A, yang menandakan bahwa tidak ada kontaminasi debu atau kotoran yang tertinggal pada permukaan setelah *sandblasting*. Dengan demikian, proses persiapan permukaan yang dilakukan telah mampu menghasilkan kondisi awal yang bersih, terkendali, dan memadai untuk tahap aplikasi *coating*.

3.2. Pengukuran Dew Point dan Relative Humidity

Tahap pemantauan kondisi lingkungan dilakukan sebagai tahap awal sebelum proses *coating* pada spesimen. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui suhu dan udara, kelembaban relatif (*relative humidity*), serta titik embun (*dew point*) guna meminimalkan risiko terjadinya kondensasi atau pengembunan pada permukaan material selama proses pelapisan berlangsung. Pengukuran menggunakan *psychrometer* yang terkalibrasi, sehingga data yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan kondisi lingkungan. Prosedur pengukuran mengacu pada standar ASTM E337 [44].

Berdasarkan hasil yang diperoleh, kondisi lingkungan ruangan berbeda dalam rentan yang sesuai dengan rekomendasi teknis untuk aplikasi *coating*. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *coating* dapat dilakukan tanpa resiko terganggu oleh terjadinya kondensasi. Data pengukuran lengkap terkait kondisi lingkungan, termasuk titik embun (*dew point*) dan kelembaban relatif (*relative humidity*), disajikan dalam Tabel 3.

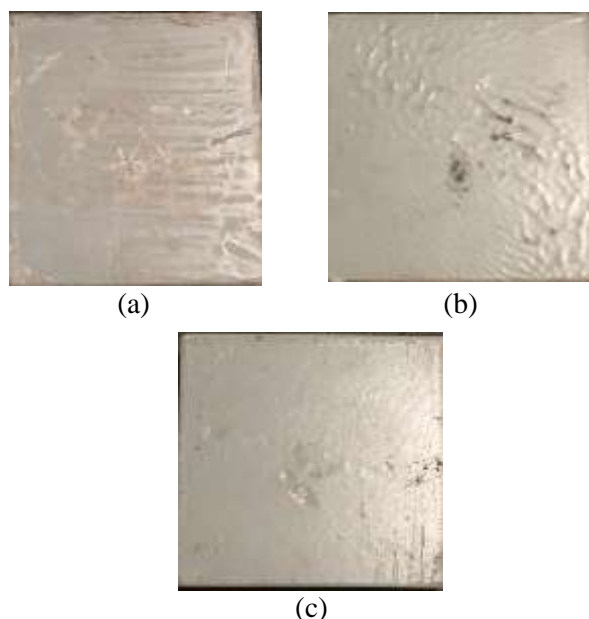
Tabel 3. Hasil Pengukuran Dew Point dan Relative Humidity

Keterangan	Hasil	Rekomendasi	Kondisi
Wet Bulb	24,3°C	>5°C	Memenuhi
Dry Bulb	29,3°C	>5°C	Memenuhi
Relative Humidity	65,9 %	<85% Rh	Memenuhi
Temperature Steel	30,4°C	>5°C	Memenuhi
Dew Point	22,2°C	< Steel temperature - 3°C	Memenuhi

3.3. Coating

Proses pelapisan (*coating*) pada penelitian ini dilakukan berdasarkan *Technical Data Sheet* dari produk Hempel Hempadure Mastic 45881, komposisi campuran *coating* yang diaplikasikan dengan rasio pencampuran volume antara komponen dasar (*base coat*) dan *curing agen* sebesar 3:1 (berdasarkan volume) antara komponen dasar (*base coat*) dan *curing agent*. Selain itu, sebagai bahan aditif, ditambahkan *zinc oxide* (ZnO) 3% *by weight*. Proses pengukuran komponen cair dan penambahan *zinc oxide* menggunakan gelas ukur dan timbangan digital. Seluruh proses berlangsung dengan kondisi lingkungan yang terkontrol sesuai standar ASTM – 337 [44].

Ketebalan lapisan kering (*dry film thickness/ DFT*) mengacu pada standar BKI Vol : II [45], yang menetapkan ketebalan minimum sebesar 250 µm untuk pelapis pada area lambung kapal. Nilai ini dijadikan acuan dalam proses aplikasi dan pengukuran ketebalan lapisan pada penelitian ini. Penelitian ini membandingkan tiga teknik aplikasi yang berbeda yaitu kuas, roll dan *spray*. Proses pengaplikasian *coating* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Proses Pelaksanaan *Coating* Menggunakan (a) Kuas, (b) Roll, (c) *Spray*.

Setelah proses aplikasi *coating*, dilakukan pengukuran ketebalan lapisan basah (*Wet Film*

Thickness/WFT). Pengukuran WFT dilakukan pada saat lapisan cat masih dalam kondisi belum mengering dengan tujuan untuk memperkirakan ketebalan lapisan kering (*Dry Film Thickness*) yang diharapkan. Nilai WFT dihitung berdasarkan DFT target 250 µm dan volume solid cat yang tercantum dalam lembar data teknis (*technical data sheet*) produk. Untuk cat *epoxy* Hempadure yang digunakan, volume padatnya adalah 72%. Dengan demikian, perhitungan *Wet Film Thickness* (WFT) dilakukan berdasarkan persamaan:

$$WFT = \frac{DFT}{Volume\ Solid} \quad (1)$$

Dengan nilai DFT sebesar 250 µm dan volume solid sebesar 72% (0,72). Hasil pengukuran WFT aktual pada seluruh spesimen menunjukkan nilai rata-rata sebesar 356 µm. Perbedaan antara nilai WFT teoritis (347 µm) dan hasil pengukuran aktual (356 µm) disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain ketidakteraturan proses aplikasi *coating*. Deviasi sebesar ± 2,6 % masih berada dalam rentan toleransi yang dapat diterima dalam proses aplikasi *coating*, sehingga hasil pengukuran dianggap valid.

