



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Efektivitas Lapisan *Epoxy* terhadap Daya Rekat (Adhesi) dan Ketahanan Benturan (*Impact resistance*) pada Baja ASTM A36 dengan 3 Variasi Derajat Kebersihan Area Permukaan

Bintang Fathrama Tuah¹⁾, Untung Budiarto²⁾, Parlindungan manik³⁾

¹⁾Laboratorium Las dan Material Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

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

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tingkat kebersihan permukaan hasil abrasive blasting terhadap kekuatan adhesi dan ketahanan impak pelapis epoksi pada baja ASTM A36. Tiga tingkat kebersihan permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½, dipersiapkan menggunakan metode dry abrasive blasting sesuai dengan standar ISO 8501-1. Sistem pelapis epoksi diaplikasikan menggunakan metode spray coating dengan ketebalan lapisan kering (dry film thickness) yang dikendalikan sekitar 125 µm. Kekasaran permukaan diukur menggunakan surface profile gauge, kekuatan adhesi dievaluasi melalui uji pull-off sesuai ASTM D4541, sedangkan ketahanan impak diuji berdasarkan ASTM D2794. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kebersihan permukaan meningkatkan rata-rata kekasaran permukaan dari 40,00 µm pada SA 1 menjadi 67,67 µm pada SA 2½. Rata-rata kekuatan adhesi juga meningkat dari 9,92 MPa menjadi 12,29 MPa. Hasil uji impak menunjukkan bahwa spesimen dengan tingkat kebersihan SA 2½ memiliki integritas lapisan terbaik terhadap pembebanan impak, yang ditunjukkan oleh retak yang lebih ringan pada energi impak tertinggi sebesar 7,2 J dibandingkan dengan SA 1 dan SA 2. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kebersihan dan kekasaran permukaan mampu meningkatkan mekanisme mechanical interlocking antara pelapis epoksi dan substrat baja, sehingga meningkatkan kekuatan adhesi dan ketahanan impak. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya persiapan permukaan yang tepat untuk meningkatkan keandalan sistem pelapis epoksi pada struktur baja di lingkungan maritim.

Kata Kunci : *Epoxy coating*; *surface cleanliness*; *baja ASTM A36*; *kekuatan adhesi*; *ketahanan impak*.

1. PENDAHULUAN

Industri maritim memiliki peranan penting dalam mendukung mobilitas logistik, energi, dan perdagangan global. Struktur kapal dan fasilitas lepas pantai secara kontinu beroperasi pada lingkungan yang agresif, ditandai oleh kelembaban tinggi, paparan air laut, serta beban mekanis yang berulang. Kondisi tersebut menuntut penggunaan material struktural yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanik yang memadai, tetapi juga mampu mempertahankan integritas permukaannya selama masa operasi yang panjang [1], [2].

Baja ASTM A36 merupakan salah satu baja karbon rendah yang paling banyak digunakan dalam konstruksi maritim dan industri karena sifat mekaniknya yang baik, kemudahan fabrikasi, serta biaya yang relatif ekonomis [3]. Meskipun demikian, baja ini memiliki keterbatasan terhadap degradasi permukaan, khususnya ketika mengalami benturan mekanis dan paparan lingkungan agresif. Tanpa sistem perlindungan

yang memadai, kerusakan permukaan dapat memicu kegagalan lapisan pelindung dan menurunkan umur layanan struktur secara signifikan [4], [5].

Salah satu metode perlindungan permukaan yang paling umum digunakan adalah sistem coating berbasis epoxy. Coating epoxy dikenal memiliki daya rekat yang baik, ketahanan mekanik tinggi, serta kemampuan melindungi substrat baja dari pengaruh lingkungan [6], [7], [8]. Perkembangan teknologi coating epoxy dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan performa yang signifikan baik dari aspek adhesi, ketahanan korosi, maupun ketahanan mekanik. Berbagai penelitian melaporkan bahwa modifikasi formulasi epoxy melalui penambahan nanopartikel, material keramik, maupun pengembangan lapisan antarmuka (interfacial layer) mampu meningkatkan daya tahan coating terhadap lingkungan agresif serta memperkuat ikatan dengan substrat baja [9], [10], [11], [12], [13]. Pengembangan tersebut menjadikan coating

epoxy sebagai salah satu sistem perlindungan permukaan yang paling banyak digunakan pada aplikasi maritim dan industri.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa performa lapisan epoxy tidak hanya ditentukan oleh formulasi coating, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan substrat sebelum proses pelapisan dilakukan [14], [15]. Preparasi permukaan merupakan tahap krusial dalam sistem coating karena berperan langsung dalam menentukan kekuatan ikatan antara lapisan dan substrat baja. Derajat kebersihan area permukaan menjadi salah satu parameter utama dalam preparasi permukaan karena keberadaan kontaminan seperti karat, oksida, minyak, dan debu dapat menghambat mekanisme adhesi coating [16], [17].

Permukaan yang tidak bersih secara optimal cenderung menyebabkan kegagalan adhesi dini seperti delamination dan coating disbondment [18]. Selain menghilangkan kontaminan, surface preparation juga menghasilkan profil kekasaran tertentu yang berperan dalam meningkatkan mekanisme mechanical interlocking antara lapisan coating dan permukaan baja. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa profil kekasaran permukaan yang terbentuk selama proses preparasi memiliki pengaruh langsung terhadap kekuatan adhesi dan ketahanan jangka panjang lapisan coating [19], [20], [21].

Metode abrasive blasting merupakan teknik surface preparation yang paling banyak digunakan dalam industri karena mampu menghasilkan tingkat kebersihan dan kekasaran permukaan yang sesuai dengan standar internasional [17]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kualitas surface preparation yang diperoleh melalui proses blasting mampu meningkatkan kekuatan ikatan lapisan pelindung dibandingkan metode preparasi lainnya [22], [23]. Permukaan yang memiliki tingkat kebersihan lebih tinggi terbukti mampu meningkatkan energi permukaan substrat sehingga menghasilkan daya rekat yang lebih baik antara coating dan baja [18], [19].

Hubungan antara kualitas surface preparation dan kekuatan adhesi coating telah banyak diteliti. García-Martínez et al. menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan hasil blasting mampu meningkatkan kekuatan adhesi coating epoxy pada baja karbon [24]. Selain kondisi permukaan, karakteristik coating, jenis filler, dan material pengikat juga berkontribusi terhadap kekuatan adhesi lapisan pada substrat baja [25], [26], [27]. Semakin baik kualitas adhesi yang terbentuk, semakin tinggi pula kemampuan lapisan coating dalam mempertahankan perlindungannya selama masa operasi.

Selain mempengaruhi daya rekat, kualitas ikatan lapisan juga berperan penting dalam menentukan ketahanan mekanik coating terhadap beban eksternal termasuk beban benturan (impact loading) [28]. Ketahanan benturan (*Impact Resistance*) merupakan parameter penting dalam aplikasi maritim karena struktur kapal sering mengalami benturan akibat gelombang, muatan, maupun aktivitas operasional [29], [30]. Lapisan coating dengan adhesi yang rendah cenderung mengalami retak atau terkelupas ketika menerima energi benturan, sedangkan coating dengan adhesi yang baik mampu menyerap energi benturan secara lebih efektif.

Penelitian mengenai performa mekanik coating menunjukkan bahwa peningkatan kualitas adhesi mampu meningkatkan kemampuan lapisan dalam menyerap energi benturan dan mempertahankan integritas struktur pelindung [31], [32]. Selain itu, modifikasi coating epoxy menggunakan partikel keramik, lapisan silane, maupun nanopartikel hidrofobik juga dilaporkan mampu meningkatkan ketahanan korosi sekaligus mempertahankan kualitas adhesi pada baja karbon.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengaruh kekasaran permukaan, adhesi, ketahanan korosi, dan performa mekanik coating secara terpisah [33], [34], [35], penelitian yang secara spesifik membahas pengaruh variasi derajat kebersihan area permukaan terhadap daya rekat dan ketahanan benturan coating epoxy pada baja ASTM A36 masih relatif terbatas [19], [20]. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada ketahanan korosi atau modifikasi material coating, sementara aspek mekanis lapisan akibat variasi kualitas preparasi permukaan belum banyak dieksplorasi secara mendalam.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas lapisan coating epoxy terhadap daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) pada baja ASTM A36 dengan tiga variasi derajat kebersihan area permukaan. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi hubungan antara tingkat kebersihan permukaan, nilai kekasaran permukaan, kekuatan adhesi, serta ketahanan benturan coating epoxy secara terintegrasi pada material baja ASTM A36 untuk aplikasi maritim. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pelapisan serta menjadi referensi praktis dalam optimasi preparasi permukaan untuk aplikasi maritim. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh variasi derajat kebersihan permukaan berdasarkan standar ISO 8501-1 terhadap kekasaran permukaan baja ASTM A36 hasil abrasive blasting,

menganalisis hubungan antara tingkat kebersihan permukaan, kekuatan adhesi, dan ketahanan benturan lapisan coating epoxy, serta mengkaji pengaruh peningkatan kebersihan permukaan terhadap integritas mekanik lapisan coating melalui pengujian pull-off dan impact. Selain itu, penelitian ini memberikan rekomendasi praktis mengenai prosedur preparasi permukaan yang optimal untuk aplikasi coating epoxy pada struktur baja di lingkungan maritim.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek utama dalam penelitian ini adalah spesimen baja ASTM A36 yang merupakan material konstruksi dominan dalam industri maritim Indonesia. Baja karbon rendah ini dipilih karena memiliki sifat mekanik yang baik, kemudahan fabrikasi dan pengelasan, serta banyak digunakan pada struktur kapal dan konstruksi maritim lainnya. Selain itu, ketersediaan data referensi yang memadai terkait sifat mekanik dan karakteristik material baja ASTM A36 mendukung validasi hasil penelitian secara ilmiah. Spesimen baja diperoleh dari supplier material yang telah tersertifikasi, dengan verifikasi komposisi kimia dan sifat mekanik mengacu pada standar ASTM A36.

