



Pengaruh Variasi Material Abrasif *Sandblasting* terhadap Kekuatan Adhesi dan Laju Korosi Lapisan *Thermal Spray Aluminium* pada Baja ASTM A36

the Effect of Sandblasting Abrasive Material Variations on the Adhesion Strength and Corrosion Rate of Thermal Spray Aluminium Coatings on ASTM A36 Steel

Agris Setiawan¹⁾, Louis Nicholas Jaya Simatupang^{1,a)}

¹Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

^{a)} Corresponding author: louisnjs.met@gmail.com

Struktur lepas pantai dari baja karbon sangat rentan terhadap korosi di lingkungan laut. *Thermal spray aluminium* (TSA) merupakan metode pelapisan yang memberikan perlindungan korosi melalui mekanisme *barrier* dan perlindungan katodik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi material abrasif *sandblasting* terhadap kekuatan adhesi dan laju korosi lapisan TSA pada baja ASTM A36. Material abrasif yang digunakan adalah pasir garnet (30 mesh dan 60 mesh), *steel grit* (40 mesh), dan *aluminium oxide* (16 mesh). *Sandblasting* dilakukan hingga tingkat kebersihan Sa 2½, kemudian diaplikasikan lapisan TSA dengan ketebalan 200–400 µm. Pengujian meliputi kekuatan adhesi, laju korosi, uji tekuk, dan pengamatan struktur mikro. Hasil menunjukkan *steel grit* menghasilkan kekasaran tertinggi (79,5 µm), sementara pasir garnet menghasilkan kekuatan adhesi tertinggi (17,92 MPa) namun menunjukkan laju korosi tertinggi (3,9429 mm/tahun) yang diindikasikan berkorelasi dengan tingginya nilai konduktivitas akibat residu garam terlarut pada permukaan. Laju korosi terendah diperoleh pada spesimen *steel grit* (0,9394 mm/tahun).

Kata Kunci: pelapisan; korosi; penyemprotan termal aluminium

Abstract

Offshore structures made of carbon steel are highly susceptible to corrosion in aggressive marine environments. Thermal spray aluminium (TSA) is a coating method that provides corrosion protection through both barrier and cathodic protection mechanisms. This study aims to evaluate the effect of sandblasting abrasive material variations on the adhesion strength and corrosion rate of TSA coatings on ASTM A36 steel. The abrasive materials used were garnet sand (30 mesh and 60 mesh), steel grit (40 mesh), and aluminium oxide (16 mesh). Sandblasting was performed to a cleanliness level of Sa 2½, followed by TSA coating application at a thickness of 200–400 µm. Tests conducted included adhesion strength, corrosion rate, bend test, and microstructure observation. Results show that steel grit produced the highest roughness (79.5 µm), while garnet sand yielded the highest adhesion strength (17.92 MPa) but the highest corrosion rate (3.9429 mm/year) due to chloride ion contamination. The lowest corrosion rate was achieved by the steel grit specimen (0.9394 mm/year).

Keywords: coating; corrosion; thermal spray aluminium

PENDAHULUAN

Industri konstruksi lepas pantai di Indonesia terus berkembang, khususnya di sektor minyak dan gas yang mengandalkan struktur baja karbon sebagai material utama. Lingkungan laut dikategorikan sebagai area yang sangat agresif, di mana tingginya kadar garam, kelembaban, dan suhu memicu reaksi kimia yang mempercepat kerusakan material baja. Mitigasi korosi yang tidak ditangani dengan

baik memicu kegagalan struktur yang fatal serta membahayakan keselamatan operasi sehingga berdampak pada kerugian produksi. Risiko tersebut semakin besar pada area *splash zone*, di mana baja mengalami siklus basah-kering dan hantaman ombak dalam intensitas yang tinggi sehingga lapisan pelindung biasa sering kali gagal bertahan [1].

Thermal Spray Aluminium (TSA) merupakan salah satu metode pelapisan metalik yang unggul digunakan oleh