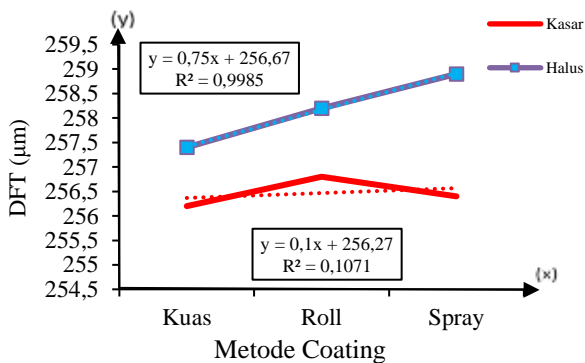
Pengujian (*Dry Film Thickness/DFT*) dilakukan untuk memastikan bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk telah sesuai dengan ketebalan yang ditetapkan dalam penelitian ini. Pengukuran dilakukan menggunakan alat pengukur ketebalan lapisan. Mengacu pada standar SSPC-PA 2 [46], pengukuran dilakukan pada lima titik (*spot*) yang berbeda untuk setiap area seluas 10 m², dan pada setiap titik dilakukan tiga kali pengukuran. Hasil pengujian (DFT) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran DFT

Metode Aplikasi Coating	Kondisi Permukaan	DFT (µm)			Rata-rata DFT (µm)	Standar Deviasi
		1	2	3		
Metode Kuas	Kasar (Sa 2 ½)	254,6	260,0	254,0	256,2	3,30
	Halus (Sa 3)	256,6	255,7	260,0	257,4	2,27
Metode Roll	Kasar (Sa 2 ½)	257,,3	260,0	253,0	256,8	3,53
	Halus (Sa 3)	257,6	255,0	262,0	258,2	3,54
Metode Spray	Kasar (Sa 2 ½)	253,0	259,0	257,3	256,4	3,09
	Halus (Sa 3)	257,0	261,0	258,6	258,9	2,01

Tabel DFT diatas menunjukkan bahwa nilai ketebalan lapisan kering (DFT) berada pada kisaran

256–259 μm , yang mendekati target ketebalan sebesar 250 μm . Hal ini menunjukkan bahwa proses aplikasi *coating* berjalan dengan baik dan konsisten. Nilai rata-rata diperoleh dari tiga kali pengukuran pada setiap spesimen, Metode *spray* pada permukaan halus menunjukkan hasil lapisan yang lebih homogen. Sebaliknya, metode kuas dan roll menunjukkan variasi yang lebih besar akibat pengaruh faktor manual dalam proses aplikasi. Berikut merupakan grafik hasil pengukuran DFT pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Dry Film Thickness Pada Masing-masing Pengecatan.

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan perbandingan nilai rata-rata ketebalan lapisan kering (*Dry Film Thickness/DFT*) pada berbagai metode aplikasi *coating* dan kondisi permukaan. Metode *spray* pada permukaan halus menghasilkan nilai DFT tertinggi sekaligus variasi terkecil, yang menunjukkan bahwa proses aplikasinya lebih stabil dan menghasilkan lapisan yang lebih homogen. Sebaliknya, metode kuas dan roll menunjukkan variasi yang lebih besar, yang mengindikasikan adanya ketidakteraturan dalam distribusi lapisan selama proses aplikasi.

Ketebalan ini memenuhi persyaratan minimum BKI Vol. II Sec. 38 [37] yang mensyaratkan $DFT \geq 250 \mu\text{m}$ untuk area lambung kapal. Dibandingkan penelitian [24] yang menggunakan ketebalan 200-300 μm , nilai 250-260 μm yang dicapai dalam penelitian ini berada dalam rentan optimal.

3.4. Hasil Uji Adhesi

Pengujian adhesi lapisan *coating* dilakukan dengan standar ASTM D 4541 [30], menggunakan metode *pull-off test*. Alat yang digunakan adalah *portable adhesive tester* untuk mengukur ketahanan daya lekat *coating* terhadap. Prosedur pengujian diawali dengan memastikan permukaan spesimen yang telah melalui pengukuran *dry film thickness* dalam keadaan bersih dan kering. Selanjutnya *dolly* berbahan baja berdiamater 20 mm direkatkan pada permukaan spesimen menggunakan perekat *epoxy* yaitu lem araldite biru. Perekat dibiarkan mengering hingga ikatan antara *dolly* dan lapisan *coating* mencapai kekuatan maksimal selama 24 jam.

Pada saat pengujian, alat *portable adhesive tester* memberikan gaya tarik tegak lurus terhadap permukaan hingga *dolly* terlepas. Gaya maksimum yang tercatat dalam MPa atau Psi, merupakan nilai kuat adhesi lapisan *coating*. Data kuantitatif ini berfungsi sebagai indikator kinerja daya lekat dan integritas lapisan *coating* setelah proses aplikasi. Prosedur pelaksanaan pengujian kekuatan adhesi, yang melibatkan perekatan *dolly* menggunakan lem araldhite biru selama 24 jam, di ilustrasikan pada Gambar 8. Data hasil lengkap dari pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 5.