Perolehan data penelitian dilakukan melalui pengujian eksperimental yang meliputi evaluasi kualitas preparasi permukaan dan analisis performa lapisan coating epoxy. Data primer diperoleh dari hasil pengujian daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) pada spesimen baja ASTM A36 yang telah dilapisi coating epoxy dengan variasi derajat kebersihan area permukaan. Sementara itu, data sekunder berupa spesifikasi material, prosedur preparasi permukaan, serta standar pengujian diperoleh dari literatur teknis dan dokumen standar internasional yang relevan. Berikut adalah tabel komposisi kimia dan sifat mekanik ASTM A36.

Tabel 1 Komposisi kimia baja ASTM A36

Element	ASTM A36 Requirement (%wt)	Measured Value (%wt)
C	≤ 0.25	0.2
Mn	0.80–1.20	0.98
P	≤ 0.040	0.021
S	≤ 0.050	0.018

Si	≤ 0.40	0.27
----	--------	------

Mechanical Property	Measured Value	ASTM A36 Requirement
Yield Strength	268 MPa	≥ 250 MPa
Tensile Strength	458 MPa	400–550 MPa
Elongation	24%	≥ 20%

2.2. Spesimen

Jumlah total spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah 18 buah, yang dibagi berdasarkan variasi derajat kebersihan permukaan dan jenis pengujian. Variasi derajat kebersihan area permukaan ditetapkan menjadi tiga tingkat, yang diperoleh melalui proses sandblasting sesuai standar ISO 8501-1. Tingkat derajat kebersihan permukaan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi SA 1, SA 2, dan SA 2½

Spesimen untuk pengujian daya rekat (adhesi) memiliki dimensi 150 × 50 × 6 mm dan disiapkan sebanyak 3 buah untuk setiap variasi derajat kebersihan permukaan, sehingga total spesimen adhesi berjumlah 9 buah. Pengujian adhesi dilakukan menggunakan metode pull-off test mengacu pada standar ASTM D4541.

Spesimen untuk pengujian ketahanan benturan (*Impact Resistance*) disiapkan sebanyak 9 buah dengan dimensi yang disesuaikan dengan standar ASTM D2794. Spesimen ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan lapisan coating epoxy dalam menyerap energi benturan tanpa mengalami kegagalan lapisan. Matriks eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada tabel 3

Tabel 3. Matriks eksperimen

Surface cleanliness	Adhesion specimens	Impact specimens	Total
SA 1	3	3	6
SA 2	3	3	6
SA 2½	3	3	6
Total	9	9	18

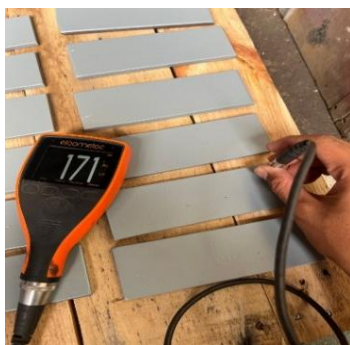


Gambar 1. Spesimen Penelitian

2.3. Persiapan Lingkungan (*Environmental Test*)

Pengujian lingkungan dilakukan untuk memastikan kondisi aplikasi lapisan coating epoxy berada dalam batas yang direkomendasikan sehingga tidak mempengaruhi hasil pengujian daya rekat (*adhesi*) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*). Parameter lingkungan yang diukur meliputi suhu udara, suhu permukaan spesimen, kelembapan relatif (*relative humidity, RH*), serta dew point. Pengendalian kondisi lingkungan ini penting karena perbedaan suhu antara permukaan spesimen dan dew point dapat mempengaruhi proses pembentukan ikatan antara coating epoxy dan substrat baja ASTM A36.

Berdasarkan standar ISO 8502-4, proses aplikasi coating hanya dapat dilakukan apabila nilai $RH \leq 85\%$ dan suhu permukaan spesimen berada minimal 3°C di atas nilai dew point. Kondisi lingkungan yang tidak memenuhi kriteria tersebut berpotensi menyebabkan kegagalan adhesi, terbentuknya lapisan yang tidak merata, serta penurunan ketahanan mekanik lapisan coating terhadap beban benturan. Oleh karena itu, pengujian dan pengendalian kondisi lingkungan dilakukan sebelum dan selama proses aplikasi coating epoxy untuk memastikan konsistensi dan keandalan hasil penelitian. Gambar 2 menunjukkan hasil pengukuran temperatur permukaan spesimen selama proses pengujian lingkungan. Kondisi lingkungan dipantau sebelum proses aplikasi coating dan selama proses curing guna memastikan bahwa proses pelapisan berlangsung tanpa dipengaruhi oleh kondensasi maupun tingkat kelembapan yang berlebihan.



Gambar 2. Pengukuran Temperatur Spesimen Hasil pengukuran kondisi lingkungan yang dilaksanakan di CV. Cipta Agung pada tanggal 24 Nopember 2025.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Data Lingkungan
Hasil Pengukuran Data Lingkungan

Dry Bulb	31°C
Wet Bulb	27°C
RH	73%
Dew Point	26
Steel Temperature	30,2°C

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4, diperoleh nilai *Relative Humidity (RH)* sebesar 73% yang masih berada di bawah batas maksimum 85%, serta temperatur spesimen tercatat $4,2^{\circ}\text{C}$ di atas dew point (memenuhi syarat minimum 3°C) [13]. Dengan demikian, proses blasting dan coating dapat dilaksanakan di CV. Cipta Agung.

2.4. Blasting

Blasting merupakan tahapan persiapan permukaan yang bertujuan untuk menghilangkan kontaminan seperti karat, debu, dan minyak, sekaligus membentuk profil kekasaran permukaan pada spesimen baja. Pada penelitian ini digunakan metode dry abrasive blasting karena mampu menghasilkan permukaan yang lebih bersih dan seragam sehingga mendukung terbentuknya ikatan yang baik antara substrat baja dan lapisan coating epoxy. Tahap blasting memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem pelapisan, dimana kualitas preparasi permukaan diperkirakan berkontribusi hingga sekitar 80% terhadap keberhasilan coating, khususnya dalam menentukan kekuatan daya rekat (*adhesi*) lapisan cat pada spesimen [6].

Spesimen penelitian menggunakan baja ASTM A36 yang dipreparasi hingga mencapai tiga variasi derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½, sesuai dengan klasifikasi standar ISO 8501-1 [15]. Perbedaan derajat kebersihan ini diperoleh dengan pengendalian parameter proses sandblasting, sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh kualitas kebersihan permukaan terhadap performa daya rekat dan ketahanan benturan lapisan coating epoxy.

Visualisasi kondisi permukaan spesimen sebelum dan sesudah proses sandblasting ditunjukkan pada Gambar 3. Secara visual, permukaan spesimen sebelum blasting terlihat masih terkontaminasi karat dan kotoran dengan warna oranye kehitaman. Setelah proses sandblasting, permukaan spesimen berubah

menjadi berwarna abu-abu metalik dengan tekstur kasar yang lebih merata, menandakan bahwa kontaminan telah berhasil dihilangkan dan profil kekasaran permukaan telah terbentuk.

Perbedaan visual antar spesimen juga menunjukkan variasi tingkat kebersihan permukaan yang sesuai dengan klasifikasi SA 1 hingga SA 2½. Spesimen dengan derajat kebersihan yang lebih tinggi menunjukkan permukaan yang lebih bersih dan homogen, sedangkan pada derajat kebersihan yang lebih rendah masih terlihat sisa noda atau bayangan oksida. Perbedaan kondisi permukaan ini menjadi faktor penting yang mempengaruhi kekuatan adhesi serta ketahanan benturan lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36. Rekomendasi parameter proses abrasif disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 5. Rekomendasi Parameter Proses Abrasif Blasting Berdasarkan Literatur

Parameter	Value
Blasting method	Dry abrasive blasting
Surface cleanliness	SA 1, SA 2, SA 2½ (ISO 8501-1)
Air pressure	5 bar
Abrasive type	Garnet abrasive (<i>jika memang menggunakan garnet</i>)
Abrasive size	20–40 mesh (<i>jika memang digunakan</i>)
Nozzle diameter	8 mm (<i>jika diketahui</i>)
Stand-off distance	150 mm (<i>jika diketahui</i>)
Blasting angle	90°
Dust cleanliness	ISO 8502-3 Class 1
Ambient temperature	31 °C
Relative humidity	73%

Steel temperature	30.2 °C
Dew point	26 °C

Seluruh parameter proses abrasif blasting dipertahankan konstan selama penelitian. Variasi kondisi spesimen hanya dilakukan pada tingkat kebersihan permukaan (SA 1, SA 2, dan SA 2½) sesuai ISO 8501-1, sehingga perbedaan hasil pengujian kekasaran permukaan, daya rekat, dan ketahanan benturan dapat dikaitkan dengan pengaruh derajat kebersihan permukaan, bukan akibat perubahan parameter proses blasting.

