

Analisis Daya Lekat Sistem Duplex Coating Pada Baja Karbon Galvanis Dengan Variasi Persiapan Permukaan Berdasarkan Standar NORSOK M-501 Dan ISO 12944

Muhammad Izzad Kurniadi , Annisa Fyona, S.K.M., M.K.K.K , Kms M Avrieldi, S.Pd., M.Pd. T.

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: Kurnyaadi710@email.com

Abstrak

Korosi merupakan salah satu penyebab utama penurunan umur layan struktur baja pada lingkungan maritim sehingga diperlukan sistem perlindungan yang efektif. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah sistem *duplex coating*, yaitu kombinasi antara lapisan *hot-dip galvanizing* (HDG) dan pelapisan organik (*coating*). Keberhasilan sistem tersebut sangat dipengaruhi oleh kualitas persiapan permukaan karena berperan dalam meningkatkan daya lekat (*adhesion strength*) melalui mekanisme *mechanical interlocking*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi metode persiapan permukaan terhadap kekuatan daya lekat sistem *duplex coating* pada baja karbon ASTM A36 galvanis. Variasi metode persiapan permukaan yang digunakan meliputi tanpa *blasting* (*solvent cleaning*), *sweep blasting*, dan *grit blasting*. Sistem *coating* yang digunakan merupakan sistem dua lapis (*two-coat system*) yang terdiri atas *epoxy primer* (Penguard Primer) dan *polyurethane topcoat* (Hardtop AX) dengan ketebalan lapisan kering (*Dry Film Thickness/DFT*) berkisar antara 140–150 μm . Prosedur persiapan permukaan dan evaluasi hasil pengujian mengacu pada standar NORSOK M-501, sedangkan sistem *coating* mengacu pada ISO 12944-5 untuk kategori lingkungan korosivitas C3 hingga C4. Pengujian kekuatan adhesi dilakukan menggunakan metode *pull-off test* berdasarkan ASTM D4541 dan ISO 4624. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *grit blasting* menghasilkan nilai kekasaran permukaan dan kekuatan adhesi tertinggi dibandingkan metode *sweep blasting* maupun *non blasting*. Seluruh spesimen memenuhi persyaratan minimum kekuatan adhesi sebesar 5 MPa sesuai standar NORSOK M-501. Hasil identifikasi *failure mode* juga menunjukkan bahwa spesimen dengan metode *grit blasting* didominasi oleh *cohesive failure*, yang mengindikasikan kualitas ikatan *coating* yang lebih baik dibandingkan metode persiapan permukaan lainnya. Dengan demikian, metode *grit blasting* direkomendasikan sebagai metode persiapan permukaan yang paling optimal untuk meningkatkan daya lekat sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis.

Kata kunci : *Duplex coating, Hot-Dip Galvanizing (HDG), ASTM A36, NORSOK M-501, ISO 12944, Pull-Off Test, Adhesion Strength.*

Abstract

Corrosion is one of the main causes of reduced service life of steel structures in marine environments, making effective protection systems essential. One commonly used method is a duplex coating system, which combines a hot-dip galvanizing (HDG) layer with an organic coating. The performance of this system is strongly influenced by

the quality of surface preparation, as it contributes to improving adhesion strength through the mechanical interlocking mechanism. This study aims to analyze the effect of variations in surface preparation methods on the adhesion strength of a duplex coating system applied to galvanized ASTM A36 carbon steel. The surface preparation methods consisted of non-blasting (solvent cleaning), sweep blasting, and grit blasting. The coating system used a two-coat system consisting of an epoxy primer (Penguard Primer) and a polyurethane topcoat (Hardtop AX), with a dry film thickness (DFT) ranging from 140–150 μm . The surface preparation procedures and test evaluation were conducted with reference to the NORSOK M-501 standard, while the coating system referred to ISO 12944-5 for corrosivity categories C3 to C4. Adhesion strength was evaluated using the pull-off test method in accordance with ASTM D4541 and ISO 4624. The results showed that the grit blasting method produced the highest surface roughness and adhesion strength compared with sweep blasting and non-blasting methods. All specimens met the minimum adhesion strength requirement of 5 MPa specified by NORSOK M-501. The failure mode identification also showed that the specimens prepared using grit blasting were predominantly characterized by cohesive failure, indicating better coating bond quality compared with the other surface preparation methods. Therefore, grit blasting is recommended as the most optimal surface preparation method for improving the adhesion strength of the duplex coating system on galvanized carbon steel.

Keywords : Duplex coating, Hot-Dip Galvanizing (HDG), ASTM A36, NORSOK M-501, ISO 12944, Pull-Off Test, Adhesion Strength.

1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Korosi merupakan salah satu penyebab utama degradasi material pada struktur baja, terutama pada lingkungan pesisir tropis yang memiliki kelembapan tinggi dan kandungan garam yang signifikan [1]. Kondisi tersebut menyebabkan baja karbon seperti ASTM A36 yang banyak digunakan pada konstruksi maritim memerlukan sistem proteksi yang baik untuk mencegah kerusakan akibat korosi.

Salah satu metode perlindungan yang efektif adalah sistem *duplex*, yaitu kombinasi antara lapisan seng melalui proses *hot-dip galvanizing* (HDG) dan pelapisan organik (*coating*) [2]. Sistem *duplex* menghasilkan efek sinergis, di mana lapisan *coating* berfungsi sebagai *barrier protection* terhadap lingkungan, sementara lapisan seng (Zn) memberikan perlindungan katodik terhadap substrat baja sehingga mampu meningkatkan umur layan material secara signifikan dibandingkan sistem perlindungan tunggal [2]. Selain itu, penerapan sistem *duplex coating* juga terbukti mampu meningkatkan ketahanan korosi dan memperpanjang masa pakai struktur baja pada lingkungan yang korosif [3].

Dalam penelitian ini, sistem pelapisan mengacu pada kategori lingkungan C3 hingga C4 berdasarkan *International Organization for Standardization* (ISO) 12944-2, yang merepresentasikan kondisi lingkungan industri hingga pesisir dengan tingkat korosivitas sedang hingga tinggi [4]. Sistem *coating* yang digunakan mengacu pada ISO 12944-5, yaitu kombinasi *epoxy primer* dan *polyurethane topcoat* untuk memberikan perlindungan terhadap korosi serta ketahanan terhadap paparan lingkungan [5]. Selain itu, standar NORSOK M-501 digunakan sebagai acuan dalam proses persiapan permukaan dan pengendalian kualitas aplikasi *coating*, meliputi kebersihan permukaan, kondisi lingkungan saat aplikasi, serta kriteria performa adhesi [6].