Gambar 8. Salah Satu Hasil Pengujian Adhesi

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekuatan Adhesi

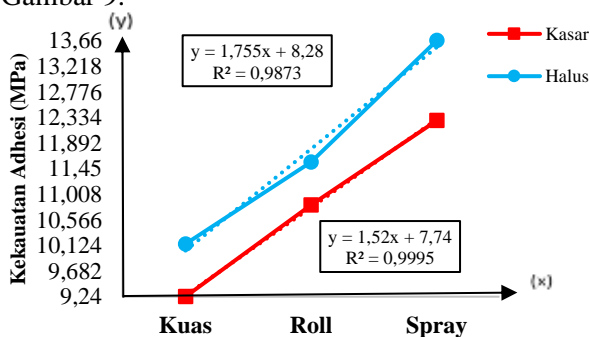
Metode Aplikasi	Kondisi Permukaan	Pull-Off Strength (MPa)			Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)
		1	2	3		
Metode Kuas	Kasar (Sa 2 ½)	9,29	9,22	9,20	9,24	0,05
	Halus (Sa 3)	10,15	10,08	10,21	10,15	0,07
Metode Roll	Kasar (Sa 2 ½)	10,82	10,84	10,79	10,82	0,03
	Halus (Sa 3)	11,56	11,62	11,49	11,56	0,07
Metode Spray	Kasar (Sa 2 ½)	12,29	12,31	12,25	12,28	0,03
	Halus (Sa 3)	13,67	13,72	13,58	13,66	0,07

menunjukkan tren yang sangat jelas yaitu nilai adhesi meningkat berurutan dari kuas ke roll, kemudian mencapai nilai tertinggi pada *spray*. Selain itu, pada setiap metode aplikasi, permukaan halus selalu menghasilkan adhesi yang lebih tinggi dibandingkan permukaan kasar. Kombinasi terbaik diperoleh pada *spray* permukaan halus dengan nilai $13,66 \pm 0,07 \text{ MPa}$, sedangkan nilai terendah terjadi pada kuas permukaan kasar sebesar $9,24 \pm 0,05 \text{ MPa}$. Berdasarkan standar internasional ISO 12944-6 [47] dan ASTM D 4541 [30], nilai adhesi *pull-off* minimum yang dipersyaratkan untuk *coating*

epoxy pada logam dengan ketebalan kering > 250 µm adalah 5 MPa.

Secara fisik, hasil ini menunjukkan bahwa dalam sistem epoxy ZnO yang digunakan, homogenitas lapisan dan kemampuan pembaharuan lebih dominan dibandingkan peningkatan kekasaran semata. Permukaan yang terlalu kasar berpotensi menyisakan profil tidak rata yang sulit terisi sempurna oleh coating, terutama pada aplikasi manual. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa hubungan kekasaran dengan adhesi dan corrosion protection tidak dapat dijelaskan oleh satu parameter tunggal, dan menunjukkan bahwa bentuk profil permukaan dan kemampuan ikatan adhesi lebih menentukan daripada tinggi kekasaran [24].

Hasil ini juga konsisten dengan Product Data Sheet Hempadur Mastic 45881 yang menegaskan bahwa aplikasi kuas atau roll memerlukan lebih banyak lapis untuk mencapai DFT yang dipersyaratkan [12]. Artinya, ketika metode manual digunakan pada profil permukaan yang lebih kasar, peluang terbentuknya area tipis atau ketidakseragaman film menjadi lebih besar. Kondisi tersebut pada akhirnya menurunkan daya lekat coating. Grafik dari hasil pengujian adhesi pada permukaan kasar dan halus di visualisasikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Hasil Pengujian Adhesi.

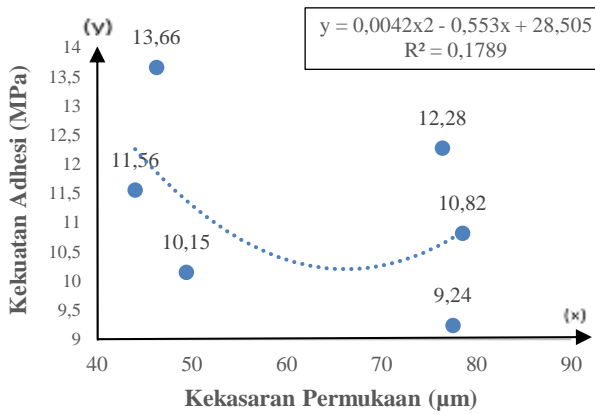
Gambar 9 menunjukkan bahwa metode aplikasi spray menghasilkan nilai adhesi paling tinggi secara konsisten. Transisi dari permukaan kasar ke halus selalu meningkatkan adhesi pada semua metode aplikasi. Kenaikan ini relatif konsisten dan menunjukkan bahwa dalam rentang kekasaran penelitian ini, permukaan halus merupakan kondisi yang lebih menguntungkan untuk pembentukan film coating yang utuh dan menempel baik pada permukaan spesimen. Adapun perbandingan metode aplikasi dan pengaruh kekasaran permukaan dengan kekuatan adhesi ditampilkan pada Table 6,

Tabel 6. Hubungan Kekasaran Permukaan terhadap Kekuatan Adhesi

Metode Aplikasi	Kekasaran Permukaan (µm)	Kekuatan Adhesi (MPa)
Kuas Halus	49,38	10,15
Kuas Kasar	77,50	9,24
Roll Halus	44,00	11,56
Roll Kasar	78,50	10,82
Spray Halus	46,26	13,66
Spray Kasar	76,38	12,28

Tabel 6 menunjukkan adanya hubungan antara kekasaran permukaan dan kekuatan adhesi pada setiap metode aplikasi pelapisan. Pada seluruh metode yang menunjukkan adanya hubungan antara kekasaran permukaan dan kekuatan adhesi pada setiap metode aplikasi coating. Pada seluruh metode yang digunakan, nilai kekasaran pada kondisi kasar lebih tinggi daripada kondisi halus. Namun, kecenderungan yang terlihat pada nilai adhesi justru berbeda, karena permukaan halus menghasilkan daya lekat yang lebih tinggi dibandingkan permukaan kasar, baik pada metode kuas, roll, maupun spray. Nilai adhesi tertinggi diperoleh pada metode spray dengan permukaan halus sebesar 13,66 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada metode kuas dengan permukaan kasar sebesar 9,24 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan adhesi.