2.5. Inspeksi Visual dan Dust Level Hasil Blasting

Setelah proses blasting selesai, dilakukan inspeksi visual untuk mengevaluasi derajat kebersihan area permukaan spesimen baja ASTM A36 sebelum aplikasi lapisan coating epoxy. Inspeksi visual ini mengacu pada standar ISO 8501-1: Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Cleanliness. Pada penelitian ini, variasi derajat kebersihan area permukaan yang ditargetkan meliputi SA 1, SA 2, dan SA 2½, sesuai dengan klasifikasi dalam standar tersebut [15].

Inspeksi visual dilakukan dengan membandingkan kondisi permukaan hasil blasting terhadap referensi visual yang terdapat dalam ISO 8501-1. Permukaan spesimen dinyatakan memenuhi kriteria apabila telah bebas dari minyak, grease, debu, serta kotoran lain yang berasal dari kerak, karat, atau sisa lapisan cat sebelumnya. Perbedaan tingkat kebersihan permukaan secara visual digunakan sebagai dasar klasifikasi derajat kebersihan yang akan dianalisis pengaruhnya terhadap daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) lapisan coating epoxy.

Selanjutnya dilakukan inspeksi terhadap tingkat kontaminasi debu (*dust contamination test*) untuk memastikan bahwa permukaan spesimen berada dalam kondisi yang layak sebelum proses coating. Pengujian ini dilakukan menggunakan metode pressure-sensitive tape dengan mengacu pada standar ISO 8502-3: Assessment of Dust on Steel Surfaces Prepared for Painting [12]. Evaluasi tingkat debu dilakukan dengan membandingkan hasil penempelan debu pada pita perekat terhadap referensi kelas kontaminasi dalam standar tersebut.

Berdasarkan ISO 8502-3, batas maksimum tingkat kontaminasi debu yang dapat diterima untuk proses coating adalah tidak melebihi Class 2. Hasil inspeksi menunjukkan bahwa tingkat kontaminasi debu pada permukaan spesimen

berada pada Class 1, sehingga memenuhi persyaratan standar dan dinyatakan layak untuk dilanjutkan ke tahap aplikasi coating epoxy.

2.6. Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Spesimen

Setelah dilakukan inspeksi visual dan evaluasi tingkat kontaminasi debu, tahap selanjutnya adalah pengukuran kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada spesimen baja ASTM A36. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil permukaan hasil blasting pada setiap variasi derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½. Nilai kekasaran permukaan merupakan parameter penting karena berpengaruh langsung terhadap mekanisme *mechanical interlocking* antara substrat baja dan lapisan coating epoxy, yang selanjutnya menentukan kekuatan daya rekat (adhesi) lapisan tersebut.

Pengukuran profil kekasaran permukaan (*surface profile*) dilakukan menggunakan DeFelsko Surface Profile Gauge sesuai ASTM D4417. Nilai yang diperoleh dinyatakan sebagai tinggi profil permukaan (*surface profile height*) dalam satuan mikrometer (μm). Pengukuran dilakukan pada beberapa titik pada setiap spesimen, kemudian dihitung nilai rata-ratanya sebagai representasi profil permukaan hasil abrasive blasting. Ilustrasi proses pengukuran kekasaran permukaan menggunakan roughness meter ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan roughness meter

2.7. Aplikasi Coating Epoxy

Proses pelapisan permukaan material (*coating*) merupakan metode pemberian lapisan pelindung pada substrat, baik dalam bentuk cair maupun non-cair, yang setelah melalui proses pengeringan atau solidifikasi akan menempel secara permanen pada permukaan material. Lapisan coating berfungsi sebagai penghalang (*barrier layer*) yang mencegah kontak langsung

antara permukaan baja dan lingkungan sekitarnya, sehingga mampu meningkatkan ketahanan material terhadap degradasi lingkungan serta memperbaiki performa mekanis lapisan.

Pada penelitian ini, sistem pelapisan yang digunakan adalah coating berbasis epoxy yang diaplikasikan pada spesimen baja ASTM A36 dengan variasi derajat kebersihan area permukaan hasil proses blasting. Pemilihan coating epoxy didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki daya rekat tinggi, ketahanan mekanis yang baik, serta kemampuan perlindungan yang optimal terhadap lingkungan agresif. Lapisan coating epoxy diaplikasikan sebagai cat dasar (*epoxy primer*) dengan ketebalan yang dikendalikan sesuai dengan persyaratan minimum [17].

Coating diaplikasikan dalam satu lapisan epoksi dengan ketebalan lapisan kering (*dry film thickness*, DFT) rata-rata sekitar $125\ \mu\text{m}$ guna memperoleh kondisi pengujian laboratorium yang seragam dan terkontrol. Ketebalan tersebut tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan sistem pelapisan maritim secara keseluruhan, tetapi digunakan agar pengaruh derajat kebersihan permukaan terhadap kekuatan adhesi dan ketahanan benturan dapat dievaluasi secara independen tanpa dipengaruhi oleh variasi sistem pelapisan.

2.8. Wet & Dry film thickness

Kualitas lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36 sangat dipengaruhi oleh kondisi awal permukaan material yang akan dilapisi. Oleh karena itu, sebelum dilakukan proses sandblasting, kondisi permukaan substrat perlu dievaluasi melalui tahapan *surface preparation*. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa permukaan baja berada dalam kondisi yang sesuai sehingga mampu mendukung terbentuknya ikatan yang baik antara substrat dan lapisan coating epoxy, khususnya dalam kaitannya dengan daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*).

Penilaian kualitas *surface preparation* pada penelitian ini mengacu pada standar ISO 8501-1, yang merupakan standar internasional yang umum digunakan dalam industri untuk mengevaluasi tingkat kebersihan permukaan baja sebelum dan sesudah proses blasting [15]. Standar ini menyediakan kriteria dan panduan visual yang jelas untuk mengklasifikasikan derajat kebersihan area permukaan, seperti SA 1, SA 2, dan SA 2½, yang menjadi variabel utama dalam penelitian ini, adapun rumus perhitungan yang digunakan untuk mengukur nilai DFT (*Dry Filming Thickness*) adalah.

$$DFT = WFT \frac{\% \text{ Volume Solid}}{100 + \% \text{ perlarut}}$$

Evaluasi kondisi awal permukaan dilakukan secara visual dengan membandingkan kondisi spesimen terhadap referensi ilustrasi pada ISO 8501-1. Proses ini memastikan bahwa perbedaan derajat kebersihan area permukaan yang dihasilkan melalui sandblasting dapat diklasifikasikan secara konsisten dan terkontrol. Dengan penerapan standar ini, kualitas surface preparation yang dicapai diharapkan dapat memberikan pengaruh yang terukur dan dapat dianalisis secara sistematis terhadap performa lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36.

2.9. Pengujian Pull Off Test

Pengukuran ketebalan lapisan coating epoxy merupakan tahapan penting dalam penelitian ini karena ketebalan lapisan berpengaruh langsung terhadap performa mekanis coating, khususnya daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*). Pengendalian ketebalan lapisan juga diperlukan untuk memastikan bahwa perbedaan hasil pengujian yang diperoleh disebabkan oleh variasi derajat kebersihan area permukaan, bukan akibat perbedaan ketebalan coating.

Pengukuran wet film thickness (WFT) dilakukan pada saat lapisan coating epoxy masih dalam kondisi basah dengan mengacu pada standar ASTM D4414: Standard Practice for Measurement of Wet Film Thickness by Notch Gages. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan ketebalan lapisan basah sesuai dengan nilai yang telah ditentukan berdasarkan spesifikasi cat. Selanjutnya, setelah lapisan coating epoxy mengering sempurna, dilakukan pengukuran dry film thickness (DFT) dengan mengacu pada standar ASTM D4138: Standard Method for Measurement of Dry Film Thickness of Protective Coating Systems by Destructive Means.

Pada penelitian ini, ketebalan lapisan coating epoxy disesuaikan dengan technical data sheet cat HEMPADUR MASTIC 45880, yang memiliki nilai volume solid sebesar 72% dengan toleransi $\pm 2\%$ [18]. Berdasarkan nilai tersebut, ketebalan lapisan cat saat basah (WFT) ditetapkan sebesar 200 μm , sehingga diperoleh ketebalan lapisan kering total (DFT) sebesar $\pm 125 \mu\text{m}$. Pengendalian ketebalan ini dilakukan secara konsisten pada seluruh spesimen untuk menjamin keseragaman lapisan coating epoxy sebelum dilakukan pengujian daya rekat dan ketahanan benturan.