industri lepas pantai. TSA mampu memberikan perlindungan ganda melalui mekanisme *barrier* sekaligus perlindungan katodik dengan prinsip *sacrificial* anode sehingga dapat melindungi substrat meskipun lapisan mengalami kerusakan mekanis [2]. Keberhasilan aplikasi TSA sangat bergantung pada proses persiapan permukaan, khususnya *sandblasting*, yang menghasilkan profil kekasaran sebagai dasar mekanisme *mechanical interlocking* antara lapisan dan substrat. Tanpa persiapan permukaan yang memadai, ikatan lapisan dengan substrat tidak akan optimal dan rentan mengalami delaminasi [3].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji aspek *sandblasting* dan pelapisan pada baja karbon. Pratikno membuktikan bahwa jenis material abrasif berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan, di mana abrasif *steel grit* menghasilkan kekasaran lebih tinggi ($79,2\ \mu\text{m}$) dibanding pasir silika ($65,4\ \mu\text{m}$) dan berdampak langsung pada laju korosi lapisan [4]. Anam melakukan pengujian dengan variasi abrasif pasir garnet, *steel grit*, dan *aluminium oxide*, di mana *steel grit* menghasilkan laju korosi terendah ($0,23959\ \text{mmpy}$) dan kekuatan adhesi tertinggi ($9,8291\ \text{MPa}$) [3]. Alfaridzi. menambahkan bahwa salinitas lingkungan turut memengaruhi laju korosi, di mana material abrasif garnet dengan salinitas tinggi menghasilkan laju korosi tertinggi akibat kontaminasi ion klorida yang meningkatkan konduktivitas elektrolit [5]. Pratikno, lebih lanjut menyimpulkan bahwa *aluminium oxide* menghasilkan daya rekat lebih baik namun laju korosi lebih tinggi akibat porositas yang terbentuk dari profil permukaan yang kasar [1].

Meskipun demikian, seluruh penelitian terdahulu belum mencakup evaluasi ikatan mekanik lapisan TSA melalui uji tekuk mengacu standar NACE No. 12 [6], serta belum menganalisis profil *anchor pattern* dan porositas antarmuka lapisan melalui pengamatan mikro struktur secara bersamaan dengan pengujian kekuatan adhesi dan laju korosi pada tiga jenis material abrasif industri sekaligus. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk melengkapi penelitian terdahulu dengan menganalisis struktur mikro, mekanik, dan laju korosi secara bersamaan pada ketiga jenis material abrasif sehingga mampu mengevaluasi ikatan antara permukaan material dan menghasilkan matriks evaluasi pelapisan yang lebih utuh dan presisi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi material abrasif *sandblasting* pasir garnet (30 dan 60 *mesh*), *steel grit* (40 *mesh*), dan *aluminium oxide* (16 *mesh*) terhadap kekuatan adhesi, kekuatan tekuk, laju korosi, dan pengamatan mikro struktur lapisan TSA pada baja ASTM A36. Hasil penelitian diharapkan menjadi referensi teknis dalam optimalisasi persiapan permukaan guna menjamin efektivitas perlindungan katodik struktur lepas pantai di lingkungan berkorosi tinggi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh jenis material abrasif pada proses *sandblasting* terhadap kekuatan adhesi, kekuatan tekuk, laju korosi, dan karakteristik mikro struktur dari pelapisan *Thermal Spray Aluminium* (TSA) pada material baja karbon.

Populasi dan sasaran material (sampel) yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat baja karbon rendah ASTM A36 yang terbagi menjadi tiga variasi dimensi pengujian, yaitu ukuran $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$, $50\ \text{mm} \times 150\ \text{mm} \times 1,3\ \text{mm}$, dan $20\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 1,3\ \text{mm}$. Adapun material abrasif yang dikomparasikan sebagai variabel bebas seperti pada Tabel 1 meliputi sebagai berikut.

Tabel 1. Variabel material abrasif

Jenis Material Abrasif	Ukuran (mesh)	Densitas g/mm^3	Kandungan Garam Terlarut (mg/mm^2)
Pasir Garnet	30/60	$4,10 \times 10^{-3}$	$16,10 \times 10^{-5}$
Steel Grit	16	$7,30 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-5}$
Aluminium Oxide	40	$3,94 \times 10^{-3}$	$3,50 \times 10^{-5}$

Teknik pengumpulan data diawali dengan tahapan preparasi permukaan sampel menggunakan metode *dry abrasive sandblasting* pada tekanan kerja 8 bar hingga mencapai tingkat kebersihan Sa 2,5 (*Very Thorough Blast Cleaning*) sesuai standar ISO 8501-1 [7].

Setelah itu, dilakukan inspeksi awal yang mencakup pengukuran kekasaran permukaan (*surface roughness*) menggunakan alat *replica tape* dan *roughness meter* berdasarkan standar ISO 8503-2 [8]. Inspeksi konduktivitas untuk mendeteksi kandungan garam terlarut dilakukan menggunakan *bresle patch* dengan 2,5 mL air dan *conductivity* meter mengacu pada standar ISO 8502-9 [9].