Dalam penelitian ini, homogenitas lapisan coating yang terbentuk pada permukaan halus lebih dominan dalam meningkatkan kekuatan adhesi dibandingkan efek mechanical interlocking pada permukaan kasar. Nilai selisih kekasaran digunakan sebagai parameter untuk menunjukkan perbedaan tingkat kekasaran antara permukaan halus dan kasar. Hubungan antara kekasaran permukaan dan kekuatan adhesi menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran tidak selalu meningkatkan daya lekat coating. Pada penelitian ini, permukaan halus memberikan nilai adhesi yang lebih tinggi karena mampu menghasilkan lapisan coating yang lebih homogen dan minim cacat. Menurut penelitian sebelumnya menyatakan bahwa kekasaran yang terlalu tinggi dapat menyebabkan distribusi coating tidak merata dan menurunkan kekuatan adhesi akibat terbentuknya cacat mikro pada lapisan [15]. Berikut merupakan grafik dari hubungan kekasaran permukaan dengan kekuatan adhesi.



Gambar 10. Grafik Hubungan Kekasaran Permukaan dan Kekuatan Adhesi dengan Trendline.

Grafik pada Gambar 10 memperlihatkan bahwa semakin tinggi nilai kekasaran permukaan, nilai adhesi cenderung menurun. Meskipun nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh relatif rendah, yaitu sebesar 0,1789, hal tersebut tidak mengurangi validitas data penelitian yang telah diperoleh. Analisis regresi dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola hubungan antara kekasaran permukaan dan kekuatan adhesi, bukan untuk memprediksi nilai adhesi secara tepat berdasarkan nilai kekasaran permukaan. Nilai R^2 yang rendah menunjukkan bahwa variasi kekuatan adhesi tidak hanya dipengaruhi oleh kekasaran permukaan, tetapi juga oleh faktor lain yang belum dianalisis secara mendalam dalam penelitian ini. Faktor-faktor tersebut dapat meliputi kekasaran permukaan, tingkat kebersihan atau kontaminasi permukaan, homogenitas lapisan *coating*, serta kondisi curing selama proses pengeringan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkaji pengaruh faktor-faktor tersebut sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme yang memengaruhi kekuatan adhesi pelapisan. [14].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode aplikasi *spray* pada permukaan halus memberikan kinerja *coating* yang paling baik dibandingkan variasi lainnya. Kondisi ini dapat dilihat dari nilai adhesi yang paling tinggi serta laju korosi yang paling rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa permukaan Sa 3 menghasilkan daya rekat lebih tinggi dibandingkan Sa 2½. Profil permukaan yang terlalu kasar dapat menyebabkan terbentuknya kekosongan dan distribusi lapisan yang kurang merata sehingga menurunkan efektivitas ikatan lapisan. Penambahan ZnO 3% juga memberikan kontribusi positif terhadap sifat mekanik matriks *epoxy*. Pada kombinasi metode *spray* permukaan halus, dan penguatan ZnO 3% menghasilkan nilai adhesi tertinggi 13,66 MPa, sementara kombinasi terendah 9,24 MPa.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [22] yang menunjukkan bahwa metode

aplikasi *spray* menghasilkan performa adhesi yang lebih baik dibandingkan metode lainnya. Hal ini disebabkan karena aplikasi *spray* mampu menghasilkan lapisan *coating* yang lebih merata dan seragam pada permukaan. Keseragaman lapisan tersebut meningkatkan kontak antara *coating*, sehingga daya rekat yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Oleh karena itu, metode aplikasi *spray* dapat dianggap sebagai faktor penting dalam meningkatkan kekuatan adhesi *coating*, meskipun terdapat perbedaan tingkat kekasaran permukaan.

3.5. Hasil Uji Laju Korosi

Pengujian elektrokimia dilakukan dengan menggunakan Potentiostat Autolab (PGSTAT30) yang dikendalikan melalui *software* Nova. Metode yang digunakan yaitu sel 3 elektroda Larutan NaCl 3,5% dipilih sebagai medium elektrolit untuk mensimulasikan salinitas lingkungan air laut. Elektroda platina (Pt) berfungsi sebagai elektroda bantu karena kemampuannya menjaga kestabilan potensial dalam lingkungan berklorida, suatu karakteristik yang lebih unggul dibandingkan elektroda Ag/AgCl yang cenderung mengalami pergeseran potensial. Data kuantitatif hasil pengukuran laju korosi disajikan di Tabel 7.

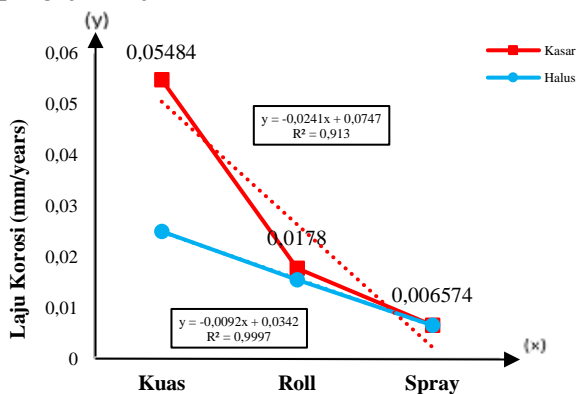
Tabel 7. Hasil Pengujian Laju Korosi

Metode Aplikasi	Kondisi Permukaan	Kuat Arus (A/cm)	Rata-rata Kuat Arus (A/cm)	Laju Korosi (mm/thn)	Rata-rata Laju Korosi (mm/thn)	Standar Deviasi
Metode Kuas	Kasar (Sa 2 ½)	4,7295	4,7291	0,054839	0,05484	0,0013
		4,6152		0,05352		
		4,8427		0,05616		
Metode Roll	Kasar (Sa 2½)	1,5304	1,5402	0,017745	0,01780	0,0015
		1,6801		0,19274		
		1,4100		0,01638		
Metode Spray	Kasar (Sa 2½)	5,6594	5,6668	0,006521	0,006574	0,0002
		5,8173		0,006751		
		5,5238		0,006409		
Metode Spray	Halus (Sa 3)	5,6551	5,6564	0,0065572	0,006560	0,0002
		5,7927		0,006719		
		5,5214		0,006404		