Setelah pengujian *pull-off* selesai, permukaan spesimen dan *dolly* diamati secara visual untuk mengidentifikasi lokasi terjadinya kegagalan

sesuai dengan klasifikasi ASTM D4541. Jenis kegagalan diklasifikasikan menjadi adhesive failure, yaitu kegagalan pada antarmuka antara lapisan coating dan substrat baja; cohesive failure, yaitu kegagalan yang terjadi di dalam lapisan coating itu sendiri; serta glue failure, yaitu kegagalan yang terjadi pada lapisan perekat antara *dolly* dan permukaan coating. Apabila lebih dari satu jenis kegagalan terjadi secara bersamaan, kegagalan tersebut dikategorikan sebagai mixed failure dengan persentase masing-masing jenis kegagalan yang diestimasi berdasarkan luas area permukaan yang mengalami kegagalan. Hasil identifikasi *failure mode* digunakan sebagai data pendukung untuk mengevaluasi mekanisme kegagalan lapisan coating selain nilai kekuatan adhesi yang diperoleh dari pengujian *pull-off*.

2.10. Pengujian Ketahanan Benturan (*Impact Resistance*)

Pengujian ketahanan benturan (*Impact Resistance*) dilakukan untuk mengetahui kemampuan lapisan coating epoxy dalam menahan beban kejut atau deformasi mendadak tanpa mengalami kerusakan berupa retak, pengelupasan, maupun delaminasi dari substrat baja. Pengujian ini penting mengingat pada aplikasi maritim, lapisan pelindung sering mengalami benturan mekanis akibat aktivitas operasional kapal, gelombang laut, maupun kontak dengan peralatan.

Metode pengujian mengacu pada standar ASTM D2794 – Standard Test Method for Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact). Pengujian dilakukan menggunakan metode direct impact, yaitu dengan menjatuhkan beban bermassa tertentu secara vertikal dari ketinggian yang telah ditentukan ke permukaan spesimen yang telah dilapisi coating epoxy.

Spesimen uji berupa baja ASTM A36 yang telah melalui proses surface preparation dengan tiga variasi derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½ sesuai ISO 8501-1. Seluruh spesimen telah dilapisi coating epoxy dengan ketebalan dry film thickness (DFT) rata-rata $\pm 125 \mu\text{m}$ untuk menjaga keseragaman kondisi pengujian.

Energi benturan dihitung berdasarkan hasil perkalian antara massa beban dan tinggi jatuh, kemudian dinyatakan dalam satuan Joule (J). Pengujian dilakukan secara bertahap dengan peningkatan energi benturan hingga lapisan coating menunjukkan tanda kegagalan. Setelah pengujian, permukaan spesimen diamati secara visual untuk mengidentifikasi adanya retak, pengelupasan, atau delaminasi lapisan coating.

Energi benturan dihitung berdasarkan energi potensial gravitasi yang dimiliki beban sebelum dijatuhkan. Perhitungan energi tersebut mengacu pada persamaan berikut.

$$E = m \cdot g \cdot h$$

Kriteria kegagalan pada pengujian ini ditentukan berdasarkan munculnya kerusakan lapisan coating yang terlihat secara visual pada area benturan. Nilai ketahanan benturan maksimum didefinisikan sebagai energi tertinggi yang masih dapat ditahan oleh lapisan coating tanpa menunjukkan kerusakan yang signifikan. Data hasil pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis pengaruh derajat kebersihan area permukaan terhadap ketahanan benturan serta korelasinya dengan daya lekat (adhesi) lapisan coating epoxy.

Setelah pembebanan impak, permukaan lapisan coating diperiksa secara visual untuk mengidentifikasi kerusakan lapisan, seperti retak, delaminasi lokal, dan pengelupasan coating, sesuai dengan prosedur evaluasi pada ASTM D2794. Ketahanan benturan dievaluasi secara kualitatif dengan membandingkan tingkat keparahan kerusakan yang terlihat pada setiap variasi derajat kebersihan permukaan. Penelitian ini tidak melakukan analisis citra secara kuantitatif, seperti pengukuran diameter lekukan (*dent diameter*), panjang retak (*crack length*), luas delaminasi (*delaminated area*), luas kerusakan lapisan (*coating failure area*), maupun persentase area kerusakan berdasarkan analisis citra. Selain itu, kriteria *pass/fail* pada setiap tingkat energi benturan juga tidak ditetapkan. Oleh karena itu, perbandingan ketahanan benturan dalam penelitian ini didasarkan pada tingkat kerusakan lapisan yang diamati secara visual pada kondisi energi benturan yang sama.

Sebanyak tiga spesimen digunakan untuk setiap variasi derajat kebersihan permukaan (SA 1, SA 2, dan SA 2½). Pada setiap spesimen dilakukan pengujian impak secara bertahap pada tiga tingkat energi benturan yang diperoleh dari variasi ketinggian jatuh, yaitu 80 cm (4,8 J), 100 cm (6,0 J), dan 120 cm (7,2 J). Setiap pembebanan dilakukan pada lokasi yang berbeda pada spesimen dengan jarak antartitik uji yang memadai untuk menghindari pengaruh kerusakan sebelumnya terhadap hasil pengujian berikutnya. Penentuan lokasi pembebanan dilakukan sesuai dengan prinsip pengujian ASTM D2794 sehingga setiap titik impak dapat dianggap sebagai area pengujian yang independen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Setelah *SandBlasting*

Derajat kebersihan area permukaan merupakan parameter utama dalam penelitian ini karena berpengaruh langsung terhadap daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36. Berdasarkan technical data sheet sistem coating yang digunakan, tingkat kebersihan minimum yang direkomendasikan sebelum aplikasi coating adalah Sa 1 sesuai dengan standar ISO 8501-1. Namun, pada pelaksanaan proses sandblasting, derajat kebersihan permukaan yang dicapai pada sebagian spesimen menunjukkan variasi tingkat kebersihan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½, yang digunakan sebagai variabel penelitian.

Spesimen dengan derajat kebersihan SA 2 menunjukkan kondisi permukaan yang hampir seluruhnya bebas dari karat, mill scale, dan kontaminan lainnya, dengan hanya sedikit noda atau bayangan oksida yang masih terlihat. Kondisi ini sesuai dengan kriteria ISO 8501-1, dimana permukaan baja telah dibersihkan secara menyeluruh dan siap untuk proses pelapisan. Sementara itu, spesimen dengan derajat kebersihan SA 1 masih memperlihatkan sisa noda karat atau mill scale dalam jumlah terbatas, sedangkan pada derajat kebersihan SA 2½ permukaan baja tampak bersih sempurna dengan warna metalik yang lebih seragam.

Secara visual, hasil proses sandblasting menunjukkan perbedaan yang jelas antar variasi derajat kebersihan area permukaan. Perbedaan ini diharapkan memberikan pengaruh terhadap kualitas ikatan lapisan coating epoxy serta ketahanan lapisan terhadap beban benturan. Dokumentasi visual hasil permukaan spesimen setelah proses sandblasting ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kondisi permukaan baja ASTM A36 setelah proses sandblasting dengan variasi derajat kebersihan area permukaan (SA 1, SA 2, dan SA 2½)

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36 yang memiliki yield

strength sebesar 250 MPa dan ultimate tensile strength sebesar 400–550 MPa. Nilai tersebut masih berada dalam rentang persyaratan baja kapal Grade A menurut BKI yang mensyaratkan yield strength minimum 235 MPa dan tensile strength 400–520 Mpa [36].

3.2. Aplikasi Sandblasting

Proses sandblasting pada penelitian ini dilakukan sebagai tahapan utama dalam surface preparation untuk menghasilkan variasi derajat kebersihan area permukaan pada spesimen baja ASTM A36. Tujuan dari proses ini adalah menghilangkan kontaminan permukaan seperti karat, mill scale, dan kotoran lainnya, serta membentuk profil kekasaran yang sesuai untuk mendukung daya rekat dan ketahanan benturan lapisan coating epoxy.

Aplikasi sandblasting dilakukan dengan metode dry abrasive blasting menggunakan mesin blasting bertekanan di dalam kabinet tertutup untuk menjaga konsistensi proses dan meminimalkan pengaruh lingkungan luar. Proses penyemprotan abrasif diarahkan secara merata ke seluruh permukaan spesimen dengan tekanan kerja sebesar 5 bar, yang dipertahankan konstan pada seluruh spesimen.

Variasi derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½ sesuai standar ISO 8501-1, diperoleh dengan mengendalikan parameter proses sandblasting seperti durasi penyemprotan dan intensitas pembersihan permukaan. Dengan pengendalian parameter yang konsisten, diharapkan perbedaan kondisi permukaan yang dihasilkan benar-benar merepresentasikan variasi tingkat kebersihan, sehingga pengaruhnya terhadap daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) lapisan coating epoxy dapat dianalisis secara objektif.

