

Analisis Ketebalan Dan Kekuatan Adhesi *Coating* Pada Struktur Baja *Offshore* Menggunakan Metode *Dry Film Thickness* Dan *Pull-Off Test*

Obed Septian*, Ita Wijayanti.* dan Muhammad Irsyad Saihilmi.*

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: batam362is@email.com

Abstrak

Struktur baja *offshore* memerlukan sistem *coating* yang memenuhi standar ketebalan dan kekuatan adhesi agar mampu memberikan perlindungan terhadap lingkungan laut yang korosif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketebalan *coating* menggunakan metode *Dry Film Thickness* (DFT) dan kekuatan adhesi menggunakan *Pull-Off Test* pada baja ASTM SA516 Grade 65N. Penelitian diawali dengan *surface preparation* yang meliputi proses abrasive blasting dengan kebersihan Sa 2½ atau SSPC-SP-10/NACE no 2, disertai kebersihan permukaan, kekasaran permukaan, kandungan garam, serta kondisi lingkungan sebelum aplikasi *coating*. Sistem *coating* yang digunakan terdiri dari *primer coat*, *intermediate coat*, dan *top coat* berbasis *epoxy* dan *polyurethane*. Ketebalan lapisan diukur menggunakan *Wet Film Thickness* dengan metode ASTM D4414, sedangkan ketebalan lapisan kering diukur menggunakan *Dry Film Thickness* dengan metode ASTM D7091 dengan penentuan ketebalan lapisan *coating* mengacu pada ISO 2808. Pengujian kekuatan adhesi menggunakan *Pull-Off Test* dengan metode D4541, dengan prinsip pengujian ISO 4624 setelah *coating* mencapai kondisi full cure selama ± 7 hari. Hasil penelitian ketebalan *coating* menunjukkan rata-rata *primer coat* sebesar 127 μm , *intermediate coat* sebesar 176,55 μm , dan *top coat* sebesar 54 μm . Hasil *Pull-Off Test* menunjukkan nilai adhesi rata-rata sebesar 12,41 MPa. Berdasarkan hasil analisis, ketebalan *coating* dan kekuatan adhesi telah memenuhi spesifikasi *Technical Data Sheet*, *Inspection Test Plan* (ITP) perusahaan, serta standar pengujian yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *coating* yang diaplikasikan pada baja ASTM SA516 Grade 65N memenuhi persyaratan inspeksi dan memiliki kualitas *coating* yang baik.

Kata kunci: ASTM SA516 Grade 65N, *Coating*, *Dry Film Thickness* (DFT), *Pull-Off Test*, *Surface Preparation*, Adhesi, *Technical Data Sheet* (TDS), *Inspection Test Plan* (ITP) perusahaan.

Abstract

Offshore steel structures require a coating system that meets the thickness and adhesion strength standards to provide protection against corrosive marine environments. This study aims to analyze the coating thickness using the Dry Film Thickness (DFT) method and the adhesion strength using the Pull-Off Test on ASTM SA516 Grade 65N steel. The study began with surface preparation which includes an abrasive blasting process with a cleanliness of Sa 2½ or SSPC-SP-10/NACE no. 2, accompanied by surface cleanliness, surface roughness, salt content, and environmental conditions before coating application. The coating system used consists of a primer coat, intermediate coat, and epoxy and polyurethane-based top coat. The coating thickness was measured using the Wet Film Thickness with the ASTM D4414 method, while the dry layer thickness was measured using the Dry Film Thickness with the ASTM D7091 method

with the determination of the coating layer thickness referring to ISO 2808. The adhesion strength test used the Pull-Off Test with the D4541 method, with the ISO 4624 testing principle after the coating reached a full cure condition for ± 7 days. The results of the coating thickness study showed an average primer coat of 127 μm , an intermediate coat of 176.55 μm , and a top coat of 54 μm . The Pull-Off Test results showed an average adhesion value of 12.41 MPa. Based on the analysis results, the coating thickness and adhesion strength have met the specifications of the company's Technical Data Sheet, Inspection Test Plan (ITP), and the testing standards used. The results showed that the coating system applied to ASTM SA516 Grade 65N steel met the inspection requirements and had good coating quality.

Keywords : ASTM SA516 Grade 65N, Coating, Dry Film Thickness (DFT), Pull-Off Test, Surface Preparation, Adhesion, Technical Data Sheet (TDS), Inspection Test Plan (ITP) .

1 Pendahuluan

Dalam industri *offshore*, material paling umum digunakan adalah baja ASTM SA516 Grade 65N. Lalu baja ASTM SA516 Grade 65N rentan terhadap korosi, terutama di lingkungan laut yang memiliki korosivitas tinggi akibat paparan air laut yang mengandung ion klorida, kelembapan, serta siklus basah-kering. Oleh karena itu, diperlukan sistem *coating* untuk melindungi baja dari lingkungan korosif [1]. Selain itu, temperatur juga dapat berpengaruh signifikan terhadap laju korosi di lingkungan laut [2].

Salah satu metode perlindungan baja ASTM SA516 Grade 65N adalah melalui sistem *coating*. Sistem *coating* pada struktur baja *offshore* terdiri dari beberapa pelapisan, yaitu *primer*, *intermediate coat*, dan *top coat* dengan jenis *coating* berbasis *epoxy* dan *polyurethane*. Sistem ini dirancang untuk memberikan perlindungan sebagai penghalang (*barrier protection*) terhadap lingkungan korosif, khususnya di lingkungan laut [3].

Kinerja *coating* sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan dan kekuatan adhesi terhadap permukaan baja. Ketebalan *coating* yang tidak sesuai spesifikasi dapat menurunkan efektivitas perlindungan baja serta memengaruhi kinerja sistem *coating*. Lapisan yang terlalu tipis dapat mengakibatkan kegagalan *coating*, sedangkan lapisan yang terlalu tebal berpotensi menyebabkan retak atau delaminasi yang dapat mengakibatkan kegagalan *coating* [4]. Oleh karena itu, diperlukan standar internasional untuk memastikan kualitas *coating* yang diaplikasikan. Pengukuran ketebalan lapisan *coating* menggunakan metode *Dry Film Thickness* berdasarkan ISO 2808 dengan metode D7091. Dalam proses aplikasi, parameter teknis *coating* mengacu pada *Technical Data Sheet* (TDS) dan hasil pengukuran ketebalan lapisan *coating* berdasarkan *Inspection Test Plan* (ITP) [5]. Setelah pengukuran ketebalan, dilakukan pengujian kekuatan adhesi lapisan *coating* menggunakan metode *Pull-Off Test* berdasarkan ISO 4624 dengan hasil pengujian dinyatakan dalam satuan MPa. Adapun kriteria penerimaan adhesi *coating* mengacu pada NORSOK M-501, dengan nilai adhesi minimum ≥ 5.00 MPa dinyatakan memenuhi yang direkomendasikan *Inspection Test Plan* dari perusahaan [6], [7].