Berdasarkan hasil pada Tabel 7 menunjukkan bahwa hasil seluruh spesimen memiliki ketahanan korosi yang baik, bahkan empat di antaranya masuk kategori *outstanding*. Nilai laju korosi tertinggi tercatat pada kuas permukaan kasar sebesar 0,05484

mm/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada *spray* permukaan halus sebesar 0,006560 mm/tahun. Dengan demikian, metode aplikasi terbukti menjadi faktor dominan, sedangkan pengaruh kekasaran muncul sebagai faktor tambahan yang mempengaruhi kualitas *barrier film*. Berdasarkan nilai pada Tabel 7, permukaan halus secara konsisten menghasilkan laju korosi yang lebih rendah dibanding permukaan kasar pada seluruh metode aplikasi. Selisih ini sangat besar pada metode kuas, mengecil pada roll, dan hampir hilang pada *spray*. Pola tersebut menunjukkan bahwa semakin baik homogenitas lapisan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa *corrosion protection* tidak dapat diprediksi hanya dari adhesi ataupun kekasaran tunggal, karena keberhasilan *coating* sebagai penghalang juga ditentukan oleh kemampuan film menutup *interface* secara rapat [18]. Pada permukaan yang lebih kasar, lembah profil lebih sulit terisi sempurna sehingga dapat menjadi jalur awal penetrasi elektrolit, terutama ketika *coating* diaplikasikan secara manual. Gambar 11 menampilkan grafik hasil pengujian laju korosi.



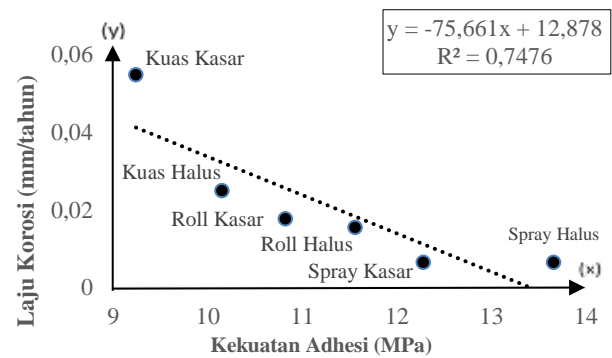
Gambar 11. Grafik Hasil Pengujian Laju Korosi

Grafik pada Gambar 11 menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan dapat memberikan kontribusi terhadap ketahanan korosi. Namun demikian, perbedaan metode *spray* antara kedua kondisi permukaan tidak terlalu signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan *coating* yang lebih merata dan homogen pada metode *spray* mampu mengurangi pengaruh variasi kekasaran permukaan terhadap laju korosi.

Tabel 8. Hubungan Laju Korosi dengan Kekuatan Adhesi

Metode Aplikasi	Kekuatan Adhesi (MPa)	Laju Korosi (mm/tahun)
Kuas Halus	10,15	0,02503
Kuas Kasar	9,24	0,05484
Roll Halus	11,56	0,01551
Roll Kasar	10,82	0,01780
<i>Spray</i> Halus	13,66	0,006560
<i>Spray</i> Kasar	13,66	0,006574

Tabel 8 menunjukkan adanya kecenderungan bahwa menunjukkan adanya kecenderungan bahwa spesimen dengan nilai adhesi yang lebih tinggi memiliki laju korosi yang lebih rendah. Kondisi ini terlihat jelas pada metode *spray* dengan permukaan halus, yang menghasilkan nilai adhesi tertinggi sebesar 13,66 MPa sekaligus laju korosi terendah terendah sebesar 0,006560 mm/tahun. Sebaliknya, metode kuas pada permukaan kasar menunjukkan nilai adhesi paling rendah, yaitu 9,24 MPa, dan diikuti oleh laju korosi tertinggi sebesar 0,05484 mm/tahun. Adapun grafik hubungan korosi dan ketahanan adhesi ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Hubungan Laju Korosi dengan Kekuatan Adhesi

Grafik pada Gambar 12 menunjukkan bahwa hubungan antara kekuatan adhesi dan laju korosi cenderung berlawanan arah. Ketika nilai adhesi meningkat, laju korosi justru menurun. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan *coating* dengan daya lekat yang lebih baik mampu memberikan perlindungan yang lebih efektif, karena media korosif lebih sulit menembus lapisan hingga mencapai permukaan. Hubungan antara kekuatan adhesi dan laju korosi pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang jelas, yaitu semakin tinggi nilai adhesi, semakin rendah laju korosi yang terjadi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas ikatan antara lapisan *coating* dan memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan korosi. Lapisan dengan adhesi yang tinggi cenderung membentuk film yang lebih rapat dan stabil, sehingga mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat yang dapat menjadi jalur masuk media korosif. Sebaliknya, jika nilai adhesi rendah, peluang terjadinya penetrasi elektrolit ke permukaan menjadi lebih besar, sehingga laju korosi meningkat. Dengan demikian, kekuatan adhesi dapat digunakan sebagai salah satu parameter penting dalam menilai efektivitas sistem *coating* sebagai pelindung terhadap korosi.