3.3. Pengamatan Pasca Sandblasting

Pengamatan pasca proses sandblasting dilakukan untuk mengevaluasi derajat kebersihan area permukaan spesimen baja ASTM A36 sebelum aplikasi lapisan coating epoxy. Berdasarkan technical data sheet sistem coating yang digunakan, tingkat kebersihan minimum yang direkomendasikan adalah Sa 1 sesuai dengan acuan standar ISO 8501-1. Pada pelaksanaan penelitian ini, proses sandblasting dikendalikan untuk menghasilkan tiga variasi derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½, yang selanjutnya digunakan sebagai variabel penelitian.

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa spesimen dengan derajat kebersihan SA 1 masih memperlihatkan sisa noda karat atau mill scale

dalam jumlah terbatas, namun telah memenuhi kriteria minimum standar. Pada derajat kebersihan SA 2, permukaan baja tampak hampir seluruhnya bersih dari kontaminan, dengan hanya sedikit bayangan oksida yang masih terlihat. Sementara itu, spesimen dengan derajat kebersihan SA 2½ menunjukkan kondisi permukaan yang bersih sempurna dengan warna metalik yang seragam dan tanpa indikasi kontaminan permukaan.

Perbedaan tingkat kebersihan area permukaan yang dihasilkan pasca sandblasting ini menjadi dasar untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kualitas daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36. Dengan demikian, pengamatan pasca sandblasting memastikan bahwa variasi derajat kebersihan yang digunakan telah sesuai dengan klasifikasi standar dan dapat dianalisis secara sistematis dalam tahapan pengujian selanjutnya.

3.4. Pengukuran Tingkat Kekasaran

Pengukuran tingkat kekasaran permukaan (surface roughness) dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik profil permukaan baja ASTM A36 setelah proses sandblasting dengan variasi derajat kebersihan area permukaan. Pengujian kekasaran ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kualitas surface preparation terhadap daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) lapisan coating epoxy. Pengujian profil permukaan (*surface profile*) dilakukan menggunakan DeFelsko Surface Profile Gauge sesuai ASTM D4417. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tinggi profil permukaan meningkat seiring dengan peningkatan derajat kebersihan permukaan [5].

Pengujian kekasaran dilakukan pada beberapa titik pengukuran di setiap spesimen untuk memperoleh nilai yang representatif. Parameter kekasaran yang digunakan adalah nilai profil kekasaran rata-rata (μm). Hasil pengukuran kekasaran permukaan untuk masing-masing variasi derajat kebersihan area permukaan ditampilkan pada Tabel 6.

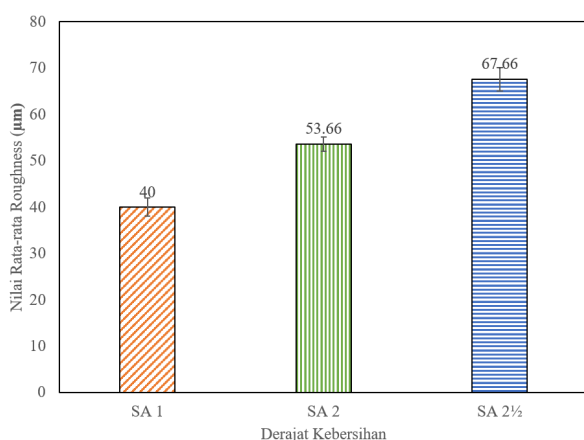
Tabel 6. Hasil Pengukuran Surface Profile Baja ASTM A36

Derajat Kebersihan	Spesimen 1 (μm)	Spesimen 2 (μm)	Spesimen 3 (μm)	Rata-rata (μm)	Standar Deviasi
SA 1	38	40	42	40	2
SA 2	52	55	54	53.67	1,5
SA 2½	65	68	70	67.67	2,5

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 7, terlihat bahwa nilai kekasaran permukaan meningkat seiring dengan meningkatnya derajat kebersihan area permukaan. Spesimen dengan derajat kebersihan SA 2½ menunjukkan nilai kekasaran tertinggi dengan rata-rata sebesar 67,67 µm, sedangkan nilai terendah diperoleh pada spesimen dengan derajat kebersihan SA 1 sebesar 40,00 µm. Spesimen dengan derajat kebersihan SA 2 menunjukkan nilai kekasaran menengah sebesar 53,67 µm.

Peningkatan nilai kekasaran ini disebabkan oleh semakin intensifnya proses sandblasting pada derajat kebersihan yang lebih tinggi, sehingga mampu menghilangkan kontaminan secara lebih menyeluruh sekaligus membentuk profil permukaan yang lebih kasar dan homogen. Profil kekasaran yang lebih tinggi berpotensi meningkatkan mekanisme mechanical interlocking antara substrat baja dan lapisan coating epoxy, yang selanjutnya dapat meningkatkan daya rekat dan ketahanan benturan lapisan.

Hubungan antara derajat kebersihan area permukaan dan nilai kekasaran rata-rata ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan tren peningkatan kekasaran seiring dengan peningkatan kualitas surface preparation.



Gambar 5. Grafik hubungan derajat kebersihan permukaan terhadap surface profile rata-rata.

3.5. Pengukuran Surface Preparation

Kondisi iklim mikro merupakan faktor penting yang harus diperhatikan sebelum melakukan proses pelapisan cat pada material. Parameter yang perlu diperhitungkan meliputi suhu kering (dry bulb) dan suhu basah (wet bulb), dari kedua nilai tersebut dapat ditentukan relative humidity dan dew point. Untuk mengukur kondisi iklim mikro ini digunakan swing hygrometer. Selain itu, tidak hanya kondisi cuaca yang harus diperhatikan, tetapi juga suhu permukaan baja. Pengukuran suhu material yang akan dilapisi cat dilakukan dengan menggunakan infrared thermometer.

Hasil pengukuran microclimatic condition pada Tabel 3 menunjukkan bahwa proses pelapisan cat dapat dilakukan sesuai dengan rekomendasi pada technical data sheet, yaitu dengan batas maksimum Relative Humidity sebesar 85% dan suhu lingkungan minimum sebesar 0 °C.

3.6. Analisa Hasil Coating

Setelah tahapan surface preparation selesai dan derajat kebersihan area permukaan spesimen baja ASTM A36 telah memenuhi kriteria yang ditetapkan, proses aplikasi lapisan coating epoxy segera dilakukan. Peralihan waktu antara proses sandblasting dan aplikasi coating dijaga seminimal mungkin untuk mencegah terjadinya kontaminasi ulang pada permukaan baja akibat pengaruh lingkungan, seperti kelembapan udara dan debu, yang dapat menurunkan kualitas daya rekat lapisan coating.

Pada penelitian ini digunakan sistem coating epoxy Hempadur Mastic 45880 yang dicampur dengan Curing Agent 95880 serta thinner dengan perbandingan 3:1:1 sesuai dengan rekomendasi technical data sheet [18]. Proses aplikasi coating dilakukan menggunakan spray gun Wipro F75G yang dihubungkan dengan kompresor WZS-20AZ, sehingga lapisan cat dapat diaplikasikan secara merata pada seluruh permukaan spesimen. Aplikasi coating dilakukan dalam satu lapisan untuk menjaga konsistensi ketebalan dan menghindari variasi hasil pengujian yang disebabkan oleh jumlah lapisan yang berbeda.

Berdasarkan technical data sheet Hempadur Mastic 45880, diketahui bahwa cat memiliki nilai volume solid sebesar 72% ± 2%. Dengan mempertimbangkan nilai tersebut, ketebalan lapisan cat pada kondisi basah (wet film thickness) ditargetkan sebesar 200 µm, sehingga setelah proses pengeringan diperoleh ketebalan lapisan kering (dry film thickness) yang sesuai untuk pengujian daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) pada baja ASTM A36. Pengendalian ketebalan lapisan ini dilakukan untuk memastikan bahwa variasi performa coating yang diamati dalam penelitian ini terutama dipengaruhi oleh perbedaan derajat kebersihan area permukaan.

3.7. Pengujian Wet Film Thickness (WFT) dan Dry Film Thickness (DFT)

Setelah proses aplikasi lapisan coating epoxy pada spesimen baja ASTM A36 selesai, dilakukan pengukuran wet film thickness (WFT) untuk memastikan ketebalan lapisan cat pada kondisi basah telah sesuai dengan nilai yang ditargetkan. Pengukuran WFT dilakukan segera setelah proses pengecatan dengan menempelkan alat ukur wet

film gauge pada permukaan spesimen yang masih basah. Tahap ini penting untuk mengontrol ketebalan lapisan sehingga perbedaan hasil pengujian daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*) tidak dipengaruhi oleh variasi ketebalan coating.

Setelah pengukuran WFT dilakukan, spesimen kemudian dibiarkan mengering dan mengalami proses curing sesuai dengan rekomendasi pada technical data sheet Hempadur Mastic 45880. Proses pengeringan hingga mencapai kondisi hard dry memerlukan waktu sekitar 3–4 hari pada kondisi lingkungan yang terkendali [18]. Setelah lapisan coating epoxy mengeras sepenuhnya, dilakukan pengukuran dry film thickness (DFT) menggunakan alat coating thickness gauge untuk mengetahui ketebalan lapisan cat pada kondisi kering.