Guna mencegah terjadinya *flash rust* dan memastikan kondisi optimal sebelum pelapisan, dilakukan inspeksi kondisi lingkungan (temperatur substrat, udara, dan titik embun) menggunakan *Dew Point Meter* (DPM) sesuai standar ASTM D-3276, di mana proses pelapisan hanya dilakukan jika selisih temperatur material dan titik embun minimal $3\ ^\circ\text{C}$ dengan kelembaban relatif di bawah 85%. Proses pelapisan TSA diaplikasikan menggunakan alat *arc wire spray system* dengan data pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Operasi pelapisan TSA

Diameter Kawat	:2,4 mm
Arus Operasi	:390 Ampere
Tegangan Operasi	:32 Volt
Tekanan Operasi	:7 Bar

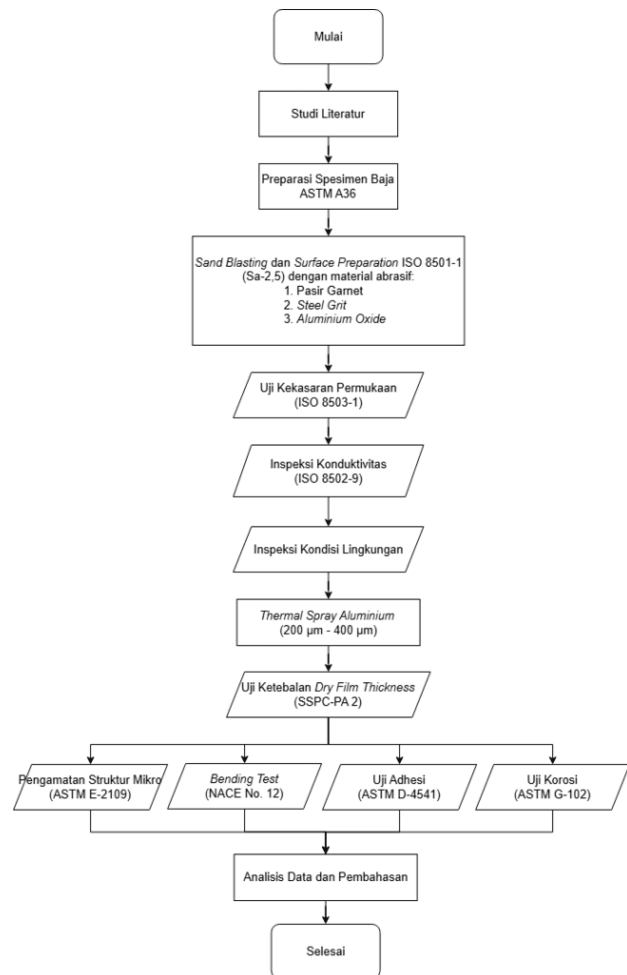
Ketebalan pelapisan dikontrol ketat pada rentang 200–400 μm menggunakan instrumen *Dry Film Thickness* (DFT) meter berdasarkan standar ISO 19840 [10] dan NORSOK M-501 [11].

Analisis data performa pelapisan diuji melalui empat instrumen utama yang merepresentasikan sifat mekanik dan ketahanan degradasi material. Pertama, pengujian tekuk (*bending test*) secara kualitatif dievaluasi menggunakan alat *mandrel* tester berdiameter 13 mm (dibengkokkan hingga 180°) untuk melihat fleksibilitas dan inisiasi retak sesuai standar NACE No. 12 [6]. Kedua, kekuatan adhesi secara kuantitatif diukur melalui metode *pull-off test* menggunakan *portable adhesion tester* dengan *dolly* perekat epoksi dua komponen (*adhesive*) mengacu pada standar ASTM D4541-22 [12]. Ketiga, laju korosi dianalisis secara elektrokimia menggunakan instrumen *potentiostat linear polarization* yang terhubung dengan perangkat lunak Corrttest melalui uji polarisasi potensiodinamik dengan standar ASTM G102-23) [13], pengujian ini menggunakan lingkungan korosif buatan berupa larutan NaCl 3,5% dengan elektroda pembanding *Saturated Calomel Electrode* (SCE) dan elektroda bantu platina. Data pengujian korosi pada Tabel 3 dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 3. Operasi Pengujian Korosi

Luas area	: 100 mm ²
Densitas	: 7,87
Berat	: 27,9235
Referensi potensial	: 0,241
Referensi yang diketahui	: 2
<i>Stern geary</i>	: 18
Temperatur	: 25