3.6. Hasil Uji Ketahanan Beban Kejut

Pengujian ketahanan beban kejut dilakukan dengan metode *drop weight impact test* untuk mengevaluasi respons lapisan *coating* terhadap pembebanan dinamis dan energi kejut. Sebuah benda bermassa 600 gram dijatuhkan pada spesimen dari ketinggian 80 cm. Energi kejut yang diterima spesimen dihitung berdasarkan persamaan energi potensial gravitasi, yaitu

$$E = mgh \quad (2)$$

Keterangan :

E : energi beban kejut (J)

m : massa beban (kg)

g : percepatan gravitasi = 9,81 m/s²

h : tinggi jatuh (m)

Evaluasi kerusakan dilakukan secara visual berdasarkan standar ASTM D5420 [32], dengan bantuan mikroskop jika diperlukan. Kriteria kegagalan diamati berdasarkan modelnya, yaitu retak kohesif atau adhesif. Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan standar atau spesifikasi material yang berlaku. Gambar 13 mengilustrasikan prosedur pengujian dengan ketinggian 80 cm, dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 13. Pelaksanaan Pengujian Ketahanan Beban Kejut.



(a) Kuas Kasar 80 cm



(b) Kuas Halus 80 cm



(c) Roll Kasar 80 cm



(d) Roll Halus 80 cm



(e) *Spray* Kasar 80 cm



(f) *Spray* Halus 80 cm

Gambar 14. Hasil Visual Pengujian Ketahanan Beban Kejut: (a) kuas kasar retak pada 80 cm, (b) kuas halus retak pada 80 cm, (c) roll kasar retak pada 80 cm, (d) roll halus pada 80 cm menunjukkan variasi, dengan satu spesimen retak dan dua lainnya tidak, (e) *spray* kasar pada 80 cm juga bervariasi, dengan satu spesimen rusak dan dua lainnya utuh, serta (f) *spray* halus tidak mengalami kerusakan pada ketinggian 80 cm.

Sesuai ASTM D5420, evaluasi ketahanan beban kejut dilakukan berdasarkan tingkat kerusakan lapisan setelah menerima energi tumbukan yang sama. Pada energi kejut sebesar 4,71 J, spesimen dengan metode aplikasi *spray* pada permukaan halus (Sa 3) menunjukkan performa terbaik dengan mempertahankan integritas lapisan *coating* tanpa mengalami kerusakan selama pengujian. Tabel 9 menunjukkan hasil ketahanan beban kejut.

Tabel 9. Hasil Pengujian Ketahanan Beban Kejut.

Metode Aplikasi	Kondisi Permukaan	Berat Beban (Kg)	Tinggi Ketahanan (cm)	Hasil Uji	Energi Maksimum (Joule)
Kuas	Kasar (Sa 2 ½)	0.6	80	Rusak	4,71
			80	Rusak	
			80	Rusak	
Kuas	Halus (Sa 3)	0.6	80	Rusak	4,71
			80	Rusak	
			80	Rusak	
Roll	Kasar (Sa 2 ½)	0.6	80	Rusak	4,71
			80	Rusak	
			80	Rusak	
Roll	Halus (Sa 3)	0.6	80	Rusak	4,71
			80	Tidak rusak	
			80	Tidak rusak	
<i>Spray</i>	Kasar (Sa 2 ½)	0.6	80	Tidak rusak	4,71
			80	Tidak rusak	
			80	Tidak rusak	
<i>Spray</i>	Halus (Sa 3)	0.6	80	Tidak rusak	4,71
			80	Tidak rusak	
			80	Tidak rusak	

Tabel 9 ketahanan beban kejut lapisan *coating* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan penggunaan metode aplikasi yang mampu menghasilkan lapisan yang lebih homogen dan seragam. Pada energi kejut sebesar 4,71 J, seluruh spesimen yang diaplikasikan menggunakan metode kuas mengalami kerusakan, sedangkan pada metode roll hanya sebagian spesimen yang mampu mempertahankan integritas lapisan. Sebaliknya, seluruh spesimen yang diaplikasikan dengan metode *spray* tetap berada dalam kondisi utuh tanpa menunjukkan indikasi kerusakan setelah pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *spray* menghasilkan ketahanan beban kejut yang lebih baik dibandingkan metode kuas dan roll.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penambahan ZnO pada lapisan *epoxy* dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi *coating*, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh homogenitas dispersi partikel serta kualitas lapisan yang terbentuk [24]. Berdasarkan standar ASTM D5420, pengujian ketahanan beban kejut bertujuan untuk mengevaluasi respons lapisan terhadap energi kejut dan membandingkan tingkat ketahanan relatif antar spesimen, tanpa menetapkan nilai minimum tertentu sebagai kriteria kelulusan. Oleh karena itu, penilaian dilakukan berdasarkan kondisi kerusakan yang terjadi setelah spesimen menerima energi kejut yang sama. Pada penelitian ini, spesimen dengan metode aplikasi *spray* pada permukaan halus (Sa 3) menunjukkan kinerja terbaik karena mampu mempertahankan lapisan *coating* tetap utuh pada energi kejut sebesar 4,71 J. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi metode aplikasi *spray* dan kondisi permukaan halus merupakan konfigurasi yang paling efektif dalam meningkatkan ketahanan beban kejut lapisan *epoxy*-ZnO pada baja ASTM A36.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi kekasaran permukaan, penambahan *zinc oxide* (ZnO) sebesar 3% pada cat *epoxy*, dan metode aplikasi *coating* berpengaruh terhadap kekuatan adhesi, laju korosi, dan ketahanan beban kejut *coating* pada baja ASTM A36. Metode aplikasi *spray* memberikan kinerja *coating* terbaik dibandingkan metode kuas dan roll karena mampu menghasilkan lapisan yang lebih homogen dan stabil. Pada seluruh parameter pengujian, permukaan halus menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan permukaan kasar, yang ditunjukkan oleh nilai adhesi tertinggi sebesar