Selain ketebalan dan kekuatan adhesi, kualitas *coating* juga sangat dipengaruhi oleh kondisi awal permukaan baja dan lingkungan saat proses aplikasi. Parameter seperti tingkat kekasaran permukaan baja, kebersihan dari debu dan kontaminan, serta kandungan garam pada permukaan baja menjadi faktor penting yang menentukan daya lekat *coating*. Permukaan yang tidak memenuhi standar kebersihan atau masih mengandung garam dapat menyebabkan penurunan adhesi.

Selain itu, kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembapan relatif (RH), serta perbedaan temperatur permukaan terhadap titik embun (*dew point*) juga berpengaruh terhadap proses pengeringan *coating*. Oleh karena itu, diperlukan pengukuran terhadap kondisi permukaan dan lingkungan menggunakan metode inspeksi yang mengacu pada standar internasional, seperti ISO 8502-3, ISO 8502-6, dan ISO 8502-09, untuk memastikan kualitas awal sebelum proses *coating* dilakukan [8], [9], [10].

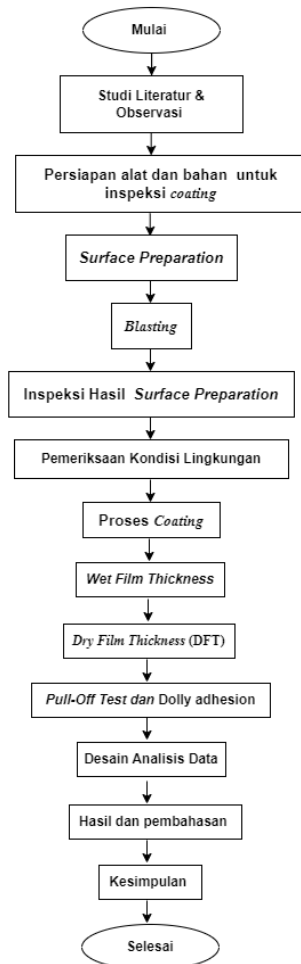
Dalam praktik lapangan, khususnya pada perusahaan galangan Batam yang bergerak di bidang fabrikasi dan perawatan struktur *offshore*, proses aplikasi *coating* biasanya dilakukan dalam kondisi lingkungan yang dinamis. Tingkat kelembapan udara yang tinggi, perubahan cuaca yang cepat, serta tekanan pekerjaan produksi menjadi tantangan dalam menjaga kualitas hasil *coating*. Pada kondisi tersebut, sering ditemukan ketidaksesuaian antara hasil *coating* dengan standar yang ditetapkan. Ketidaksesuaian ini dapat berupa ketebalan *coating* yang tidak sesuai spesifikasi maupun nilai adhesi rendah.

Dampak dari kondisi ini tidak dapat dianggap sepele, karena *coating* tidak memenuhi standar berpotensi kegagalan dini, seperti pengelupasan (*peeling*), retak, hingga penurunan kekuatan adhesi pada material baja. Kegagalan *coating* dapat menyebabkan penurunan kekuatan struktur, peningkatan biaya perawatan, bahkan mengganggu keselamatan operasional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketebalan *coating* menggunakan metode *Dry Film Thickness* (DFT) serta menguji kekuatan adhesi menggunakan *Pull-Off Test* pada material baja karbon berdasarkan ASTM SA516 Grade 65N di lingkungan *offshore*.

2 Metodologi Penelitian

Gambar 2 terdapat tahapan-tahapan proses laporan akhir studi dengan bentuk flowchart untuk menganalisis ketebalan dan kekuatan adhesi coating menggunakan Metode *Dry Film Thickness* (DFT) dan *Pull-Off Test* pada struktur baja.



Gambar 2. Diagram Alur Penelitian.

2.1. Studi literatur dan Observasi .

Studi literatur ini adalah proses pencarian, pengumpulan, dan informasi untuk yang ada dalam karya ilmiah yang terdahulu untuk memahami topik dan masalah yang diteliti. Baja yang diamati adalah baja ASME SA516 Grade 65N. Observasi dilakukan pengamatan atau aktivitas yang dilakukan di daerah galangan PT. XYZ Batam, dengan wawancara langsung supervisor & foreman mengenai terkait prosedur inspeksi ketebalan dan kekuatan adhesi *coating* pada struktur baja. Spesimen ini digunakan untuk menguji ketebalan *coating* dengan *Dry Film Thickness* (DFT) dan kekuatan adhesi dengan metode *Pull-Off Test* untuk baja *offshore* di lingkungan lepas pantai.

2.2 Persiapan alat dan bahan untuk inspeksi *coating*.

Alat yang digunakan untuk inspeksi *coating* ditampilkan pada Tabel 2.2:

Tabel 2.2.

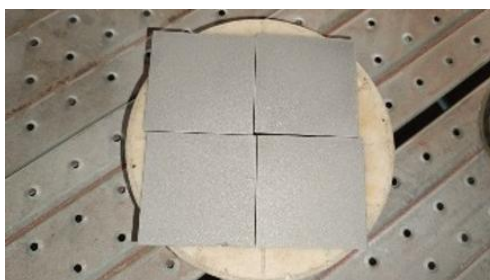
Peralatan Pengujian dan Inspeksi *Coating*.

No	Nama Alat	Fungsi
1.	<i>Digital surface roughness</i>	Mengukur kekasaran permukaan.
2.	<i>Testex Pres-O Film Replica tape</i>	Mengecek kekasaran permukaan pada baja
3.	Elcometer 319 <i>Dew Point Meter</i>	Mengukur temperatur udara, kelembapan relatif (RH), dan kondisi lingkungan.
4.	Elcometer 138 <i>Bresle Patch Kit</i> dan conductivity meter.	Mengukur tingkat kontaminasi garam
5.	<i>Kertas Blotter</i>	Mengecek kualitas udara digunakan saat <i>spray</i> .
6.	<i>Clear tape</i>	Mengukur hasil kebersihan pada permukaan baja
7.	<i>Solvent Cleaning</i>	Melakukan pengecekan garam diarea permukaan baja
8.	<i>Wet Film Thickness (WFT)</i>	Untuk mengukur ketebalan lapisan <i>coating</i> saat cat pelapisan basah.
9.	<i>Dry Film Thickness (DFT) Gauge</i> Elcometer 456	Untuk mengukur ketebalan lapisan pada <i>coating</i> setelah cat kering.
10.	<i>Automatic Pull-off Tester</i> Defelsko PosiTest adhesion dan Elcometer doly adhesion tester berukuran 20 mm.	Mengetahui kekuatan ikatan lapisan <i>coating</i> .