Keberhasilan sistem *duplex coating* sangat dipengaruhi oleh kualitas persiapan permukaan. Persiapan permukaan berperan dalam menghasilkan profil kekasaran (*surface profile*) yang mendukung daya lekat *coating* melalui mekanisme *mechanical interlocking* [7]. Di samping itu, karakteristik permukaan baja galvanis juga memengaruhi interaksi antara lapisan *coating* dan substrat sehingga berpengaruh terhadap

kekuatan adhesi sistem pelapisan [8]. Oleh karena itu, pemilihan metode persiapan permukaan menjadi faktor penting dalam menghasilkan sistem pelapisan yang memiliki daya lekat tinggi.

Sistem *duplex coating* telah banyak diterapkan sebagai metode perlindungan korosi pada baja galvanis [3]. Selain itu, kualitas persiapan permukaan dan karakteristik substrat galvanis diketahui memengaruhi kekuatan adhesi *coating* [7][8]. Namun, kajian yang membandingkan metode persiapan permukaan berupa *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting* terhadap kekuatan adhesi sistem *duplex coating* berdasarkan standar NORSOK M-501 dan ISO 12944 masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi metode persiapan permukaan terhadap kekuatan adhesi sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis sehingga dapat memberikan rekomendasi metode persiapan permukaan yang paling optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*, terhadap nilai daya lekat (*adhesion strength*) sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis? Apakah hasil pengujian daya lekat sistem *duplex coating* telah memenuhi kriteria minimum yang dipersyaratkan dalam standar NORSOK M-501? Metode persiapan permukaan manakah yang memberikan performa adhesi paling optimal pada sistem *duplex coating*?

1.3 Batasan Masalah

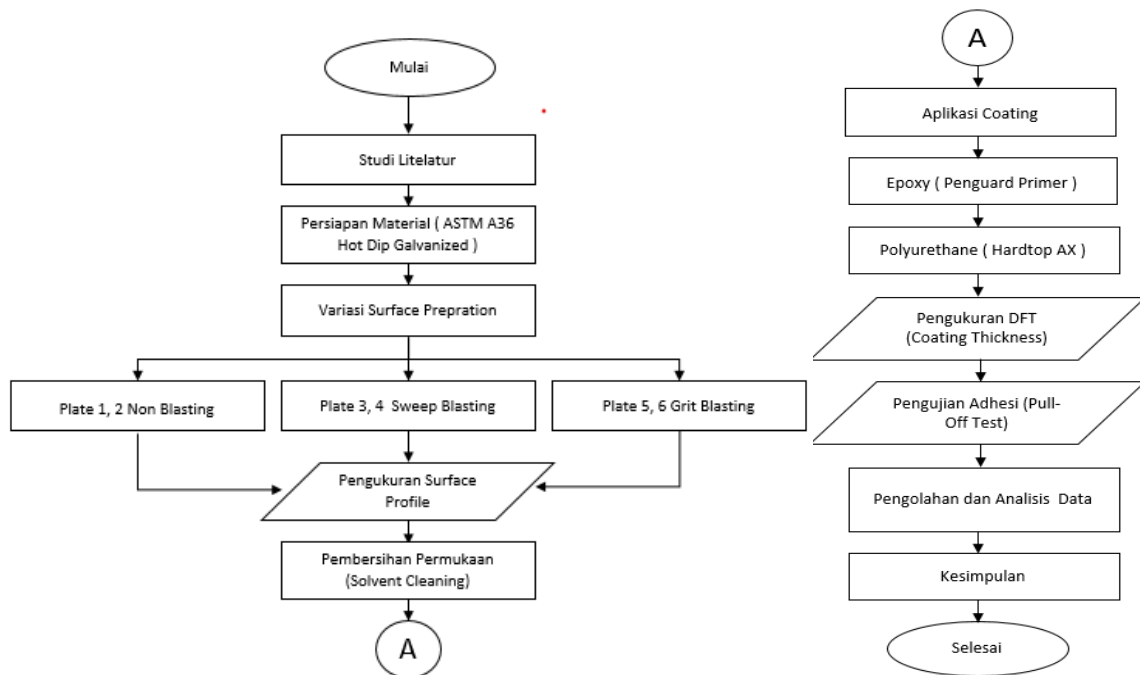
Penelitian ini dibatasi pada penggunaan baja karbon ASTM A36 yang telah dilapisi seng melalui proses *hot-dip galvanizing* (HDG). Variabel yang diteliti difokuskan pada metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*. Sistem *coating* yang digunakan merupakan sistem dua lapis yang terdiri atas *epoxy primer* (Penguard Primer) dan *polyurethane topcoat* (Hardtop AX). Evaluasi penelitian difokuskan pada kekuatan adhesi sistem *duplex coating* melalui pengujian *pull-off test*. Pengambilan data dilakukan pada tiga titik pengujian pada setiap spesimen untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Penilaian performa adhesi mengacu pada standar ASTM D4541, ISO 4624, serta kriteria penerimaan yang ditetapkan dalam NORSOK M-501.

2 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi metode persiapan permukaan terhadap kekuatan daya lekat (*adhesion strength*) sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis. Pendekatan eksperimen dilakukan dengan mengontrol variabel penelitian, yaitu jenis material, sistem *coating*, dan metode pengujian adhesi. Variasi penelitian difokuskan pada metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*, sehingga pengaruh kondisi permukaan terhadap kekuatan adhesi *coating* dapat dianalisis secara sistematis.

2.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian digunakan untuk menggambarkan tahapan penelitian secara terarah mulai dari persiapan hingga analisis data, alur penelitian ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 1. Flowchart Penelitian

2.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi industri. Pengambilan material dilakukan di PT Energi Graha Sagara sebagai lokasi penyedia material baja karbon ASTM A36 yang telah melalui proses *hot-dip galvanizing* (HDG). Selanjutnya, PT Tosan Aji Mumpuni digunakan sebagai lokasi pelaksanaan persiapan permukaan, aplikasi *coating*, dan pengujian adhesi pada spesimen penelitian.

2.3 Material dan Spesimen

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon ASTM A36 yang telah dilapisi seng melalui proses *hot-dip galvanizing* (HDG) dengan ketebalan rata-rata 200 μm . Spesimen yang digunakan terdiri dari 6 pelat berukuran 300 mm $\times$ 300 mm dengan ketebalan 8 mm. Seluruh spesimen kemudian dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan berdasarkan metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*, dengan masing-masing metode menggunakan dua spesimen.