13,66 ± 0,07 MPa, laju korosi terendah sebesar 0,006560 ± 0,0002 mm/tahun, serta kemampuan mempertahankan integritas lapisan *coating* pada pengujian beban kejut dengan energi 4,71 J. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan homogenitas lapisan memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan peningkatan kekasaran permukaan dalam meningkatkan kualitas *coating*. Selain itu, hubungan antara kekuatan adhesi dan laju korosi mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai adhesi lapisan, semakin rendah laju korosi yang terjadi karena lapisan mampu memberikan perlindungan yang lebih efektif terhadap media korosif. Dengan demikian, kombinasi metode aplikasi *spray* dan permukaan halus merupakan kondisi optimum untuk meningkatkan kinerja *coating epoxy*-ZnO pada baja ASTM A36.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Liu, Z. Wang, and Y. Wei, "Influence of seawater on the carbon steel initial corrosion behavior," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 1147–1162, 2019, doi: 10.20964/2019.02.36.
- [2] K. Sabet-Bokati, E. Bakhshandeh, Z. Russell, M. Gaier, and K. P. Plucknett, "Critical investigation of the long-term integrity of sustainable anti-corrosion coatings in static and dynamic humid environments," *Prog. Org. Coat.*, vol. 204, Art. no. 109276, 2025, doi: 10.1016/j.porgcoat.2025.109276.
- [3] N. Momčilović, "Effect of corrosion-induced structural degradation on the ultimate strength of a high-tensile-steel ship hull," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 5, Art. no. 745, 2024.
- [4] A. Toloei, S. Atashin, and M. Pakshir, "Corrosion rate of carbon steel under synergistic effect of seawater parameters including pH, temperature, and salinity in turbulent condition," *Corros. Rev.*, vol. 31, no. 3–6, pp. 135–144, 2013, doi: 10.1515/corrrev-2013-0032.
- [5] F. Pessu, R. Barker, and A. Neville, "The influence of pH on localized corrosion behavior of X65 carbon steel in CO₂-saturated brines," *Corrosion*, vol. 71, no. 12, pp. 1452–1466, 2015.
- [6] I. M. Chohan, A. Ahmad, N. Sallih, N. Bheel, W. M. Salilew, and A. H. Almaliki,

- “Effect of seawater salinity, pH, and temperature on external corrosion behavior and microhardness of offshore oil and gas pipeline: RSM modelling and optimization,” *Sci. Rep.*, vol. 14, Art. no. 17463, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-67463-2.
- [7] G. Paula *et al.*, “Methods of corrosion prevention for steel in marine environments: A review,” *Results Surf. Interfaces*, vol. 18, Art. no. 100430, 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2025.100430.
- [8] Y. Xiong *et al.*, “Mechanical properties of coating/carbon steel systems under different marine environments and stresses,” *Structures*, vol. 80, Art. no. 109979, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.109979.
- [9] K. Woloszyk, “Advances in Modelling and Analysis of Strength of Corroded Ship Structures,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10 (6), no. Juni 2022, p. 807, 2022.
- [10] M. Tekgoz, Y. Garbatov, and C. G. Soares, “Review of ultimate strength assessment of ageing and damaged ship structures,” *Ocean Eng.*, vol. 217, Art. no. 107937, 2020.
- [11] A. Miszczyk and K. Darowicki, “Water uptake in protective organic coatings and its reflection in measured coating impedance,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 124, pp. 296–302, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.03.002.
- [12] S. Morsch, S. Emad, S. B. Lyon, S. R. Gibbon, and M. Irwin, “The location of adsorbed water in pigmented epoxy-amine coatings,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 173, Art. no. 107223, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107223.
- [13] A. Dalili, S. Chandra, J. Mostaghimi, H. T. C. Fan, and J. C. Simmer, “Bubble entrapment and escape from sprayed paint films,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 97, pp. 153–165, 2016, doi: 10.1016/j.porgcoat.2016.04.004.
- [14] C. M. H. Hagen, A. Hognestad, O. Ø. Knudsen, and K. Sørby, “The effect of surface roughness on corrosion resistance of machined and epoxy coated steel,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 130, pp. 17–23, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.01.030.
- [15] S. S. Jamali and D. J. Mills, “Steel surface preparation prior to painting and its impact on protective performance of organic coating,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 77, no. 12, pp. 2091–2099, 2014, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.001.
- [16] J. P. B. Van Dam, S. T. Abrahami, A. Yilmaz, Y. Gonzalez-Garcia, H. Terryn, and J. M. C. Mol, “Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 96, Art. no. 102450, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102450.
- [17] S. J. Caraguay, T. S. Pereira, R. O. Giacomelli, A. Cunha, M. Pereira, and F. A. Xavier, “The effect of laser surface textures on the corrosion resistance of epoxy coated steel exposed to aggressive environments for offshore applications,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 437, Art. no. 128371, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128371.
- [18] S. J. Caraguay, T. S. Pereira, A. Cunha, M. Pereira, and F. A. Xavier, “The effect of laser surface textures on the adhesion strength and corrosion protection of organic coatings: Experimental assessment using the pull-off test and the shaft load blister test,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 180, Art. no. 107558, 2023, doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.107558.
- [19] S. Li and H. Bi, “Non-destructive evaluations of water uptake in epoxy coating,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 141, no. 2, Art. no. 54777, 2024, doi: 10.1002/app.54777.
- [20] F. Bahremand, T. Shahrabi, and B. Ramezanzadeh, “Epoxy coating anti-corrosion properties enhancement via the steel surface treatment by nanostructured samarium oxide-poly-dopamine film,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 403, Art. no. 123722, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123722.
- [21] A. F. Jaramillo, L. F. Montoya, J. M. Prabhakar, J. P. Sanhueza, and K. Fernández, “Formulation of a multifunctional coating based on polyphenols extracted from Pine radiata bark and functionalized zinc oxide nanoparticles: Evaluation of hydrophobic and anticorrosive properties,” *Prog. Org. Coat.*, vol. 135, pp. 191–204, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.06.011.
- [22] V. S. Suhas and T. Shanmugapriya, “Synergistic ZnO–Ni/PVDF-epoxy nanocomposite coatings for enhanced corrosion resistance and mechanical performance of steel reinforcements in concrete structures,” *Results Eng.*, vol. 28, Art. no. 107296, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107296.
- [23] S. P. Vinodhini, J. R. Xavier, and A.