Bahan yang digunakan untuk penelitian berupa baja dengan ASTM SA516 Grade 65N sebagai substrat *coating*. Baja ini termasuk *low carbon pressure vessel steel* dengan komposisi unsur paduan carbon (C), magnan (Mn), phosphorus (P), sulfur (S), dan silicon (Si). Spesimen ini berbentuk kotak berukuran dengan ukuran 6000 × 2000 mm dengan tebal 6-12 mm untuk pengukuran *Dry Film Thickness*. Selanjutnya, untuk pengujian *Pull-Off Test* menggunakan material yang sama dengan ASTM SA516 Grade 65N yang dipotong menjadi 4 panel uji spesimen baja berbentuk kotak dengan ukuran 150 × 150 mm dengan tebal 6-12 mm. Bentuk spesimen yang digunakan untuk pengujian *dry film thickness* dan *pull-off test* ditunjukkan pada gambar a dan b.



(a) Spesimen Baja ASTM SA516 Grade 65N untuk *Dry Film Thickness*.



(b) Spesimen Baja ASTM SA516 Grade 65N untuk *Pull- Off Test*.

selanjutnya, komposisi kimia baja ASTM SA516 Grade 65 N yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2.

Komposisi kimia Spesimen Baja ASTM SA516 Grade 65N.

Unsur	SA516 Grade 65N (%)
Carbon (C)	0.24
Manganese (Mn)	0.85–1.20
Phosphorus (P)	0.020
Sulfur (S)	0.010
Silicon (Si)	0.15–0.40

Sumber :SSAB, Pressure Vessel Plate ASTM A516 Grade 65.

2.3. Surface Preparation.

Surface preparation bertujuan untuk menghilangkan sisa kontaminan seperti, debu, minyak, dan lain-lain agar meningkatkan daya rekat *coating* dan efektivitas material yang akan diuji. Tahap awal dilakukan proses pembersihan permukaan (*solvent cleaning*) menggunakan International GTA 220 dan International GTA713 sebagai (*solvent cleaner*). International GTA 220 memiliki komposisi yaitu Xylene Mixture of Isomers, solvent naphtha (Petroleum), light aromatic, N-BUTANOL, trimethylbenzene, sedangkan International GTA713 memiliki komposisi yaitu 1-Methoxy-2-propyl acetate, dan Xylene. Proses ini mengacu pada standar SSPC-SP1 untuk membersihkan minyak/grease yang menempel di permukaan baja sebelum proses persiapan sebelum proses persiapan permukaan dan aplikasi *coating* dilakukan.

Selanjutnya pembersihan permukaan dilakukan dengan *Handtool* digunakan dengan *sandpaper* dengan membersihkan dengan manual dengan mengacu standar SSPC-SP-2 untuk menghilangkan kontaminan pada permukaan baja. Setelah itu, dilanjutkan menggunakan *Powertool* digunakan dengan alat gerindra *brush* dengan mengacu standar SSPC-SP-3 untuk membersihkan sisa kontaminan dari sisa semua kontaminan dari permukaan baja.

Tahap berikut dilakukan hasil inspeksi hasil *surface preparation* yang meliputi Pemeriksaan kebersihan permukaan menggunakan (*clear tape*) yang mengacu pada metode ISO 8502-3 sebagai standar acuan untuk memastikan permukaan baja bebas dari debu, Pengukuran kadar garam pada permukaan baja menggunakan (*bresle patch kit*) mengacu pada metode standar ISO 8502-6, serta Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan (*testex pres-o film replica tape*) untuk memastikan profil permukaan sesuai dengan spesifikasi coating menggunakan metode standar acuan ASTM D4417.

2.4. Proses Abrasive Blasting.

Blasting adalah proses pembersihan permukaan baja material (*abrasive*) yang bertekanan digunakan dengan metode standard ASTM D4285 dimana udara yang digunakan tidak boleh terkontaminasi air, minyak atau oli (Blotter Test), kemudian pembersihan dengan peledakan (*Blasting*) dilakukan berdasarkan SSPC-AB 1 untuk mendapatkan profil permukaan Interseal 670 HS 50-75 μm dengan tekanan minimum 90 psi dengan metode standar acuan ASTM D4285. Selanjutnya, media abrasif diperiksa menggunakan ISO 11127-6 untuk menentukan kandungan kontaminan larut air pada media abrasif. Setelah seluruh persyaratan terpenuhi, proses abrasif *blasting* dilakukan menggunakan media abrasif ukuran 30/60 dengan tekanan minimum 90 psi hingga diperoleh tingkat kebersihan permukaan sebelum proses *coating*.

2.5. Inspeksi *Surface Preparation*.

Setelah dilakukan proses blasting, permukaan baja dilakukan pemeriksaan inspeksi *surface preparation* untuk memastikan kesesuaian metode standar sebelum proses *coating*. Pemeriksaan ini meliputi pengecekan kekasaran permukaan baja menggunakan *testex pres-o film replica tape* dengan d4417, kebersihan permukaan bebas dari kontaminasi debu dengan *clear tape* berdasarkan metode ISO 8502-3, serta pengujian menggunakan kandungan garam menggunakan (Elcometer 130) atau conductivity meter. Laporan report dengan metode standar 8502-6 dan 8502-9 dengan batas kandungan garam 20mg/m².

Kriteria penerimaan yang digunakan pada penelitian ini adalah tingkat kebersihan permukaan Sa 2½ sesuai dengan ISO 8501-01/SSPC-SP10, surface profil sebesar 50-75 µm sesuai dengan Interseal 670 HS, tingkat kebersihan debu Dust Rating Class 1 berdasarkan metode ISO 8502-3 untuk menentukan jumlah debu pada permukaan baja, serta kandungan garam maksimum 20 mg/m² berdasarkan spesifikasi perusahaan yang mengacu metode pada ISO 8502-6 dan ISO 8502-9. Apabila seluruh persyaratan tersebut terpenuhi, maka permukaan baja dinyatakan siap untuk proses *coating*.