2.4 Alat dan Bahan Penelitian

2.4.1 Alat Penelitian

Tabel 1. Peralatan yang digunakan dalam penelitian

No	Alat	Fungsi
1	DFT Coating Thickness Gauge	Mengukur ketebalan lapisan zinc dan <i>coating</i>
2	Surface Profile Gauge	Mengukur kekasaran permukaan hasil <i>blasting</i>
3	Replica Tape	mengukur profil permukaan (<i>surface profile</i> /kekasaran)
4	Blasting Machine / Sand Blasting Equipment	Melakukan proses <i>sweep blasting</i>
5	Air Compressor	Menyuplai tekanan udara pada <i>blasting</i>
6	Pull-Off Adhesion Tester	Mengukur kekuatan <i>adhesi coating</i>

No	Alat	Fungsi
7	<i>Dolly Pull-Off Test</i>	Media penarikan pada pengujian adhesi
8	<i>Mixing Equipment</i>	Mencampur material <i>coating</i>
9	<i>Spray Gun / Air Spray</i>	Aplikasi <i>coating</i> pada permukaan <i>spesimen</i>

2.4.2 Bahan Penelitian

Table 2. Bahan yang digunakan dalam penelitian

No	Bahan	Keterangan
1	Baja karbon ASTM A36	Material utama penelitian
2	Lapisan galvanis (HDG)	Lapisan seng pada baja karbon
3	<i>Abrasive blasting media</i>	Untuk proses <i>blasting</i>
4	<i>Solvent cleaner</i>	Membersihkan permukaan dari kontaminasi
5	<i>Epoxy primer</i> (Penguard Primer)	Lapisan dasar <i>coating</i>
6	Polyurethane topcoat (Hardtop AX)	Lapisan akhir <i>coating</i>
7	Lem	Adhesive (untuk pull-off test)

Sistem *coating* yang digunakan merupakan sistem dua lapis (*two-coat system*) yang mengacu pada prinsip perlindungan korosi dalam standar ISO 12944 dan praktik industri pada NORSOK M-501. Perekat Araldite Standard digunakan untuk melekatkan *dolly* pada permukaan *coating* dalam pelaksanaan pengujian *pull-off test* yang mengacu pada ASTM D4541 dan ISO 4624.

2.5 Prosedur Penelitian

2.5.1 Persiapan Permukaan

Permukaan spesimen dibersihkan menggunakan metode *solvent cleaning* untuk menghilangkan kontaminasi seperti minyak, debu, dan kotoran. Selain itu, permukaan juga dikontrol terhadap kemungkinan adanya kontaminasi garam (*salt contamination*) yang dapat mempengaruhi daya lekat *coating*. Selanjutnya dilakukan variasi metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan variasi profil kekasaran permukaan (*surface profile*) yang berbeda untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap adhesi *coating* melalui mekanisme *mechanical interlocking* [7][9].

Tabel 3. Parameter Kontrol Berdasarkan NORSOK M-501

No	Parameter	Batas Kelulusan (NORSOK M-501)	Fungsi / Manfaat
1	<i>Dry Bulb</i> (DB)	Dicatat	Menunjukkan suhu udara lingkungan saat proses aplikasi <i>coating</i> . Nilai ini digunakan sebagai acuan dasar dalam menentukan kondisi lingkungan kerja dan mempengaruhi proses pengeringan (<i>curing</i>) <i>coating</i> .
2	<i>Wet Bulb</i> (WB)	Dicatat	Digunakan bersama nilai <i>Dry Bulb</i> untuk menghitung kelembapan relatif (RH). Parameter ini membantu dalam evaluasi kondisi udara sebelum aplikasi <i>coating</i> dilakukan.
3	Relative Humidity (RH)	$\leq 85\%$	Mengontrol tingkat kelembapan udara. RH yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kegagalan <i>coating</i> seperti terbentuknya gelembung (<i>blistering</i>) dan menurunnya daya lekat.
4	<i>Dew Point</i> (DP)	Sebagai acuan kondisi	Menunjukkan suhu di mana uap air mulai mengembun menjadi air. Parameter ini penting untuk memastikan tidak terjadi kondensasi pada permukaan baja saat <i>coating</i> diaplikasikan.
5	<i>Steel Temperature</i>	$\geq 3^{\circ}\text{C}$ di atas DP	Memastikan suhu permukaan baja cukup tinggi untuk mencegah terbentuknya embun. Jika suhu terlalu dekat dengan <i>dew point</i> , maka risiko kegagalan adhesi <i>coating</i> meningkat.

No	Parameter	Batas Kelulusan (NORSOK M-501)	Fungsi / Manfaat
6	<i>Salt Contamination</i>	$\leq 20 \text{ mg/m}^2$	Mengontrol kandungan garam pada permukaan baja. Kandungan garam yang tinggi dapat menyebabkan korosi di bawah lapisan <i>coating</i> (<i>underfilm corrosion</i>) dan menurunkan umur layan <i>coating</i> .
7	<i>Surface Profile</i>	25-85 μm	Menentukan tingkat kekasaran permukaan hasil <i>blasting</i> . Kekasaran permukaan tersebut berperan dalam membentuk <i>mechanical interlocking</i> yang mendukung adhesi <i>coating</i> pada substrat.
8	<i>Adhesion (Pull-off Test)</i>	$\geq 5 \text{ MPa}$	Mengukur kekuatan daya lekat <i>coating</i> terhadap substrat. Nilai ini digunakan sebagai indikator utama keberhasilan sistem pelapisan sesuai standar NORSOK.
9	Kebersihan Permukaan	Bebas kontaminan	Memastikan permukaan bebas dari minyak, debu, dan kotoran sebelum <i>coating</i> diaplikasikan, sehingga <i>coating</i> dapat menempel secara optimal.

2.5.2 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan *surface profile gauge* dengan bantuan *replica tape* untuk menentukan karakteristik profil permukaan hasil *blasting*.

2.5.3 Aplikasi Sistem *Coating*

Spesimen dilapisi menggunakan sistem *coating* dua lapis (*two-coat system*) yang terdiri dari *epoxy primer* dan *polyurethane topcoat*. Sistem ini mengacu pada prinsip perlindungan korosi berdasarkan ISO 12944-5. *Epoxy primer* digunakan karena memiliki kemampuan adhesi yang baik terhadap substrat galvanis, sedangkan *polyurethane topcoat* digunakan karena memiliki ketahanan terhadap radiasi ultraviolet dan lingkungan korosif. Ketebalan lapisan disesuaikan dengan kategori lingkungan C3 hingga C4 berdasarkan ISO 12944-2 [4].