Berdasarkan data teknis Hempadur Mastic 45880, coating epoxy ini memiliki nilai volume solid sebesar $72\% \pm 2\%$. Dengan mempertimbangkan nilai tersebut serta penambahan thinner sebesar 15%, ketebalan lapisan cat pada kondisi basah (wet film thickness) ditargetkan sebesar 200 μm , sehingga diperoleh ketebalan lapisan kering (dry film thickness) sekitar 125 μm . Pengendalian ketebalan lapisan ini dilakukan secara konsisten pada seluruh spesimen untuk memastikan bahwa variasi performa coating yang diamati dalam penelitian ini terutama dipengaruhi oleh perbedaan derajat kebersihan area permukaan.

Proses pengukuran wet film thickness (WFT) pada spesimen setelah aplikasi coating epoxy ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Proses pengukuran wet film thickness (WFT) pada lapisan coating epoxy Hempadur Mastic 45880

3.8. Hasil Proses Coating

Spesimen baja ASTM A36 yang telah melalui proses surface preparation dan memenuhi hasil pengukuran wet film thickness (WFT) dengan ketebalan sekitar $\pm 200 \mu\text{m}$ selanjutnya ditempatkan pada ruangan dengan kondisi lingkungan yang stabil untuk menjalani proses curing. Pengendalian kondisi selama proses curing

dilakukan untuk memastikan bahwa lapisan coating epoxy dapat mengeras secara optimal dan membentuk ikatan yang baik dengan substrat baja, sehingga tidak mempengaruhi hasil pengujian daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*).

Berdasarkan Technical Data Sheet Hempadur Mastic 45880, waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi dry/cured for service adalah sekitar 3–4 hari pada suhu substrat $\pm 20^\circ\text{C}$ [18]. Selama proses ini, spesimen dibiarkan tanpa gangguan mekanis dan terlindung dari kontaminasi lingkungan, seperti debu dan kelembapan berlebih, guna menjaga kualitas lapisan coating epoxy.

Setelah proses curing selesai, lapisan coating epoxy pada permukaan spesimen tampak mengering secara merata dan membentuk permukaan yang homogen tanpa cacat visual seperti gelembung, retak, atau pengelupasan. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses aplikasi dan pengeringan coating telah berlangsung dengan baik dan memenuhi persyaratan untuk dilanjutkan ke tahap pengujian daya rekat dan ketahanan benturan. Dokumentasi visual kondisi spesimen setelah lapisan coating epoxy mengering secara sempurna ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kondisi spesimen baja ASTM A36 setelah proses curing lapisan coating epoxy

3.9. Pengukuran Dry Film Thickness (DFT)

Pengukuran dry film thickness (DFT) dilakukan setelah lapisan coating epoxy pada spesimen baja ASTM A36 benar-benar mengering dan mencapai kondisi hard dry sesuai dengan Technical Data Sheet Hempadur Mastic 45880. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa ketebalan lapisan kering telah sesuai dengan nilai yang ditargetkan serta seragam pada seluruh spesimen, sehingga tidak mempengaruhi hasil pengujian daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan (*Impact Resistance*).

Setiap spesimen diukur pada tiga titik berbeda menggunakan coating thickness gauge, kemudian dihitung nilai rata-ratanya sebagai representasi ketebalan lapisan coating epoxy. Berdasarkan spesifikasi cat yang digunakan, nilai DFT yang

diharapkan adalah sekitar 125 μm , yang diperoleh dari ketebalan basah (wet film thickness) sebesar $\pm 200 \mu\text{m}$ dengan nilai volume solid $72\% \pm 2\%$.

Hasil pengukuran DFT untuk spesimen uji adhesi pada masing-masing variasi derajat kebersihan area permukaan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengukuran DFT untuk spesimen uji adhesi

Derajat Kebersihan	DFT 1 (μm)	DFT 2 (μm)	DFT 3 (μm)	Rata-rata (μm)	Standar Deviasi
SA 1	124	126	123	124,33	1,52
SA 2	125	127	124	125,33	1,52
SA 2½	126	128	125	126,33	1,52

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai DFT pada seluruh spesimen berada pada kisaran 124–126 μm , yang masih sesuai dengan nilai ketebalan yang ditargetkan. Perbedaan ketebalan antar spesimen relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses aplikasi coating epoxy telah dilakukan secara konsisten.

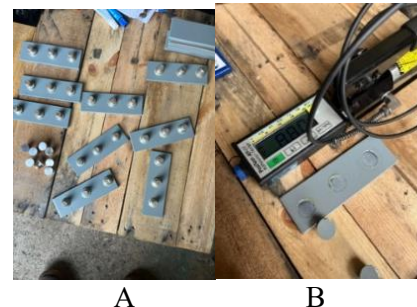
Keseragaman nilai DFT ini memastikan bahwa variasi hasil pengujian daya rekat dan ketahanan benturan yang diperoleh dalam penelitian ini terutama dipengaruhi oleh perbedaan derajat kebersihan area permukaan, bukan oleh variasi ketebalan lapisan coating epoxy.

3.10. Hasil Pengujian Daya Lekat (Adhesi)

Pengujian daya rekat (adhesi) dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan ikatan antara lapisan coating epoxy dan substrat baja ASTM A36 pada variasi derajat kebersihan area permukaan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kualitas surface preparation mempengaruhi performa adhesi lapisan coating epoxy. Metode pengujian yang digunakan adalah pull-off test sesuai dengan standar ASTM D4541 – Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.

Pada pengujian ini, dolly dengan diameter 20 mm direkatkan pada permukaan coating epoxy menggunakan adhesive epoxy dan dibiarkan mengering hingga mencapai kondisi fully cured.

Setelah proses pengeringan selesai, pengujian dilakukan dengan menarik dolly secara tegak lurus terhadap permukaan spesimen menggunakan alat adhesi tester hingga terjadi kegagalan lapisan. Spesimen yang telah dipasang dolly sebelum pengujian ditunjukkan pada Gambar 8.



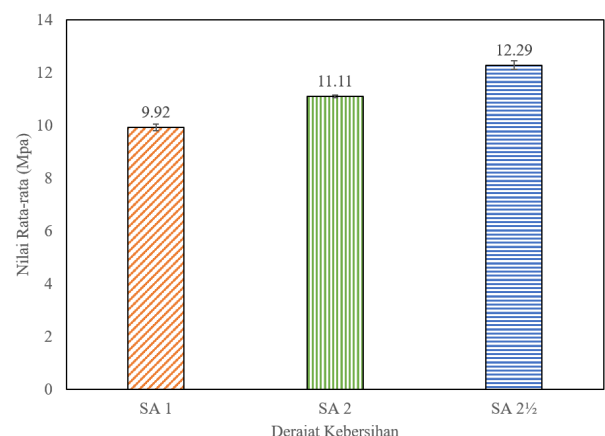
Gambar 8. (A) Spesimen Uji Adhesi Yang Telah Dipasang Dolly, (B) Spesimen Pasca Uji Adhesi

Hasil pengujian pull-off dicatat dalam satuan MPa, sedangkan lokasi dan jenis kegagalan diamati secara visual untuk menentukan zona kegagalan. Berdasarkan ASTM D4541, kegagalan adhesi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa zona, yaitu zona adhesif, zona kohesif, dan zona glue failure dan dengan nilai minimal 5 MPa.

Hasil pengujian daya rekat lapisan coating epoxy pada masing-masing variasi derajat kebersihan area permukaan ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Daya Rekat (Adhesi) Lapisan Coating Epoxy

Derajat Kebersihan	Pull-off 1 (MPa)	Pull-off 2 (MPa)	Pull-off 3 (MPa)	Rata-rata	Standar Deviasi
SA 1	9,80	10,05	9,92	9,92	0,12
SA 2	10,90	11,15	11,07	11,1	0,05
SA 2½	12,10	12,35	12,42	12,2	0,16



Gambar 9. Grafik hubungan derajat kebersihan area permukaan terhadap nilai adhesi rata-rata

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai adhesi meningkat dari 9,92 MPa pada spesimen SA 1 menjadi 12,29 MPa pada spesimen SA 2½. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi derajat kebersihan permukaan hasil sandblasting, semakin kuat ikatan antara lapisan coating epoxy dan substrat baja ASTM A36.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian van Dam et al. [37] yang melaporkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan melalui grit blasting mampu meningkatkan kekuatan adhesi awal (initial adhesion strength) pada antarmuka baja-epoxy karena bertambahnya luas kontak dan mekanisme mechanical interlocking. Selain itu, penelitian Tigmasa et al. [38] menunjukkan bahwa variasi metode pembersihan permukaan menghasilkan tingkat kekasaran yang berbeda dan secara langsung mempengaruhi kekuatan adhesi antara resin epoxy dan baja struktural.

Perbedaan nilai adhesi yang diperoleh dibandingkan penelitian terdahulu diduga disebabkan oleh perbedaan jenis coating, parameter blasting, tingkat kekasaran permukaan, serta metode pengujian yang digunakan. Meskipun demikian, seluruh penelitian menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu peningkatan kualitas surface preparation menghasilkan peningkatan kekuatan adhesi lapisan epoxy pada substrat baja.