2.6. Pemeriksaan Kondisi Lingkungan.

Kondisi sebelum proses pengecatan dilakukan kondisi temperatur udara, kelembapan relatif (RH), dan perbedaan temperatur permukaan dengan titik (*dew point*). Pengukuran dilakukan untuk memastikan kondisi lingkungan memenuhi persyaratan aplikasi *coating* berdasarkan *Technical Data Sheet* (TDS) produk *coating* yang digunakan, yaitu *relative humidity* tidak melebihi 85% dan temperatur permukaan baja 3 °C diatas titik embun (*dew point*), sehingga untuk mencegah terbentuk kondensasi permukaan baja yang dapat mempengaruhi proses aplikasi *coating*.

2.7. Proses *Coating*.

Proses *coating* dilakukan dengan tiga lapisan yaitu, *primer coat*, *intermediate coat*, dan *top coat*, yang diaplikasikan secara berurutan untuk memberikan perlindungan terhadap pada permukaan baja. Spesifikasi material *coating* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam tabel 2.7. berikut.

Tabel 2.7.
Spesifikasi Cat.

Parameter	Primer Coat	Intermediate Coat	Top Coat
Brand	Interseal 670 HS Red or Grey	Interseal 670 HS RAL7035 Grey	Interthane 990 RAL 1023 Yellow
Volume	82%	82%	57% ± 3%
Tipe	2-komponen epoxy	2-komponen epoxy	Polyurethane
Colour	Red	Grey	Traffic Yellow
Thinner	International GTA 220	International GTA 220	International GTA713
Metode	Air Spray	Air Spray	Air Spray
Tool	Spray Gun	Spray Gun	Spray Gun

Sumber : Disusun berdasarkan Technical Data Sheet Interseal 670 HS Red or Grey,

Technical Data Sheet Interseal 670 HS RAL7035 Grey, dan Technical Data Sheet Interthane 990 RAL 1023 Yellow.

2.8. *Wet Film Thickness*.

Wet Film Thickness (WFT) merupakan pengukuran ketebalan *coating* pada saat masih basah sebelum kering. Alat yang digunakan dalam WFT berbentuk *comb* dengan skala ketebalan satuan mikron (µm)

sesuai metode ASTM D4414. Pengukuran WFT dengan ditekan cat saat masih basah dengan satuan mikron (μm), kemudian nilai ketebalan ditentukan berdasarkan gerigi terakhir dari cat basah menjadi nilai satuan mikron (μm). Perhitungan WFT mengacu pada hubungan antara DFT dan volume solids yang tercantum dalam *Technical Data Sheet* (TDS) Interseal 670 HS dan Interthane 990. Standar ISO 2808 digunakan sebagai acuan yang menjelaskan pengukuran ketebalan lapisan *coating*, sehingga pengukuran WFT dapat digunakan untuk memastikan ketebalan lapisan cat saat basah sesuai dengan target kekeringan *Dry Film Thickness* (DFT). Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai WFT adalah sebagai berikut:

$$\text{WFT} = \frac{\text{DFT} \times 100}{\text{Volume Solid}} \quad (1)$$

Keterangan :

- WFT : *Wet Film Thickness* (μm).
- DFT : *Dry Film Thickness* (μm).
- Volume Solid : Volume solid sesuai dengan Cat (%).

Selanjutnya, pengukuran ketebalan lapisan *wet film thickness* dilakukan di 3 lokasi pada keseluruhan permukaan spesimen selama 3 kali pengujian terpisah untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih merepresentasikan hasil ketebalan lapisan. nilai *wet film thickness* dihitung berdasarkan target *dry film thickness* yang tercantum pada *technical data sheet* dan nilai volume solid *coating*. Perhitungan ini digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan basah yang harus dicapai selama aplikasi *coating* agar menghasilkan ketebalan lapisan kering.

2.9. Dry Film Thickness (DFT).

Dry Film Thickness (DFT) merupakan parameter untuk mengukur lapisan *coating* setelah mengering. Prosesnya yang dilakukan dengan mengukur ketebalan pelapisan cat yang kering menggunakan alat *Dry Film Thickness* (DFT) Elcometer 456 secara non-destruktif sesuai dengan metode ASTM D7091. Selanjutnya, *Dry Film Thickness* (DFT) harus sudah terverifikasi dari external yang sudah diakui lisensinya.

Dalam penelitian ini, proses persiapan dan aplikasi *coating* mengacu pada teknis *Technical Data Sheet* (TDS) masing-masing produk *coating*, yang memuat informasi teknis seperti komposisi pencampuran, waktu pengeringan, volume solid, metode aplikasi. Selanjutnya, evaluasi ketebalan lapisan *coating* dilakukan dengan *Inspection Test plan* (ITP) perusahaan yang digunakan sebagai acuan inspeksi dan kriteria penerimaan hasil *Dry Film Thickness* (DFT). rentang spesifikasi yang digunakan di lapangan pada tabel 2.9.

Tabel 2.9.

Spesifikasi rentang *Dry Film Thickness* (DFT) berdasarkan *Inspection Test Plan* (ITP) perusahaan dan *Technical Data Sheet*.

Jenis Coating	Lapisan	DFT μm
Interseal 670 HS Red or Grey	<i>Primer Coat</i>	100-150 μm .
Interseal 670 HS RAL7035 Grey	<i>Intermediate Coat</i>	150-250 μm .
Interthane 990 RAL 1023Yellow	<i>Top Coat</i>	50-75 μm .

Selanjutnya, pengukuran *dry film thickness* dilakukan pada 3 lokasi yang berbeda di permukaan spesimen selama tiga rangkaian pengujian terpisah untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih akurat untuk menentukan ketebalan lapisan *coating*. nilai *dry film thickness* yang dipersyaratkan pada *technical data sheet* digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai target *wet film thickness* melalui perhitungan berdasarkan nilai volume solid *coating*.

2.10. Pull-Off Test dan Dolly Adhesion.

Pull-Off Test adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui kekuatan adhesi lapisan *coating* dan substrat baja dengan metode berdasarkan metode standar ISO 4624. Pengujian dilakukan menggunakan DeFelsko PosiTest AT *Pull-Off Adhesion Tester* dengan dolly adhesion berukuran 20 mm pada permukaan *coating* berdasarkan metode standar ISO 4624, kemudian penarikan dilakukan hingga terjadi kegagalan adhesi, dan nilai gaya tarik maksimum dicatat sebagai nilai kekuatan adhesi dalam satuan MPa.