Tabel 4. Klasifikasi Lingkungan Korosi ISO 12944

Kategori	Tingkat Korosi	Lingkungan Umum	Contoh Lokasi Nyata	Karakteristik
C3	<i>Medium</i>	Perkotaan & industri ringan	Kawasan industri ringan di Batam (area jauh dari pantai seperti kawasan industri Muka Kuning), Area kampus / <i>workshop</i> teknik, Pabrik <i>manufaktur indoor-outdoor</i>	Kelembapan sedang-tinggi, polusi industri, paparan garam rendah-sedang
C4	<i>High</i>	Pesisir & industri berat	Area pelabuhan di Batam, Galangan kapal (<i>shipyard</i>), Area <i>jetty</i> / pelabuhan, Struktur baja dekat pantai, <i>Offshore support yard</i> (dekat laut bukan di laut)	Kelembapan tinggi, kadar garam tinggi, atmosfer sangat korosif

Tabel 5. Spesifikasi Sistem *Coating* ISO 12944

Parameter	C3 (<i>Medium</i>)	C4 (<i>High</i>)
Jenis Sistem <i>Coating</i>	<i>Epoxy + Polyurethane</i>	<i>Epoxy + Polyurethane</i>
Jumlah Lapisan	2 lapis	2 lapis
Primer (<i>Epoxy</i>)	60–80 μm	70–100 μm
Topcoat (<i>Polyurethane</i>)	60–80 μm	70–100 μm
Total DFT	$\pm 120\text{--}160 \mu\text{m}$	$\pm 120\text{--}200 \mu\text{m}$
Fungsi Primer	Adhesi & <i>barrier</i>	Adhesi & <i>barrier</i>
Fungsi <i>Topcoat</i>	UV <i>protection</i>	UV + <i>chemical resistance</i>

2.5.4 Pengukuran Ketebalan *Coating*

Setelah proses aplikasi *coating* selesai, dilakukan pengukuran ketebalan lapisan menggunakan *coating thickness gauge* untuk memastikan nilai *Dry Film Thickness* (DFT) sesuai dengan spesifikasi sistem *coating* berdasarkan ISO 12944-5 [5].

2.5.5 Pengujian Adhesi

Pengujian adhesi dilakukan menggunakan metode *pull-off test* berdasarkan standar ASTM D4541 dan ISO 4624 [10][11]. Pengujian dilakukan dengan memberikan gaya tarik tegak lurus terhadap permukaan *coating* menggunakan *dolly* hingga terjadi kegagalan. Nilai gaya tarik maksimum dinyatakan dalam satuan MPa dan digunakan untuk mengevaluasi kekuatan adhesi sistem *duplex coating* terhadap substrat galvanis. Evaluasi hasil pengujian tidak hanya didasarkan pada nilai adhesi maksimum, tetapi juga mempertimbangkan jenis kegagalan (*failure mode*) yang terjadi setelah pengujian untuk mengidentifikasi lokasi kegagalan pada sistem *coating*. Jenis kegagalan yang umum dijumpai meliputi *adhesive failure*, *cohesive failure*, dan *glue failure*. *Adhesive failure* terjadi pada antarmuka antar lapisan *coating* atau antara *coating* dan substrat, yang menunjukkan terlepasnya ikatan adhesi pada bidang antarmuka. *Cohesive failure* terjadi di dalam lapisan *coating*, yang menunjukkan bahwa ikatan pada antarmuka lebih kuat dibandingkan kekuatan internal lapisan yang mengalami kegagalan. Sementara itu, *glue failure* terjadi pada lapisan perekat (*glue*) antara *dolly* dan permukaan *coating*, sehingga hasil pengujian tidak sepenuhnya merepresentasikan kekuatan adhesi sistem *coating* yang sebenarnya. Perekat yang digunakan untuk melekatkan *dolly* pada permukaan *coating* adalah Araldite Standard, yaitu perekat *epoxy* dua komponen (*two-component epoxy adhesive*) yang terdiri atas resin dan *hardener*. Perekat ini digunakan untuk menghasilkan ikatan antara *dolly* dan permukaan *coating* selama proses pengujian *pull-off*. Penggunaan perekat perlu diperhatikan dalam evaluasi *failure mode*, karena kegagalan pada lapisan perekat dapat menghasilkan *glue failure* yang berbeda dengan kegagalan pada lapisan *coating* maupun antarmuka *coating*.

2.6 Parameter Penelitian

Parameter penelitian terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas pada penelitian ini adalah metode persiapan permukaan, yaitu *non blasting*, *sweep blasting*, dan *grit blasting*. Variabel terikat berupa nilai kekuatan adhesi *coating* yang diperoleh dari hasil pengujian *pull-off test*. Selain nilai adhesi, parameter evaluasi juga mencakup identifikasi jenis kegagalan (*failure mode*) yang terjadi setelah pengujian. Variabel kontrol meliputi jenis material ASTM A36, ketebalan lapisan galvanis, sistem *coating* berupa *epoxy primer* dan *polyurethane topcoat*, ketebalan *coating*, metode aplikasi *coating*, kondisi lingkungan saat aplikasi, serta metode pengujian adhesi berdasarkan ASTM D4541 dan ISO 4624 sehingga hasil penelitian dapat diperoleh secara konsisten dan dapat dibandingkan secara objektif.

2.7 Metode Pengambilan dan Analisis Data

Data penelitian diperoleh dari hasil pengujian *pull-off adhesion test* pada setiap variasi metode persiapan permukaan. Pengujian dilakukan pada tiga titik pengukuran pada setiap spesimen untuk memperoleh nilai adhesi yang representatif. Analisis data dilakukan dengan membandingkan nilai kekuatan adhesi pada masing-masing metode persiapan permukaan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan terhadap performa adhesi sistem *duplex coating*. Selain nilai adhesi, analisis juga dilakukan terhadap jenis kegagalan (*failure mode*) yang terjadi selama pengujian untuk mengidentifikasi karakteristik ikatan antara lapisan *coating* dan substrat galvanis. Hasil pengujian selanjutnya dievaluasi berdasarkan kriteria performa adhesi pada standar

NORSOK M-501 dengan nilai adhesi minimum sebesar 5 MPa [6].

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan

Tabel 6. Pengukuran *Surface Profile*

Spesimen	Metode Persiapan Permukaan	Kekasaran (μm)
NB-1	<i>Non Blasting</i>	4
NB-2	<i>Non Blasting</i>	5
SB-1	<i>Sweep Blasting</i>	40
SB-2	<i>Sweep Blasting</i>	38
GB-1	<i>Grit Blasting</i>	64
GB-2	<i>Grit Blasting</i>	62

Berdasarkan Tabel 6, metode *grit blasting* menghasilkan nilai kekasaran permukaan tertinggi, diikuti oleh *sweep blasting*, sedangkan metode *non blasting* menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah. Perbedaan nilai kekasaran tersebut menunjukkan bahwa setiap metode persiapan permukaan menghasilkan profil permukaan yang berbeda sehingga memengaruhi kekuatan daya lekat (*adhesion strength*) sistem *duplex coating*.