Terakhir, data mikro struktur dan topografi antarmuka dikumpulkan dan dianalisis menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 100x untuk mengamati bentuk *anchor pattern*, *mechanical interlocking*, dan porositas sesuai dengan prosedur ASTM E2109. Keseluruhan data yang diperoleh dari Gambar 1 kemudian dianalisis secara komparatif untuk merumuskan pengaruh spesifik dari setiap jenis material abrasif.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inspeksi Kekasaran Permukaan

Inspeksi hasil *sandblasting* dilakukan dengan metode *surface roughness test* menggunakan alat *roughness meter* dan *replica tape*. Pengujian *surface roughness* dilakukan untuk mendapatkan nilai kekasaran suatu permukaan material dari hasil perlakuan dengan *sandblasting*. Prinsip kerja pengujian *surface roughness* adalah dengan menekan film yang ada pada *replica tape* ke permukaan material yang telah dilakukan proses *sandblasting*. Lalu *replica tape* akan mengikuti *anchor pattern* yang terbentuk dari permukaan material yang telah dilakukan *sandblasting*. Kemudian dilakukan pengukuran dengan menjepitkan film *replica tape* diantara media pengukur *roughness meter* sehingga didapat nilai kekasarannya secara kuantitatif. Pengukuran kekasaran dengan menggunakan alat *roughness meter* dan *replica tape* mengacu pada standar ISO 8503-2 dengan dilakukan pada dua titik untuk masing-masing jenis material abrasif[8]. Hasil pengukuran nilai kekasaran pada masing-masing jenis material abrasif dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata nilai kekasaran permukaan

Jenis Material Abrasif	Nilai Kekasaran Permukaan Material (μm)	Rata-Rata nilai Kekasaran Permukaan Material (μm)
Pasir Garnet	70	70
	70	
Steel Grit	79	79,5
	80	
Aluminium Oxide	75	74
	73	

Inspeksi Hasil Pengaplikasian Coating

Setelah proses pelapisan dilakukan, penting untuk dilakukan kontrol ketebalan pada lapisan agar sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Mengacu pada standar NORSOK M-501, nilai ketebalan yang diizinkan untuk lapisan TSA adalah pada rentang $200\ \mu\text{m} - 400\ \mu\text{m}$ [11]. Ketebalan di tiap daerah material dapat bervariasi, sehingga pengujian ketebalan lapisan dilakukan pada beberapa titik agar kontrol ketebalan lapisan pada permukaan material dapat lebih seragam dan hasil lapisan dapat optimal. Pengujian ketebalan lapisan dilakukan pada 4 titik di setiap jenis material abrasif. Pengujian ketebalan lapisan dilakukan dengan menggunakan alat DFT dengan mengacu pada standar ISO 19840 [10]. Hasil pengujian ketebalan lapisan pada masing-masing jenis material abrasif dapat dilihat pada Tabel 5.

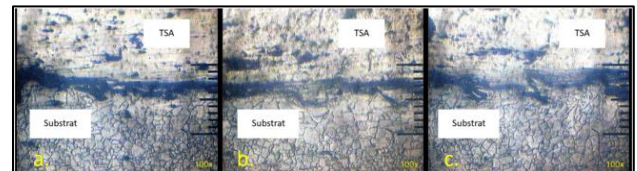
Tabel 5. Rata-rata ketebalan coating

Jenis Material Abrasif	Nilai Ketebalan Lapisan Coating (μm)	Rata-Rata Ketebalan Coating (μm)
Pasir Garnet	395	388
	387	
	396	
	374	
	376	
Steel Grit	397	364,25
	381	
	303	
	344	
Aluminium Oxide	368	354,25
	391	
	314	

Pengaruh Variasi Material Abrasif Terhadap Mikro struktur

Pengamatan mikro struktur merupakan metode pengamatan material secara skala mikroskopis untuk mengidentifikasi detail karakteristik dari material yang ingin diteliti. Pada penelitian ini, pengamatan mikro

struktur dilakukan untuk mengevaluasi bentuk ikatan antarmuka yang terjadi antara material dasar ASTM A36 dengan lapisan TSA. Pengamatan mikro struktur sangat penting dilakukan untuk merepresentasikan hasil dari pengujian mekanis yang telah dilakukan melalui visualisasi bentuk ikatan lapisan TSA pada permukaan material yang telah dilakukan proses sandblasting dengan tiga jenis material abrasif yang berbeda, yaitu pasir garnet, steel grit, dan aluminium oxide. Pengamatan mikro struktur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Visual mikro struktur hasil sandblasting; a) pasir garnet, b) steel grit, c) aluminium oxide