Kriteria penerimaan nilai adhesi berdasarkan metode *Pull-Off Test* dalam penelitian ini adalah mengacu pada Norsok M-501, yaitu nilai adhesi ≥ 5.00 MPa sebagai batas penerimaan *Inspection Test Plan*(ITP) di perusahaan. Pengujian *Pull-Off Test* dilakukan setelah sistem *coating* diaplikasikan hingga lapisan *top coat* dan mencapai kondisi full cure atau menunggu ± 7 hari sesuai dengan *Technical Data Sheet* (TDS) Interthane 990.

Selanjutnya, pengujian daya lekat menggunakan metode *pull-off test* dilakukan pada empat potongan panel, dengan potongan panel ditempelkan dengan 4 titik lokasi yang berbeda sehingga total sebanyak 16 kali titik pengujian. Pengujian di berbagai lokasi tersebut bertujuan untuk memperoleh nilai rata-rata kekuatan rekat pada seluruh spesimen

2.11. Desain Analisis Data.

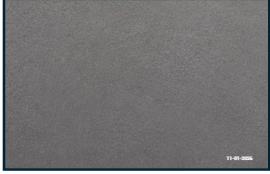
Data *surface preparation* dianalisis berdasarkan hasil pemeriksaan kebersihan permukaan, kadar garam, dan profil kekasaran permukaan. Data kondisi lingkungan dianalisis berdasarkan parameter temperatur udara, temperatur permukaan, kelembapan relatif (RH) dan titik embun untuk memastikan kondisi lingkungan memenuhi persyaratan sebelum proses *coating* dilakukan.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengukuran Hasil *Surface Preparation*.

Sebelum dilakukan proses *coating*, permukaan baja terlebih dahulu dibersihkan untuk menghilangkan kontaminan yang dapat mempengaruhi daya rekat *coating*. Pembersihan awal meliputi metode pembersihan *solvent cleaning*, *Handtool* dan *Powertool*. Hasil kondisi permukaan baja sebelum dan sesudah proses pembersihan disajikan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1
Hasil Kondisi Permukaan Baja Sebelum dan Sesudah Proses Pembersihan Material Menggunakan *Solvent Cleaning*, *Handtool* dan *Powertool*.

Metode Pembersihan	Tingkat SSPC-SP	Sebelum	Sesudah
<i>Solvent Cleaning</i>	SSPC-SP 1		
<i>Handtool</i>	SSPC-SP 2		
<i>Powertool</i>	SSPC-SP 3		

Setelah dilakukan proses pembersihan, permukaan baja terlebih dahulu dibersihkan menggunakan *Solventcleaning* sesuai dengan SSPC-SP 1 untuk menghilangkan kontaminan berupa minyak, debu yang dapat mengurangi kotoran yang menempel. Selanjutnya, proses dilanjutkan dengan metode *handtool* SSPC-SP 2 dan *powertool* sesuai SSPC-SP 3 untuk menghilangkan karat, cat lama, *mill scale*, serta kontaminan lain yang masih melekat pada permukaan baja. Tahapan pembersihan tersebut menghasilkan permukaan baja yang lebih bersih sehingga mendukung proses *abrasive blasting* dan aplikasi *coating* sesuai prosedur inspeksi.

Setelah proses pembersihan, pengujian menggunakan kertas Blotter Test untuk pengujian *blasting* dilakukan untuk memastikan udara bertekanan yang digunakan selama proses *blasting* bebas dari kontaminasi. Setelah dilakukan pengujian menggunakan kertas blotter test terbukti hasil pengujian digunakan bersih tidak ada sisa kontaminasi sebelum proses *blasting*. Hasil pengujian menggunakan blotter test ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Hasil Tekanan Pengujian Pengetesan Udara Menggunakan Blotter test.

3.2. Pengujian *Blasting*.

Pengujian konduktivitas media abrasif dilakukan untuk memastikan bahwa media yang digunakan tidak mengandung garam yang terlarut dalam jumlah yang dapat mempengaruhi kualitas persiapan permukaan *coating*. Hasil pengujian media abrasif menunjukkan nilai koreksi air sebesar 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pembacaan akhir sebesar 92 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sehingga diperoleh nilai conductivity sebesar 89 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Berdasarkan *Inspection Test Plan* (ITP) perusahaan tempat penelitian, media abrasif dinyatakan memenuhi apabila memiliki nilai *conductivity* kurang dari 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Oleh karena itu, hasil pengujian sebesar 89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menunjukkan bahwa media abrasif memenuhi persyaratan dan layak digunakan pada proses *abrasive blasting*. Setelah proses *blasting*, hasil permukaan mencapai tingkat kebersihan Sa 2½ (ekuivalen dengan SSPC-SP-10/ NACE No.2). Perbandingan kondisi permukaan baja sebelum dan sesudah proses abrasive blasting ditunjukkan gambar a dan b.



(a). Permukaan Baja Sebelum Proses *Blasting*.



(b). Permukaan Baja Setelah Proses *Blasting*.

3.3. Inpeksi Hasil *Surface Preparation*.

Setelah proses abrasif *blasting*, selanjutnya dilakukan inpeksi untuk memastikan bahwa kondisi permukaan telah memenuhi persyaratan. Pemeriksaan meliputi *surface profile*, *dust level*, dan *salt contamination*. Hasil inpeksi *surface preparation* pada setiap parameter disajikan pada tabel 3.3

Tabel 3.3

Data Inpeksi Hasil *Surface Preparation*.