3.2 Hasil Pengukuran *Dry Film Thickness (DFT)*

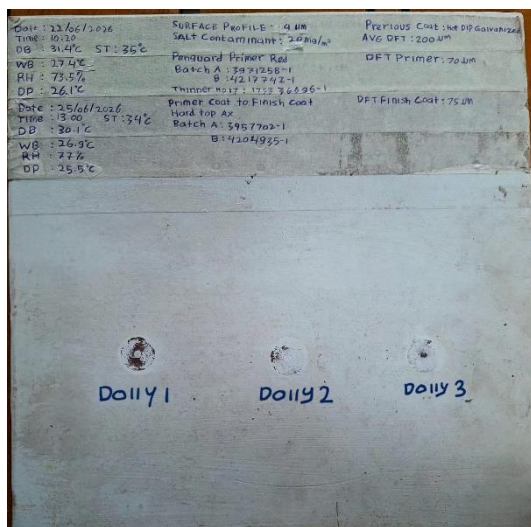
Tabel 7. Hasil Pengukuran DFT

Spesimen	Primer (μm)	Topcoat (μm)	Total DFT (μm)
NB-1	70	75	145
NB-2	70	72	142
SB-1	75	75	150
SB-2	72	76	148
GB-1	68	78	146
GB-2	70	75	145

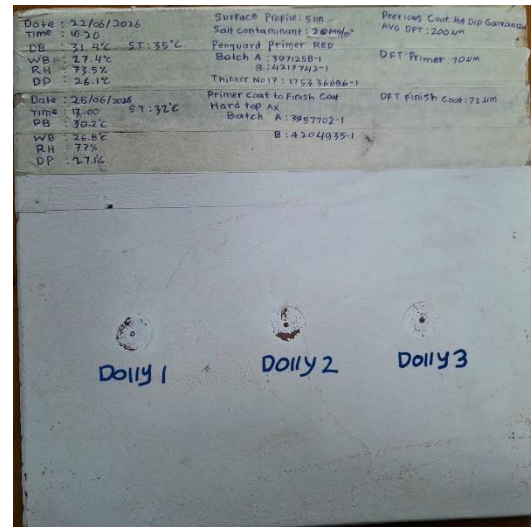
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketebalan lapisan *coating* pada seluruh spesimen berada pada rentang 140–150 μm sesuai spesifikasi sistem *coating* yang digunakan. Dengan demikian, variasi nilai adhesi yang diperoleh tidak dipengaruhi oleh ketebalan *coating*, melainkan oleh perbedaan metode persiapan permukaan yang diterapkan pada setiap spesimen.

3.3 Dokumentasi Spesimen dan Verifikasi Parameter NORSOK M-501

3.3.1 *Plate Non Blasting*



NB-1



NB-2

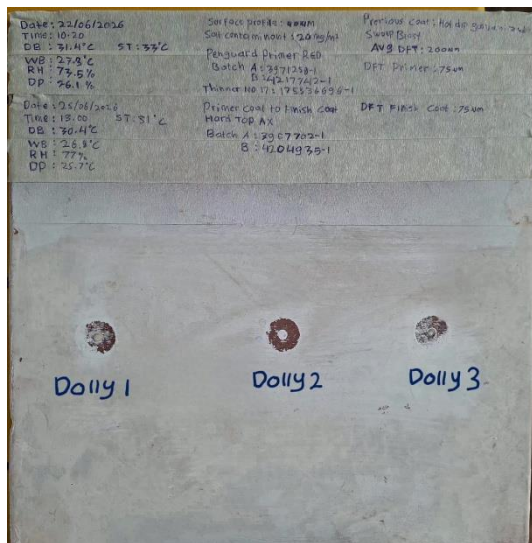
Gambar 2. Plate Non Blast

Gambar 2 menunjukkan dokumentasi spesimen dengan metode persiapan permukaan *non blasting*. Berdasarkan hasil verifikasi parameter sebelum proses pelapisan, parameter kondisi lingkungan yang meliputi *dry bulb* (DB), *wet bulb* (WB), *relative humidity* (RH), *dew point* (DP), *steel temperature* (ST), dan *salt contamination* telah memenuhi persyaratan NORSOK M-501. Namun, nilai *surface profile* pada spesimen NB-1 dan NB-2 berada di bawah nilai yang dipersyaratkan. Kondisi *non blasting* digunakan sebagai variasi pembandingan untuk mengetahui pengaruh peningkatan profil permukaan terhadap kekuatan adhesi, sehingga spesimen NB tidak dimaksudkan sebagai kondisi persiapan permukaan yang sepenuhnya memenuhi persyaratan *surface profile* NORSOK M-501. Hasil pengukuran dan status kesesuaian masing-masing parameter pada spesimen NB-1 dan NB-2 dapat dilihat pada Tabel 8.

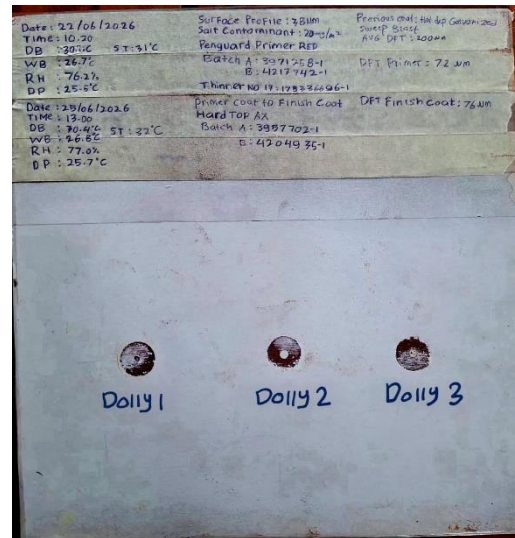
Tabel 8. Hasil Pengukuran dan Verifikasi Parameter Aplikasi Coating Berdasarkan NORSOK M-501

Parameter	NB-1	NB-2	Persyaratan NORSOK M-501	Status
DB	30,75 °C	30,8 °C	Sesuai	✓
WB	27,15	27,1	Sesuai	✓
RH	75,25%	75,25%	≤ 85 %	✓
DP	25,8	26,6	Acuan	✓
ST	34,5	33,5	ST ≥ DP + 3°C	✓
Salt Contamination	20	20	≤ 20 mg/m ²	✓
Surface Profile	4	5	Tidak	x