Peningkatan kekuatan adhesi hasil uji *pull-off* dari SA 1 hingga SA 2½ dapat dijelaskan oleh pengaruh gabungan antara penghilangan kontaminan permukaan dan pembentukan profil kekasaran. Permukaan yang tidak dibersihkan secara optimal masih dapat menyisakan karat, *mill scale*, atau lapisan lemah (*weak boundary layer*) yang mengurangi kemampuan pembasahan (*wetting*) coating serta menurunkan kekuatan ikatan pada antarmuka. Sebaliknya, permukaan dengan derajat kebersihan SA 2½ menghasilkan substrat yang lebih bersih, lebih homogen, dan memiliki profil kekasaran yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan mekanisme *mechanical interlocking* antara lapisan epoksi dan substrat baja. Kondisi tersebut menjelaskan nilai rata-rata kekuatan adhesi yang lebih tinggi pada spesimen dengan derajat kebersihan SA 2½.

Tabel 9. Hasil Pengujian Daya Rekat (*Pull-off Adhesion*) dan Karakteristik Kegagalan Lapisan Coating Epoxy

Cleanliness grade	Pull-off strength (MPa)	Failure mode	Failure percentage
SA 1	9.92	Adhesive + Glue failure	Adhesive 70%; Glue 30%
SA 2	11.1	Cohesive + Glue failure	Cohesive 60%; Glue 40%
SA 2½	12.2	Cohesive failure	Cohesive 100%

3.11. Hasil Pengujian Ketahanan Benturan (*Impact Resistance*)

Pengujian ketahanan benturan (*Impact Resistance*) dilakukan untuk mengetahui kemampuan lapisan coating epoxy dalam menahan beban kejut atau benturan tanpa mengalami kerusakan berupa retak, pengelupasan, maupun delaminasi. Pengujian ini penting karena pada aplikasi di industri maritim, struktur baja sering mengalami benturan mekanis akibat aktivitas operasional, gelombang, maupun kontak dengan peralatan.

Pengujian *Impact Resistance* pada penelitian ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM D2794 – *Standard Test Method for Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact)*. Metode yang digunakan adalah direct impact test, di mana beban massa 0,60kg dijatuhkan secara vertikal dari ketinggian tertentu ke permukaan spesimen yang telah dilapisi coating epoxy. Energi benturan dinyatakan dalam satuan Joule (J) sebagai hasil perkalian massa beban, tinggi jatuh dan per gravitasi.

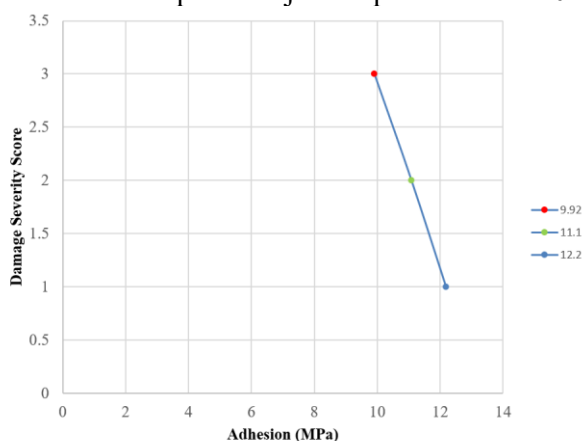
Spesimen uji merupakan baja ASTM A36 yang telah dilapisi coating epoxy dengan ketebalan dry film thickness (DFT) rata-rata $\pm 125 \mu\text{m}$, serta divariasikan berdasarkan derajat kebersihan area permukaan, yaitu SA 1, SA 2, dan SA 2½. Setelah pengujian benturan, permukaan spesimen diamati secara visual untuk mengidentifikasi adanya retak, pengelupasan, atau kerusakan lapisan coating.

Hasil pengujian ketahanan benturan lapisan coating epoxy pada masing-masing variasi derajat kebersihan area permukaan ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Pengujian Ketahanan Benturan (*Impact Resistance*)

Derajat Kebersihan	Ketinggian Jatuh Beban (cm)	Energi Benturan Maksimum (J)	Kondisi Lapisan
SA 1	80	4,8	Retak mikro
	100	6,0	Retak mulai dominan
	120	7.2	Lapisan cat mengalami kerusakan
SA 2	80	4,8	Dent mikro
	100	6,0	Retak mulai dominan
	120	7.2	Retak Dominan
SA 2½	80	4,8	Dent mikro
	100	6,0	Retak mikro
	120	7.2	Retak Mulai Dominan

Hubungan antara kekuatan adhesi hasil pengujian *pull-off* dan tingkat kerusakan akibat pembebanan impak ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. grafik hubungan antara kekuatan adhesi (*pull-off adhesion strength*) dan tingkat kerusakan akibat impak (*impact damage severity*).

Gambar 12 memperlihatkan bahwa peningkatan kekuatan adhesi diikuti oleh penurunan tingkat kerusakan lapisan coating akibat pembebanan impak. Spesimen dengan nilai adhesi yang lebih tinggi menunjukkan tingkat kerusakan yang lebih rendah, mengindikasikan bahwa ikatan antarmuka yang lebih kuat mampu mendistribusikan energi benturan secara lebih efektif sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya retak maupun delaminasi lapisan coating.

Berdasarkan hasil pada Tabel 9, terlihat bahwa ketahanan benturan lapisan coating epoxy meningkat seiring dengan meningkatnya derajat kebersihan area permukaan. Spesimen dengan derajat kebersihan permukaan SA 2½

menunjukkan kerusakan lapisan yang paling ringan pada energi benturan tertinggi sebesar 7,2 J dibandingkan dengan spesimen SA 1 dan SA 2. Namun demikian, retakan yang dapat diamati secara visual masih muncul setelah pembebanan impak pada tingkat energi tersebut.. Sebaliknya, pada spesimen dengan tingkat kebersihan SA 1, lapisan coating mulai menunjukkan retak mikro dan pengelupasan lokal pada energi benturan yang lebih rendah, yaitu 4,8 Joule.

Peningkatan ketahanan benturan ini berkaitan erat dengan kualitas ikatan antara lapisan coating epoxy dan substrat baja. Permukaan yang lebih bersih memungkinkan terjadinya ikatan adhesi dan kohesi yang lebih baik, sehingga lapisan coating mampu mendistribusikan energi benturan secara lebih merata dan mencegah terjadinya konsentrasi tegangan pada titik tertentu.

Hasil pengujian ini juga menunjukkan keterkaitan antara daya rekat (adhesi) dan ketahanan benturan, di mana spesimen dengan nilai adhesi yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan benturan yang lebih baik. Dengan demikian, derajat kebersihan area permukaan menjadi faktor kunci dalam meningkatkan performa mekanik lapisan coating epoxy pada baja ASTM A36.

Hasil pengujian ketahanan benturan menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan hasil pengujian adhesi. Lapisan coating yang memiliki ikatan antarmuka yang lebih kuat cenderung lebih tahan terhadap delaminasi maupun retak akibat pembebanan impak terlokalisasi karena energi benturan dapat didistribusikan secara lebih efektif melalui antarmuka antara coating dan substrat. Tingkat kerusakan yang lebih ringan pada spesimen dengan derajat kebersihan SA 2½ pada energi benturan sebesar 7,2 J menunjukkan bahwa peningkatan kualitas preparasi permukaan berkontribusi terhadap peningkatan integritas lapisan coating ketika menerima pembebanan mekanik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh derajat kebersihan permukaan terhadap kekuatan adhesi dan ketahanan benturan lapisan coating epoksi yang diaplikasikan pada baja ASTM A36. Peningkatan derajat kebersihan permukaan dari SA 1 menjadi SA 2½ meningkatkan rata-rata profil kekasaran permukaan dari 40,00 μm menjadi 67,67 μm serta meningkatkan kekuatan adhesi hasil uji *pull-off* dari 9,92 MPa menjadi 12,20 MPa. Peningkatan tersebut disebabkan oleh proses penghilangan kontaminan yang lebih efektif dan terbentuknya mekanisme *mechanical interlocking*

yang lebih kuat antara lapisan epoksi dan substrat baja.