No	Jenis Pemeriksaan	Metode Standar	Hasil (Rata-ata)	Keterangan
1	Profil permukaan (<i>Surface Profil</i>)	ASTM D4417/TDS spesifikasi 50-75 μm	Rata-rata 59,4 μm	Memenuhi
2	Tingkat kebersihan permukaan (<i>Surface Cleanliness</i>)	ISO 8501-1 Sa 2½/ SSPC-SP 10	Sa 2½	Memenuhi
3	Kebersihan debu (<i>Dust Test</i>)	ISO 8502-3	Dust rating class 1	Memenuhi
4	Kandungan garam	ISO 8502-6 dan ISO 8502-09, NORSOK M-501 ($\leq 20 \text{ mg/m}^2$)	Rata-rata 8 mg/m^2	Memenuhi

Berdasarkan hasil inpeksi pada tabel 3.3, pengukuran *surface profil* hasil abrasif *blasting* memiliki nilai rata-rata 59,4. Nilai tersebut rentang spesifikasi 50-75 μm sesuai dengan *Technical Data Sheet* (TDS) Interseal 670 HS dan metode ASTM D4417, sehingga mampu meningkatkan daya lekat pelapisan *coating* dan kekuatan adhesi pada spesimen baja. Hasil pemeriksaan *surface cleanliness* menunjukkan tingkat kebersihan permukaan mencapai tingkat kebersihan Sa 2½ atau SSPC-SP-10/NACE no 2, yang menandakan bahwa permukaan baja telah bebas dari karat, *mill scale*, dan kontaminan yang dapat membantu proses *coating*. Selanjutnya, hasil *dust test* menunjukkan dust level rating 1 berdasarkan ISO 8502-3, yang mengindikasikan bahwa jumlah debu pada permukaan baja sangat rendah sehingga tidak mengganggu proses aplikasi *coating*. Hasil pengujian kandungan garam material dalam baja bahwa menunjukkan nilai rata-rata 8 mg/m^2 dapat mengacu dengan metode pengambilan sample garam dengan metode ISO 8502-6 dan cara menghitung hasil kontaminasi garam dengan 8502-9. Kandungan maksimum kontaminan larut air pada permukaan baja tidak boleh melebihi 20 mg/m^2 ekuivalen Naci berdasarkan NORSOK M-501. Rendahnya hasil kontaminasi garam dapat membantu mengurangi potensi gangguan terhadap daya lekat lapisan dan kualitas *coating*.

Kondisi permukaan tersebut memberikan dasar yang baik untuk proses aplikasi *coating* sehingga mendukung tercapainya ketebalan *coating* yang sesuai spesifikasi serta menghasilkan kekuatan adhesi yang baik pada pengujian *Pull-Off Test*.

3.4. Pemeriksaan Uji Kondisi lingkungan.

Selain menguji kebersihan material baja, dilakukan dengan proses kondisi lingkungan yang dikendalikan meliputi *dry bulb*, *wet bulb*, *relative humidity*, *dew point*, dan *steel temperature*. Pemeriksaan kondisi lingkungan untuk memastikan aplikasi memenuhi persyaratan dengan *Technical Data Sheet* (TDS) sebelum aplikasi setiap lapisan *coating*, yaitu *primer coat*, *intermediate coat* dan *top coat*. Berdasarkan *Technical Data Sheet* (TDS) Interseal 670 HS, aplikasi hanya dapat dilakukan apabila *Relative Humidity* (RH) tidak melebihi 85% dan temperatur permukaan baja berada minimal 3 °C diatas titik embun *dew point* untuk mencegah terjadinya kondensasi dan mendukung adhesi pada permukaan baja ASTM SA516 GRADE 65N. Hasil pengukuran kondisi lingkungan setiap tahap lapisan aplikasi *coating* terdapat pada tabel 3.4.1, 3.4.2, dan 3.4.3.

Tabel 3.4.1.

hasil kondisi lingkungan saat aplikasi *primer coat*.

Time	08.00 am	10.00 am	12.00 am	02.00 pm	04.00 pm
<i>dry bulb</i>	29°C	29 °C	30°C	33 °C	29 °C
<i>wet bulb</i>	26°C	25°C	26°C	27°C	25°C
<i>relative humidity</i>	78%	71%	73%	64%	70%
<i>dew point</i>	25°C	24°C	24°C	25°C	23°C
<i>Steel temperature</i>	29°C	29°C	30°C	33°C	30°C

Tabel 3.4.2.

hasil kondisi lingkungan saat aplikasi *intermediate coat*.

Time	08.00 am	10.00 am	12.00 am	02.00 pm	04.00 pm
<i>dry bulb</i>	28°C	28 °C	29°C	30 °C	29 °C
<i>wet bulb</i>	26°C	25°C	26°C	26°C	26°C
<i>relative humidity</i>	85%	78%	79%	73%	79%
<i>dew point</i>	25°C	23°C	24°C	24°C	23°C
<i>Steel temperature</i>	28°C	30°C	31°C	30°C	29°C

Tabel 3.4.3

hasil kondisi lingkungan saat aplikasi *top coat*.

Time	08.00 am	10.00 am	12.00 am	02.00 pm	04.00 pm
<i>dry bulb</i>	29°C	29 °C	30°C	34 °C	31 °C
<i>wet bulb</i>	26°C	26°C	27°C	27°C	27°C
<i>relative humidity</i>	79%	81%	73%	55%	73%
<i>dew point</i>	24°C	25°C	24°C	24°C	25°C
<i>Steel temperature</i>	28°C	28°C	30°C	34°C	30°C

Berdasarkan hasil pengukuran, kondisi lingkungan sebelum proses coating berada pada kisaran *dry bulb* 28-34°C, *wet bulb* 25-27 °C, *relative humidity* 55-85%, *dew point* 23-25 °C, dan *steel temperature* 28-34°C. Kondisi tersebut memenuhi persyaratan aplikasi cat interseal karena kelembapan relatif tidak melebihi 85%, serta persyaratan perusahaan tempatur baja lebih dari 3°C diatas titik embun, sehingga resiko terjadinya kondensasi dapat dihindari dan proses pengecatan dapat dilakukan dengan baik.

3.5. Hasil Pengukuran *Wet Film Thickness*.

Pengukuran *Wet Film Thickness* dilakukan setelah proses spray coating menggunakan *Wet Film*

Thickness comb dengan metode ASTM D4414. Berikut data hasil pengukuran *Wet Film Thickness* dengan spesimen ASTM SA516 Grade 65N yang terdapat di tabel 3.5.

Tabel 3.5.
Pengukuran Hasil *Wet Film Thickness*.

Lapisan Coating	Jenis Coating	WFT Titik 1 (μm)	WFT Titik 2 (μm)	WFT Titik 3 (μm)
<i>Primer Coat</i>	Interseal 670 HS Red or Grey	140	157	166
		159	162	165
		156	140	149
<i>Intermediate Coat</i>	Interseal 670 HS RAL7035 Grey	196	219	233
		219	197	208
		213	229	221
<i>Top Coat</i>	Interthane 990 RAL 1023 Yellow	93	85	90
		87	88	90
		85	93	98

Berdasarkan hasil pengukuran WFT pada tabel 3.5, nilai WFT lapisan *primer coat* memiliki nilai rata-rata sebesar 154,89 μm, *intermediate coat* sebesar 215,11 μm, dan *top coat* sebesar 89,8 μm. Nilai tersebut sesuai dengan hasil perhitungan WFT yang diperoleh dari hubungan antara *Dry Film Thickness* dan volume solids yang tercantum pada Technical Data Sheet (TDS) masing-masing *coating*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses aplikasi *coating* telah dilakukan dengan baik sehingga mampu mendukung tercapainya bahwa ketebalan lapisan kering yang diaplikasikan telah sesuai dengan target perhitungan, sehingga proses aplikasi *coating* dapat mendukung tercapainya ketebalan lapisan kering *Dry Film Thickness* (DFT) sesuai dengan spesifikasi.