3.3.2 Plate Sweep Blasting



SB-1



SB-2

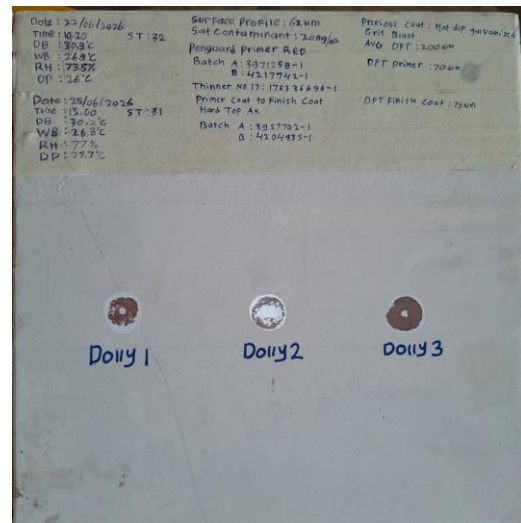
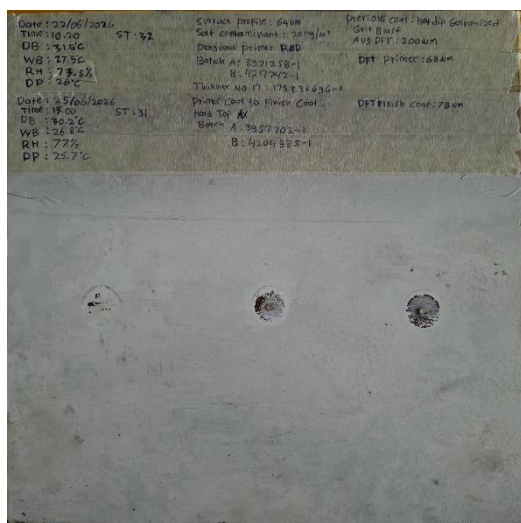
Gambar 3. Plate Sweep Blast

Gambar 3 menunjukkan dokumentasi spesimen dengan metode persiapan permukaan *sweep blasting*. Berdasarkan hasil verifikasi, parameter kondisi lingkungan, *salt contamination*, dan *surface profile* pada spesimen SB-1 dan SB-2 telah memenuhi persyaratan NORSOK M-501. Nilai *surface profile* masing-masing sebesar 40 µm dan 38 µm. Hasil pengukuran dan status kesesuaian masing-masing parameter pada spesimen SB-1 dan SB-2 dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Pengukuran dan Verifikasi Parameter Aplikasi Coating Berdasarkan NORSOK M-501

Parameter	SB-1	SB-2	Persyaratan NORSOK M-501	Status
DB	30,9 °C	30,3 °C	Sesuai	✓
WB	27,05	26,75	Sesuai	✓
RH	75,25%	76,60%	≤ 85 %	✓
DP	25,9	25,5	Acuan	✓
ST	32	31,5	ST ≥ DP + 3°C	✓
Salt Contamination	20	20	≤ 20 mg/m²	✓
Surface Profile	40	38	Sesuai	✓

3.3.3 Plate Grit Blasting



GB-1

GB-2

Gambar 4. Plate Grit Blast

Gambar 4 menunjukkan dokumentasi spesimen dengan metode persiapan permukaan *grit blasting*. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa seluruh parameter aplikasi, meliputi kondisi lingkungan, *salt contamination*, dan *surface profile*, telah memenuhi persyaratan NORSOK M-501. Nilai *surface profile* sebesar 64 μm dan 62 μm merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Hasil pengukuran dan status kesesuaian masing-masing parameter pada spesimen GB-1 dan GB-2 dapat dilihat pada Tabel 10

Tabel 10. Hasil Pengukuran dan Verifikasi Parameter Aplikasi Coating Berdasarkan NORSOK M-501

Parameter	GB-1	GB-2	Persyaratan NORSOK M-501	Status
DB	30,85 °C	30,25 °C	Sesuai	✓
WB	27,15	26,85	Sesuai	✓
RH	75,25%	75,25%	$\leq 85 \%$	✓
DP	25,85	25,85	Acuan	✓
ST	31,5	31,5	$ST \geq DP + 3^{\circ}\text{C}$	✓
<i>Salt Contamination</i>	20	20	$\leq 20 \text{ mg/m}^2$	✓
<i>Surface Profile</i>	64	62	Sesuai	✓

3.4 Hasil Pengujian Pull-Off Test

Tabel 11. Hasil Pengujian Adhesi

Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata (MPa)
NB-1	7	6.5	5.5	6.3
NB-2	8	7.5	7	7.5
SB-1	14	11	10	11.6
SB-2	11	10	11	10.6
GB-1	13	14	15	14
GB-2	13.5	12	14.5	13.3

Berdasarkan hasil pengujian *pull-off test*, seluruh spesimen menunjukkan nilai adhesi di atas persyaratan minimum standar NORSOK M-501 sebesar 5 MPa. Secara umum, peningkatan nilai adhesi terlihat dari metode *non blasting*, *sweep blasting*, hingga *grit blasting*. Untuk memberikan gambaran kondisi hasil pengujian pada setiap metode persiapan permukaan, dokumentasi hasil *pull-off test* ditampilkan pada Gambar 5 sampai Gambar 7.

3.4.1 *pull-off* pada spesimen *non blasting* NB-1 dan NB-2.



NB-1, Dolly 1 (7 MPa)



NB-1, Dolly 2 (6.5 MPa)



NB-1, Dolly 3 (5.5 MPa)



NB-2, Dolly 1 (8 MPa)



NB-2, Dolly 2 (7.5 MPa)



NB-2, Dolly 3 (7 MPa)

Gambar 5. Non Blasting

Berdasarkan Gambar 5, hasil pengujian *pull-off* pada spesimen *non blasting* menunjukkan nilai adhesi berkisar antara 5,5 hingga 8 MPa. Nilai adhesi pada spesimen NB-1 diperoleh sebesar 7 MPa, 6,5 MPa, dan 5,5 MPa, sedangkan pada spesimen NB-2 diperoleh sebesar 8 MPa, 7,5 MPa, dan 7 MPa. Seluruh hasil pengujian telah memenuhi persyaratan minimum adhesi berdasarkan standar NORSOK M-501, yaitu sebesar 5 MPa. Meskipun demikian, metode *non blasting* menghasilkan nilai adhesi paling rendah dibandingkan metode *sweep blasting* dan *grit blasting*. Hal ini menunjukkan bahwa permukaan tanpa perlakuan *blasting* menghasilkan profil kekasaran yang lebih rendah sehingga ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) antara *coating* dan substrat galvanis belum terbentuk secara optimal.