Hasil pengujian ketahanan benturan menunjukkan bahwa spesimen dengan derajat kebersihan SA 2½ mengalami kerusakan lapisan yang paling ringan pada energi benturan tertinggi sebesar 7,2 J, sedangkan spesimen SA 1 menunjukkan munculnya retak mikro dan kerusakan lapisan pada tingkat energi yang lebih rendah. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan kualitas preparasi permukaan mampu meningkatkan kekuatan adhesi sekaligus integritas mekanik lapisan coating epoksi terhadap pembebanan impak. Meskipun demikian, analisis kuantitatif terhadap tingkat kerusakan akibat impak serta analisis statistik masih diperlukan pada penelitian selanjutnya untuk mengonfirmasi signifikansi dari kecenderungan hasil yang diperoleh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyelesaian penelitian ini, penulis mendapat dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada pengelola Laboratorium Teknologi Material dan Produksi Kapal, Departemen Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro, Semarang, kepada Bapak Anto selaku pemilik CV. Cipta Agung, Surabaya, serta kepada pengelola Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material, Departemen Teknik Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition*. 2008. doi: 10.1002/9780470277270.
- [2] M. Honarvar Nazari *et al.*, "Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: A review of recent advances," *Prog. Org. Coatings*, vol. 162, no. October 2021, p. 106573, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106573.
- [3] ASTM International, "ASTM A36/A36M – 97: Standard Specification for Carbon Structural Steel," vol. 552, no. 2, 1997.
- [4] H. Wang *et al.*, "Mechanical durability and corrosion resistance of epoxy based superhydrophobic coating with double-layer embedded structure," *Polymer (Guildf.)*, vol. 343, no. October 2025, p. 129467, 2026, doi: 10.1016/j.polymer.2025.129467.
- [5] S. Riyadil *et al.*, "No Title 濟無 No Title No Title No Title," vol. 6, no. 0, pp. 167–186, 2025.
- [6] D. Y. Perera, "On adhesion and stress in organic coatings," *Prog. Org. Coatings*, vol. 28, no. 1, pp. 21–23, 1996, doi: 10.1016/0300-9440(95)00585-4.
- [7] W. D. Corbett, "TENSILE ADHESION:," vol. 4541, 2001.
- [8] J. Yu, F. Zhang, X. Li, S. Li, Y. Lu, and Y. Cheng, "Study on interface adhesion between EP/IFR/HBPSi epoxy intumescent coating and steel substrate," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 132, no. August 2023, p. 103679, 2024, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103679.
- [9] J. Wu, G. Ji, and Q. Wu, "Preparation of epoxy/ZrO₂ composite coating on the Q235 surface by electrostatic spraying and its corrosion resistance in 3.5% NaCl solution," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 17, pp. 10625–10633, Apr. 2022, doi: 10.1039/d2ra01220k.
- [10] Y. Xu *et al.*, "Anticorrosive behavior of epoxy coating modified with hydrophobic nano-silica on phosphatized carbon steel," *Prog. Org. Coatings*, vol. 151, no. November 2020, p. 106051, 2021, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.106051.
- [11] I. Chopra, S. K. Ola, Priyanka, V. Dhayal, and D. S. Shekhawat, "Recent advances in epoxy coatings for corrosion protection of steel: Experimental and modelling approach-A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 62, pp. 1658–1663, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.659.
- [12] Q. Zeng *et al.*, "Durable superhydrophobic silica/epoxy resin coating for the enhanced corrosion protection of steel substrates in high salt and H₂S environments," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 654, no. July, p. 130137, 2022, doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.130137.
- [13] Y. Geng, Y. Liu, A. Liu, S. Li, and H. Zhang, "Improved interfacial interactions and corrosion resistance of epoxy coated reinforcement by pre-electrodeposited silane layer," *Prog. Org. Coatings*, vol. 173, no. June, p. 107171, 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107171.
- [14] IEC60502-2, "International Standard International Standard," *61010-1* © Iec2001, vol. 2008, p. 13, 2008.
- [15] S. T. Method, "Standard Test Method for Adhesion-in-Peel of Elastomeric Joint Sealants 1," *Current*, vol. 04, pp. 5–8, 1994.

- [16] ISO 8502 - 3, "Preparation of steel substrates before application of paints and related products-Tests for the assessment of surface cleanliness-Part 3: Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method)," *Int. Organ. Stand.*, vol. 2017, 2017, [Online]. Available: www.iso.org/standard/68811.html
- [17] S. S. Jamali and D. J. Mills, "Steel surface preparation prior to painting and its impact on protective performance of organic coating," *Prog. Org. Coatings*, vol. 77, no. PB, pp. 2091–2099, 2014, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.001.
- [18] A. Momber, "Blast cleaning technology," *Blast Clean. Technol.*, pp. 1–540, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-73645-5.
- [19] D. Zhang, Y. Huang, and Y. Wang, "Bonding performances of epoxy coatings reinforced by carbon nanotubes (CNTs) on mild steel substrate with different surface roughness," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 147, no. May, p. 106479, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106479.
- [20] A. de Oliveira Rocha *et al.*, "Historical perspectives and research interests of the International Journal of Adhesion and Adhesives: An altmetric and bibliometric analysis," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 142, no. July, 2025, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2025.104109.
- [21] S. G. Croll, "Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 148, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847.
- [22] A. Miturska-Barańska, "Impact of adhesive type and abrasive wear used in the surface preparation process on the strength of steel sheet adhesive joints," *Technol. i Autom. Montażu*, vol. 117, no. 3, pp. 10–17, 2022, doi: 10.7862/tiam.2022.3.2.
- [23] A. Rajput, M. Ak, S. J. Kim, S. H. Noh, J. H. Park, and J. K. Paik, "Effects of the surface preparation on the life of epoxy coating in steel ship plates: an experimental study," *Ships Offshore Struct.*, vol. 14, no. sup1, pp. 199–206, 2019, doi: 10.1080/17445302.2019.1565072.
- [24] Z. Sativa, P. M. Manik, and O. Mursid, "Analisis Pengaruh Perbedaan Surface Preparation Dengan Variasi Jenis Cat Terhadap Kekuatan Adhesi Dan Ketahanan Impact Coating Pada Baja Ss400," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, pp. 1129–1141, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1711.
- [25] P. Mayer, A. Dmitruk, M. Lubecki, and M. Stosiak, "Adhesion of epoxy coatings with micrometer size fillers to steel substrate," *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 58, no. 2, pp. 437–443, 2020, doi: 10.15632/jtam-pl/118821.
- [26] N. Paranjpe, M. N. Uddin, A. S. Rahman, and R. Asmatulu, "Effects of Surface Treatment on Adhesive Performance of Composite-to-Composite and Composite-to-Metal Joints," *Processes*, vol. 12, no. 12, pp. 1–16, 2024, doi: 10.3390/pr12122623.
- [27] M. R. D. Carneiro, B. C. Freitas, I. B. de Barros, J. B. de Campos, I. N. Bastos, and H. R. M. Costa, "Evaluation of adhesion of epoxy resin sealant to improve the corrosion resistance of thermal sprayed coatings," *Appl. Adhes. Sci.*, vol. 8, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s40563-020-00130-7.
- [28] U. Budiarto, P. Manik, and G. A. Kusuma, "Analisis Penerapan Coating Pada Baja Astm a36 Dengan Variasi Cat Terhadap Laju Korosi, Kekuatan Adhesi Dan Ketahanan Impact Coating," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 3, pp. 1253–1269, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i3.1500.
- [29] T. D. Widodo, R. Bintarto, P. H. Setyarini, R. Raharjo, and I. D. Darmawan, "The Effect of Coating Procedure on the Strength and Corrosion Resistance of Epoxy Coatings on A36 Steel: Pull-Out and Potentiodynamic Analysis," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 15, no. 5, pp. 27096–27104, 2025, doi: 10.48084/etasr.12259.
- [30] M. O. Pessoa *et al.*, "Anticorrosion and adhesion performance of a monolayer and double layer silane-epoxy coating systems applied on carbon steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 485, no. April, 2024, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130909.
- [31] G. P. Millán Ramírez, H. Byliński, and M. Niedostatkiwicz, "Mechanical and physical assessment of epoxy, mineral, solvent-based, and water-soluble coating materials," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-18022-0.
- [32] P. Mayer, A. Dmitruk, and J. Pach, "Impact and adhesion tests of composite polymer coatings," *Compos. Theory Pract.*, vol. 3, pp. 156–161, 2018.
- [33] R. Márquez-Cortés *et al.*, "Practical adhesion of duplex coatings on AISI 4140 steel using HiPIMS and boriding processes," *Results Eng.*, vol. 29, no. July 2025, 2026, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108346.
- [34] H. Yu *et al.*, "Progress in Organic Coatings

Unraveling the critical role of adhesion layer design in superhydrophobic coatings for superior corrosion protection of sintered Nd-Fe-B magnets,” vol. 219, no. April, 2026, doi:

10.1016/j.porgcoat.2026.110368.

- [35] E. Tubaro, A. Rondinella, M. Pesle, A. Bontempi, L. Fedrizzi, and F. Andreatta, “Progress in Organic Coatings Effect of silane content on barrier properties and adhesion of fouling release coatings for naval applications,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 219, no. April, p. 110367, 2026, doi: 10.1016/j.porgcoat.2026.110367.
 - [36] BKI, “Rules for the Classification and Construction Part 1. Seagoing Ships Volume II Rules for Hull 2017 Edition Biro Klasifikasi Indonesia,” vol. II, p. Vol 2, 2017, [Online]. Available: www.bki.co.id
 - [37] J. P. B. van Dam, S. T. Abrahams, 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, no. September 2019, p. 102450, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102450.
 - [38] L. Tigmasa, D. Guerra, J. Escobar, and F. Peña, “Efecto del tratamiento superficial ante la adherencia de la resina epóxica entre el acero estructural y fibra de carbono unidireccional,” *Rev. InGenio*, vol. 8, no. 2, pp. 107–116, 2025, doi: 10.18779/ingenio.v8i2.942.
-