3.6. Hasil Pengukuran *Dry Film Thickness*.

Pengukuran *Dry Film Thickness* dilakukan setelah seluruh lapisan *coating* kering dalam kondisi hard dry dan menyesuaikan dengan masing- masing *Technical Data Sheet* (TDS) produk cat. Berikut data hasil pengukuran *Dry Film Thickness* dengan material ASTM SA516 Grade 65N. Hasil pengukuran *dry film thickness* pada lapisan *primer coat*, *intermediate coat*, dan *top coat* disajikan pada tabel 3.6

Tabel 3.6.

Data Hasil pengukuran Dry Film Thickness Dengan *Technical Data Sheet* Produk Cat.

Lapisan <i>Coating</i>	DFT titik 1(μm)	DFT titik 2 (μm)	DFT titik 3 (μm)	Acuan TDS (μm)	Keterangan
<i>Primer coat</i>	115	129	136	100-150 μm	Memenuhi
	130	133	135		
	128	115	122		
<i>Intermediate coat</i>	161	180	191	150-250 μm	Memenuhi
	180	162	171		
	175	188	181		
<i>Top coat</i>	56	51	54	50-75 μm	Memenuhi
	52	53	54		
	51	56	59		

Keterangan :

Primer = Spesimen cat yang telah diaplikasikan Interseal 670 HS Red or Grey.*Intermediate* = Spesimen cat yang telah diaplikasikan Interseal 670 HS RAL7035 Grey.*Top Coat* = Spesimen cat yang telah diaplikasikan Interthane 990 RAL 1023 Yellow.

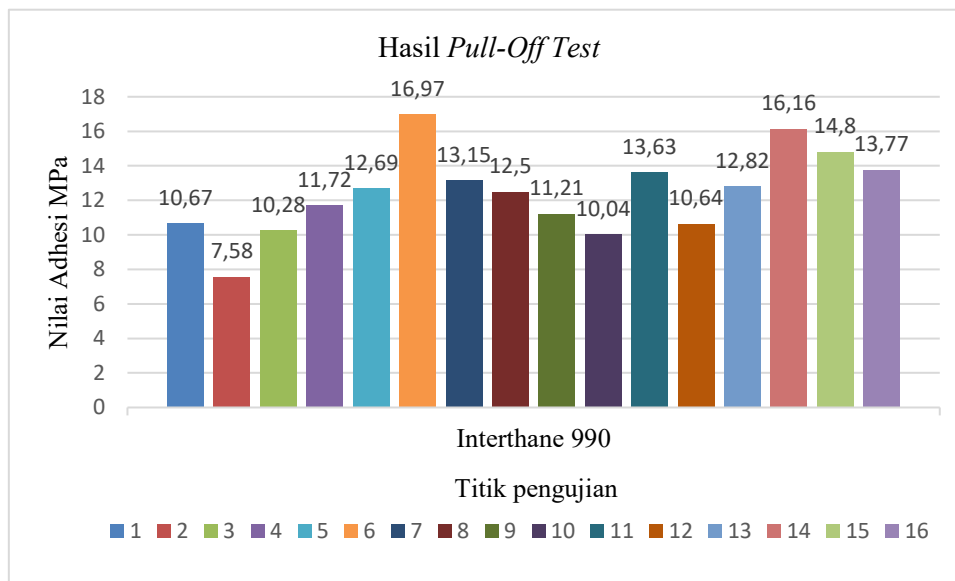
Berdasarkan hasil pengukuran *Dry Film Thickness* pada Tabel 3.6, spesimen baja ASTM dari pengujian ketebalan *coating* yang diaplikasikan dengan *Primer Coat* menggunakan *coating* jenis Interseal 670 HS Red or Grey memiliki nilai rata-rata sebesar 127 μm . Selanjutnya, lapisan *Intermediate Coat* dari jenis *coating* Interseal 670 HS RAL7035 Grey memiliki nilai rata-rata sebesar 176,55 μm , sedangkan *Top Coat* dengan jenis *coating* Interthane 990 RAL 1023 Yellow memiliki nilai sebesar 54 μm . Maka, hasil pengukuran lapisan *top coat* menunjukkan bahwa proses aplikasi *coating* telah menghasilkan ketebalan yang sesuai dengan spesifikasi *Inspection Test plan* (ITP) dan *Technical Data Sheet* (TDS).

3.7. Hasil pengujian *Pull-Off Test*.

Pengujian daya rekat kekuatan hasil coating atau disebut dengan *adhesion test* dilakukan setelah proses *Dry Film Thickness*. Selanjutnya alat digunakan untuk mengetahui daya rekat coating menggunakan *Portable adhesive tester* dan dilakukan sesuai dengan metode pengujian ASTM D4541. Dolly yang digunakan berdiameter 20 mm. Berikut gambar pemasangan dolly berukuran 20 mm dan hasil dari pengujian *Pull-Off Test* terdapat di grafik tabel 3.7.



Gambar 3.7 Pemasangan Dolly berukuran 20 mm.



Gambar 3.7. Data Grafik Hasil Pengujian *Pull-Off Test*.

Berdasarkan hasil pengujian *Pull-Off Test* pada Tabel 3.7, spesimen baja ASTM SA516 Grade 65N dari pengujian daya lekat yang diaplikasikan setelah *Top Coat* mencapai kondisi full cure ± 7 hari menggunakan *coating* jenis Interthane 990 memiliki nilai rata-rata *Pull-Off Test* sebesar 12,41 MPa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem *coating* yang diaplikasikan pada spesimen ASTM SA516 Grade 65N memenuhi persyaratan adhesi dan nilai adhesi yang baik terhadap permukaan baja berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode *Pull-Off Test* sesuai dengan ASTM D4541. Tingginya nilai adhesi mengindasikan bahwa proses *surface preparation*, pengendalian kondisi lingkungan, dan aplikasi *coating* telah dilakukan sesuai prosedur sehingga mampu menghasilkan ikatan yang kuat antara lapisan *coating* dan substrat baja.