3.4.2 Pull-Off Test Sweep Blasting SB-1 dan SB-2



SB-1, Dolly 1 (14 MPa)



SB-1, Dolly 2 (11 MPa)



SB-1, Dolly 3 (10 MPa)



SB-2, Dolly 1 (11 MPa)



SB-2, Dolly 2 (10 MPa)



SB-2, Dolly 3 (11 MPa)

Gambar 6. Sweep Blasting

Berdasarkan Gambar 6, hasil pengujian *pull-off* pada spesimen *sweep blasting* menunjukkan nilai adhesi berkisar antara 10 hingga 14 MPa. Nilai adhesi pada spesimen SB-1 diperoleh sebesar 14 MPa, 11 MPa, dan 10 MPa, sedangkan pada spesimen SB-2 diperoleh sebesar 11 MPa, 10 MPa, dan 11 MPa. Seluruh hasil pengujian telah memenuhi persyaratan minimum standar NORSOK M-501. Dibandingkan metode *non blasting*, *sweep blasting* menghasilkan peningkatan nilai adhesi yang menunjukkan bahwa proses *sweep blasting* mampu membentuk profil kekasaran permukaan yang lebih baik sehingga meningkatkan ikatan

mekanis antara *coating* dan substrat galvanis.

3.4.3 Pull-Off Test Grit Blasting GB-1 dan GB-2.



GB-1, Dolly 1 (13. MPa)



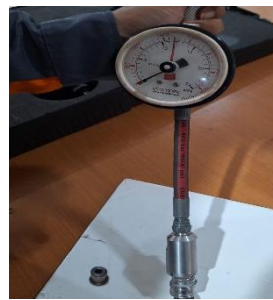
GB-1, Dolly 2 (14 MPa)



GB-1, Dolly 3 (15 MPa)



GB-2, Dolly 1 (13.5 MPa)



GB-2, Dolly 2 (12 MPa)



GB-2, Dolly 3 (14.5 MPa)

Gambar 7. Grit Blast

Berdasarkan Gambar 7, hasil pengujian *pull-off* pada spesimen *grit blasting* menunjukkan nilai adhesi tertinggi dengan rentang 12 hingga 15 MPa. Nilai adhesi pada spesimen GB-1 diperoleh sebesar 13 MPa, 14 MPa, dan 15 MPa, sedangkan pada spesimen GB-2 diperoleh sebesar 13,5 MPa, 12 MPa, dan 14,5 MPa. Seluruh hasil pengujian memenuhi persyaratan minimum standar NORSOK M-501. Nilai adhesi yang lebih tinggi dibandingkan metode persiapan permukaan lainnya menunjukkan bahwa *grit blasting* menghasilkan profil kekasaran permukaan yang paling efektif dalam meningkatkan *mechanical interlocking* sehingga menghasilkan ikatan *coating* yang lebih kuat terhadap substrat galvanis.

3.5 Analisis *Failure Mode* Hasil Pengujian *Pull-Off*

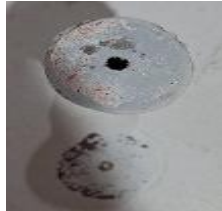
Identifikasi *failure mode* dilakukan berdasarkan hasil pengamatan visual pada seluruh titik pengujian *pull-off test*. Klasifikasi jenis kegagalan mengacu pada ASTM D4541 dan ISO 4624 menggunakan kode identifikasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 12. Pembahasan pada subbab ini difokuskan pada kecenderungan jenis kegagalan yang dominan pada masing-masing metode persiapan permukaan, untuk melihat gambar kegagalan secara keseluruhan bisa dilihat pada gambar 2-4, sedangkan gambar yang ditampilkan di bawah merupakan contoh representatif dari hasil pengujian.

Tabel 12. Kode identifikasi *failure*

Kode	Keterangan
A	Substrat (Baja Galvanis)
B	Base coat (epoxy primer)
C	Topcoat (polyurethane)
Y	Glue
B/C	Adhesive failure pada antarmuka base coat dan topcoat

Kode	Keterangan
C/Y	Glue failure pada antarmuka topcoat dan perekat (adhesive) dolly

3.5.1 Failure Mode Non Blasting



NB-2, dolly 1



NB-2, dolly 2



NB-1, dolly 3

Gambar 8. Failure Non Blast

Hasil identifikasi *failure mode* pada spesimen *non blasting* menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh *cohesive failure* pada lapisan *topcoat* (C) salah satu contohnya pada gambar NB-1 dolly 3. Selain itu, juga ditemukan *cohesive failure* pada lapisan primer (B) seperti pada gambar NB-2 dolly 2, meskipun dengan kecenderungan yang lebih rendah dibandingkan lapisan *topcoat*. *Adhesive failure* pada antarmuka primer–*topcoat* (B/C) masih cukup sering teridentifikasi pada beberapa titik pengujian seperti salah satu contoh pada gambar NB-2 dolly 1. Pada salah satu titik pengujian juga ditemukan *glue failure* pada antar muka *topcoat*–*glue* (C/Y) seperti pada gambar di atas NB-2 dolly 1, namun hanya terjadi secara lokal dan tidak mewakili keseluruhan hasil pengujian. Secara umum, *failure mode* pada spesimen *non blasting* menunjukkan bahwa kegagalan lebih banyak terjadi di dalam lapisan *coating* dibandingkan pada antarmuka antar lapisan.

3.5.2 Failure Mode Sweep Blast



SB-2, dolly 2



SB-1, dolly 2

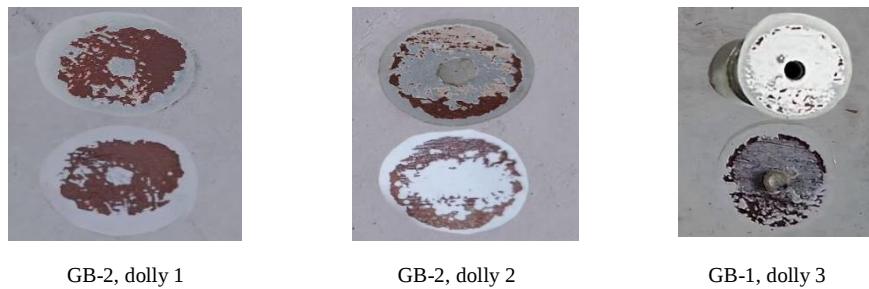


SB-2, dolly 1

Gambar 9. Failure Sweep Blasting

Hasil identifikasi *failure mode* pada spesimen *sweep blasting* menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh *cohesive failure* pada lapisan primer (B) seperti salah satu contoh pada gambar SB-1 dolly 2, diikuti oleh *cohesive failure* pada lapisan *topcoat* (C) seperti contoh pada gambar SB-2 dolly 1. Selain itu, masih ditemukan *adhesive failure* pada antarmuka primer–*topcoat* (B/C) pada beberapa titik pengujian seperti pada gambar SB-2 dolly 2. Selama pengujian tidak ditemukan *glue failure*, sehingga kegagalan yang terjadi didominasi oleh lapisan *coating* dan antar muka lapisan *coating*. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa metode *sweep blasting* mampu menghasilkan kualitas ikatan *coating* yang lebih baik dibandingkan metode *non blasting*.