- Priyadharshini, "A review on flame retardant, anticorrosion, and mechanical properties of multifunctional polymer nanocomposite coatings for industrial applications," *Prog. Org. Coat.*, vol. 206, Art. no. 109361, 2025, doi: 10.1016/j.porgcoat.2025.109361.
- [24] J. Jomy and D. Prabhu, "ZnO-functionalized arabinogalactan and xylan nanocomposite epoxy coating for the corrosion protection of AISI 5140 steel," *J. Mol. Liq.*, vol. 408, Art. no. 125249, 2024, doi: 10.1016/j.molliq.2024.125249.
- [25] S. G. Croll, "Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review," *Prog. Org. Coat.*, vol. 148, Art. no. 105847, 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847.
- [26] A. R. Kannan, N. P. Kumar, Y. Palguna, P. R. C., N. S. Shanmugam, and T. Jun, "Interface characteristics and dry sliding wear behaviour of hardfaced Stellite 6 overlays on ASTM A36 structural steel," *Results Eng.*, vol. 29, Art. no. 109040, 2026.
- [27] O. A. A. El-Shamy and M. A. Deyab, "Improvement of the corrosion resistance of epoxy coatings with the use of a novel zinc oxide-alginate nanoparticles compound," *Mater. Lett.*, vol. 331, Art. no. 133402, 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133402.
- [28] Q. Zhu et al., "Hydrothermally synthesized ZnO-RGO-PPy for water-borne epoxy nanocomposite coating with anticorrosive reinforcement," *Prog. Org. Coat.*, vol. 172, Art. no. 107153, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107153.
- [29] M. K. Madhup, N. K. Shah, and P. M. Wadhvani, "Investigation of surface morphology, anti-corrosive and abrasion resistance properties of nickel oxide epoxy nanocomposite (NiO-ENC) coating on mild steel substrate," *Prog. Org. Coat.*, vol. 80, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.11.007.
- [30] ASTM International, *ASTM D4541-22: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022, doi: 10.1520/D4541-22.
- [31] ASTM International, *ASTM G102-23: Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2023, doi: 10.1520/G0102-23.
- [32] ASTM International, *ASTM D5420-21: Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021, doi: 10.1520/D5420-21.
- [33] ASTM International, *ASTM A36/A36M-19: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019, doi: 10.1520/A0036_A0036M-19.
- [34] International Organization for Standardization, *ISO 8503-1:2012, Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products—Surface Roughness Characteristics of Blast-Cleaned Steel Substrates*. Geneva, Switzerland: ISO, 2012.
- [35] ASTM International, "ASTM D4417-21 Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel," 2021. doi: 10.1520/D4417-21.
- [36] International Organization for Standardization, *ISO 8501-1:2007, Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products—Visual Assessment of Surface Cleanliness*. Geneva, Switzerland: ISO, 2007.
- [37] M. H. Nazari *et al.*, "Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: A review of recent advances," *Prog. Org. Coatings*, vol. 162, no. July 2021, p. 106573, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106573.
- [38] Hempel A/S, "Hempadur Mastic 45881: Product Data Sheet," 2025. Available: <https://www.hempel.com/en-sea/api/Hempel/DataSheet/PDS/Download/45881/en-GB>
- [39] X. Chen, C. Shaw, L. Gelman, and K. T. V Grattan, "Advances in test and measurement of the interface adhesion and bond strengths in coating-substrate systems, emphasising blister and bulk techniques," *Measurement*, vol. 139, pp. 387–402, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.03.026.
- [40] H. Wei *et al.*, "Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings,"

Compos. Part B, vol. 193, no. December 2019, p. 108035, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.

- [41] M. Wu, T. Wang, K. Wu, and L. Kan, “*Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures : A review of the mechanisms and phenomena,*” *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117813, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117813.
- [42] *International Organization for Standardization, ISO 6272-1:2011, Paints and Varnishes—Rapid-Deformation (Impact Resistance) Tests—Part 1: Falling-Weight Test, Large-Area Indenter. Geneva, Switzerland: ISO, 2011.*
- [43] ASTM International, “*ASTM D4417-21 Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel,*” 2021. doi: 10.1520/D4417-21.
- [44] ASTM International, “*ASTM E337-15 Standard Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures),*” 2015. doi: 10.1520/E0337-15.
- [45] Biro Klasifikasi Indonesia, “*Rules for Classification and Construction, Part 1: Seagoing Ships, Volume II: Rules for Hull,*” 2025.
- [46] *Society for Protective Coatings, “SSPC-PA 2-2022 Procedure for Determining Conformance to Dry Coating Thickness Requirements,*” 2022.
- [47] *International Organization for Standardization, ISO 12944-6:2018, Paints and Varnishes—Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems—Part 6: Laboratory Performance Test Methods. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.*