Hasil pengujian *Pull-Off Test* juga didukung oleh hasil pengukuran *Dry Film Thickness* (DFT) yang menunjukkan bahwa ketebalan setiap lapisan *coating* telah memenuhi parameter teknis yang direkomendasikan *Technical Data Sheet* (TDS), sedangkan hasil pengukuran adhesi ditetapkan dalam *Inspection Test Plan* (ITP) berdasarkan NORSOK M-501 .

4 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *coating* yang diaplikasikan pada baja ASTM SA516 Grade 65 N telah memenuhi persyaratan kualitas berdasarkan hasil pengukuran *Dry Film Thickness* (DFT) dan *Pull-Off Test*. Hasil pengukuran *Dry Film Thickness* menunjukkan bahwa rata-rata ketebalan *primer coat* sebesar 127 μm , *intermediate coat* sebesar 176,55 μm , dan *top coat* sebesar 54 μm .

Hasil *Pull-Off Test* yang dilakukan setelah sistem *coating* mencapai kondisi *full cure* selama ± 7 hari menunjukkan nilai adhesi rata-rata sebesar 12,41 MPa. Seluruh hasil pengujian berada diatas batas minimum penerimaan sebesar 5,00 MPa dari perusahaan berdasarkan NORSOK M-501, sehingga sistem *coating* dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan adhesi terhadap substrat baja ASTM SA516 Grade 65N.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan prosedur *surface preparation*, pengendalian ketebalan *coating* secara umum sesuai spesifikasi *Technical Data Sheet* (TDS), serta pengendalian kualitas *coating* berdasarkan *Inspection Test Plan* (ITP) perusahaan mampu menghasilkan sistem *coating* dengan kualitas adhesi yang memenuhi standar inspeksi.

5 Daftar Pustaka

- [1] A. Yuechen Xiong and H. C. H., "Mechanical properties of coating/carbon steel systems under different marine environments and stresses", Volume 80, Oct 2025.
- [2] Yuwei Liu and Miaoran Liu, "Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere", Volume 277, 01 Feb 2022.
- [3] Abass A. Olajire., "recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures", Volume 269, 1 November 2018.
- [4] H Pratikno, "The Effect Analysis of Coating Thickness Variation and Mixture Composition of Magnesium – Flake Glass on Epoxy Coating on Abrasive Resistance, Adhesion Strength, and Prediction of Corrosion Rate of ASTM A36 Steel Plate", Vol. 5 No. 1, May, 2021.
- [5] INTERNATIONAL STANDARD ISO 2808, "Paints and varnishes-Determination of film thickness COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT", July, 2019.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD, ISO 4624:2023, "Paints and varnishes — Pull-off test for adhesion", 2023.
- [7] NORSOK M-501, "Surface preparation and Protective coating, Edition 6, Feb 2012.
- [8] INTERNATIONAL STANDARD, "Preparation of steel substrates before application of paints and related products-Tests for the assessment of surface cleanliness-Part 6: COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT Extraction of water soluble contaminants for analysis (Bresle method)", Third edition, April, 2020.
- [9] INTERNATIONAL STANDARD, ISO 8502-3:2017, "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) COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT", Jan, 2017.
- [10] INTERNATIONAL STANDARD, "Extraction of soluble contaminants for analysis", Third Edition, Feb, 2020.
- [11] SSAB, "ASTM A516 HIC Tested Steel grades 60,65,70".ssab.com/en-us/brands-and-products/commercial-steel/pressure-vessel/astm-a516-hic-tested-steel-grades-60-65-and-70. 19 April 2017.
- [12] Surfaceprep, "Surface Preparation Standards: SSPC/NACE", August 2023.
- [13] ASTM International, "Standard Test Method for Indicating Oil or Water in Compressed Air", ASTM D4285-83,(2018).
- [14] INTERNATIONAL STANDARD, ISO 8502-4:2017, "Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Tests for the assessment of surface cleanliness — Part 4: Guidance on the estimation of the probability of condensation prior to paint application", Second edition, 2017-01.
- [15] International Standard, "Atmospheres for conditioning and testing - Determination of relative humidity - Part 2: Whirling psychrometer method", ISO 4677/12, First edition, 1985-10-15.
- [16] ASTM International, "Standard Practice For Measurement Of Wet Film Thickness", ASTM D4414-95, 2001.
- [17] Mohamed Abdel Wahab, "Geochemical and Mechanical Studies of Nonmetallic Ores Utilized as Blasting Abrasive Media". 2014.
- [18] SSPC, "The Society for Protective Coatings Abrasive Standar No. 1," , Sep 1. 2000.

- [19]ASTM International, "Standard Practice for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to Ferrous Metals and Nonmagnetic, Nonconductive Coatings Applied to Non-Ferrous Metals", ASTM D7091, 2022.
- [20]ASTM International, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, Section 2 in August 2010.
- [21] Carolus Trijatkiko, Herman Pratikno, dan Agung Purniawan, "Analisa Pengaruh Material Abrasif Pada Blasting Terhadap Kekuatan Lekat Cat dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Air Laut", JURNAL TEKNIK ITS Vol. 5, No. 2, (2016).
- [22] W.Momber and W.D Greverath, "Surface-Preparation-Standards-for-Steel-Substrates", February, 2004.
- [23] Muhammad Syauqi Nasrulloh, Rachmad Syarifudin H.2, Wahyu Dwi K., Sigit N, "Analisis pengaruh ketebalan dan jenis Coating terhadap kekuatan Adhesi pada Pelat Baja SA 516 Gr 70", volume 7 nomor 2 (2026).
- [24] Andika Ade vicky Irwansyah, Muhammad Syukron, Atik Setyani, Muji Santoso, "Analysis of Primary Coating Thickness Effects on Adhesion Strength in S355J2+N Steel Material", Vol. 5, No. 1. page 78-89, August, 2024.
- [25]Internasional Paint Ltd, "Interseal 670 HS Red or Grey", AkzoNobel, Gateshead, U.K. 2024.
- [26]Internasional Paint Ltd, "Interseal 670 HS RAL7035 Grey", AkzoNobel, Gateshead, U.K. 2024.
- [27]Internasional Paint Ltd, "Interthane 990 RAL 1023 Yellow", AkzoNobel, Gateshead, U.K. 2024.