3.5.3 Failure Mode Grit Blast



Gambar 10. Failure Grit Blasting

Hasil identifikasi *failure mode* pada spesimen *grit blasting* menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh *cohesive failure* pada lapisan *topcoat* (C) dan (B) seperti salah satu contoh pada gambar GB-2 dolly 2, indikasi *cohesive failure* terlihat jelas pada lapisan primer (B) salah satu contohnya pada gambar GB-2 dolly 1. *Adhesive failure* pada antarmuka primer-*topcoat* (B/C) masih ditemukan pada beberapa titik pengujian seperti contoh pada gambar GB-1 dolly 3, namun dengan kecenderungan yang paling rendah dibandingkan metode persiapan permukaan lainnya. Selain itu, selama pengujian tidak ditemukan *glue failure*. Secara umum, dominasi *cohesive failure* serta rendahnya *adhesive failure* menunjukkan bahwa metode *grit blasting* menghasilkan kualitas ikatan *coating* yang paling optimal, yang sejalan dengan hasil *pull-off test* yang memberikan nilai adhesi rata-rata tertinggi di antara seluruh variasi metode persiapan permukaan.

3.6 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian, metode persiapan permukaan berpengaruh terhadap kekuatan daya lekat (*adhesion strength*) sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis ASTM A36. Metode *grit blasting* menghasilkan nilai kekasaran permukaan tertinggi sebesar 62–64 μm , diikuti *sweep blasting* sebesar 38–40 μm , sedangkan metode *non blasting* menghasilkan kekasaran permukaan terendah sebesar 4–5 μm . Perbedaan profil kekasaran tersebut memengaruhi mekanisme *mechanical interlocking* antara *coating* dan substrat galvanis sehingga berpengaruh terhadap nilai adhesi [7].

Hasil pengukuran *Dry Film Thickness* (DFT) menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki ketebalan *coating* pada rentang 140–150 μm , sehingga perbedaan nilai adhesi yang diperoleh lebih dipengaruhi oleh metode persiapan permukaan dibandingkan ketebalan *coating*. Seluruh spesimen juga memenuhi persyaratan minimum kekuatan adhesi sebesar 5 MPa sesuai standar NORSOK M-501 [6]. Nilai adhesi tertinggi diperoleh pada metode *grit blasting* (13,3–14,0 MPa), diikuti *sweep blasting* (10,6–11,6 MPa) dan *non blasting* (6,3–7,5 MPa). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan berkontribusi terhadap peningkatan kualitas ikatan *coating* terhadap substrat galvanis.

Hasil identifikasi *failure mode* menunjukkan bahwa spesimen *grit blasting* didominasi oleh *cohesive failure*, sedangkan *adhesive failure* lebih banyak ditemukan pada spesimen *non blasting*. Selain itu, *glue failure* hanya teridentifikasi pada salah satu titik pengujian spesimen *non blasting*. Secara keseluruhan, hasil *failure mode* mendukung hasil *pull-off test*, sehingga dapat disimpulkan bahwa metode *grit blasting* memberikan performa adhesi terbaik pada sistem *duplex coating*.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode persiapan permukaan

berpengaruh terhadap kekuatan daya lekat (*adhesion strength*) sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis ASTM A36. Metode *grit blasting* menghasilkan nilai adhesi tertinggi, diikuti oleh *sweep blasting*, sedangkan metode *non blasting* menghasilkan nilai adhesi terendah. Seluruh spesimen memenuhi persyaratan minimum kekuatan adhesi sebesar 5 MPa sesuai standar NORSOK M-501. Hasil identifikasi *failure mode* menunjukkan bahwa spesimen *blasting* didominasi oleh *cohesive failure* terutama *grit blasting* karena paling sedikit terindikasi *adhesive failure*, sedangkan *non blasting* menunjukkan kecenderungan *adhesive failure* yang lebih tinggi. Dengan demikian, metode *grit blasting* dapat direkomendasikan sebagai metode persiapan permukaan yang paling efektif dalam meningkatkan daya lekat sistem *duplex coating* pada baja karbon galvanis.

5 Daftar Pustaka

- [1] R. W. Revie, *CORROSION AND An Introduction to Corrosion Science and Engineering FOURTH EDITION*.
- [2] J. F. M. van Eijnsbergen, "Duplex systems," *Met. Finish.*, vol. 93, no. 4, p. 8, 1995, doi: 10.1016/0026-0576(95)94303-x.
- [3] A. T. Agriculturae, J. Lozrt, J. Votava, and R. Šmak, "DUPLEX ANTI-CORROSION PROTECTION OF STEEL USING A COMBINATION OF HOT-DIP GALVANISING AND WATER-SOLUBLE PAINTS," vol. 3, pp. 129–135, 2021, doi: 10.2478/ata-2021-0022.
- [4] D. Knotkova and K. Kreislova, *Corrosivity of atmospheres – derivation and use of information*, vol. 28. 2007. doi: 10.2495/978-1-84564-032-3/03.
- [5] E. Zrt, E. Zrt, and I. S. O. S. Order, "INTERNATIONAL STANDARD protection of steel structures by," vol. 2018, 2018.
- [6] T. Norsok, T. Federation, N. Industry, T. Federation, and N. Industry, "NORSOK STANDARD Surface preparation and protective coating," no. February, 2012.
- [7] S. G. Croll, "Progress in Organic Coatings Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection : A review," vol. 148, no. April, 2020.
- [8] B. Abeln, T. Pinger, C. Richter, and M. Feldmann, "Adhesion of batch hot - dip galvanized components," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 5197–5209, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11045-5.
- [9] G. Steel, S. Steels, and N. Metals, "SSPC : The Society for Protective Coatings SURFACE PREPARATION STANDARD," 2020.
- [10] S. T. Method, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion," pp. 1–18, 2018, doi: 10.1520/D4541-17.2.
- [11] E. Limited and U. Kingdom, "Sspe 2015," 2015.