Pada material hasil sandblasting dengan material abrasif garnet diperoleh penampakan topografi lebih halus, dengan elevasi antara puncak dan lembah rendah dan kerapatan antara anchor pattern-nya tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai kekasaran yang diperoleh sebesar $70\ \mu\text{m}$. Rendahnya nilai kekasaran diakibatkan oleh bentuk butir pada pasir garnet yang sub-angular dengan ukuran 30 mesh dan 60 mesh. Pada pengamatan mikroskopis, terlihat tampilan antarmuka yang memperlihatkan posisi yang sangat rapat antara substrat baja dan lapisan. Profil lekukan yang dihasilkan tampak lebih seragam dan lelehan splat aluminium terlihat mampu berpenetrasi dan mengisi lembah-lembah anchor pattern secara menyeluruh. Kontak antara lapisan dengan permukaan menjadi pondasi terbentuknya penguncian mekanis yang sangat kuat. Hal tersebut sejalan dengan literatur dari Thakur dan Vasudev (2021), yang menjelaskan bahwa profil kekasaran permukaan dapat mempengaruhi mekanisme mechanical interlocking dan kualitas kontak splat terhadap substrat [14].

Pada material hasil sandblasting menggunakan steel grit menghasilkan tampilan anchor pattern dengan jarak antara puncak dengan lembah yang cukup jauh. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai kekasaran yang diperoleh sebesar $79,5\ \mu\text{m}$. Meskipun ukuran butir steel grit sangat kecil yaitu 40 mesh, namun kekasaran yang sangat tinggi dapat terbentuk akibat profil butir yang berbentuk angular serta memiliki densitas yang tertinggi yaitu sebesar $7,3\ \text{g/cm}^3$. Jarak profil yang lebar tersebut berdampak pada lapisan TSA yang mudah masuk ke dalam lembah sehingga lapisan mampu mengikuti kontur permukaan material.

Pada material hasil sandblasting menggunakan aluminium oxide menghasilkan tampilan anchor pattern yang menjorok ke dalam substrat dengan jarak antar puncak yang rapat dan lembah yang sempit. hal tersebut dibuktikan dengan kekasaran yang diperoleh sebesar $74\ \mu\text{m}$.

µm. Meskipun ukuran butir *aluminium oxide* besar yaitu berukuran 16 *mesh*, namun material *aluminium oxide* memiliki bentuk yang sangat *angular* dan memiliki nilai densitas sebesar 3,94 g/cm³ sehingga saat ditembakkan ke material mudah pecah sehingga mampu menghasilkan profil yang tajam dan rapat. Topografi permukaan material yang sangat rapat tersebut mengakibatkan lapisan TSA tidak mampu menyelimuti seluruhnya dasar lembah material, sehingga terdapat *void* di antara lapisan dengan permukaan material logam.

Pengaruh Variasi Material Sandblasting Terhadap Kekuatan Adhesi

Pengujian mekanis yang dilakukan pada pelapisan adalah dengan melakukan pengujian kekuatan adhesi yang bertujuan untuk mengevaluasi tingkat daya rekat yang dihasilkan antara lapisan dengan permukaan material. Daya rekat lapisan dapat dipengaruhi dari ketebalan maupun bentuk profil permukaan material. Pengujian kekuatan adhesi dilakukan dengan menggunakan metode *pull-off test*. Pengujian *pull-off test* dilakukan pada tiga titik untuk tiap jenis material abrasif dengan tujuan untuk dapat memberikan hasil kekuatan adhesi yang representatif. Selain menampilkan kekuatan adhesi, pengujian *pull-off test* juga dapat menghasilkan bentuk kegagalannya. Hasil pengujian tersebut menjadi parameter dalam menentukan ketahanan *coating* dan efektivitas preparasi permukaan sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan. Nilai rata-rata kekuatan adhesi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rata-rata kekuatan adhesi

Jenis Material Abrasif	Nilai Kekuatan Adhesi (MPa)	Rata-Rata Kekuatan Adhesi (MPa)
Pasir Garnet #30/#60	19,04	17,92
	19,03	
	15,70	
	14,14	
<i>Steel Grit</i> #40	17,51	15,72
	15,52	
	12,07	
	13,29	
<i>Aluminium Oxide</i> #16	13,29	13,34
	14,65	

Pada masing-masing jenis material abrasif *sandblasting* menghasilkan nilai *pull-off test* yang berbeda. Pengujian *pull-off test* dilakukan sebanyak tiga kali pada tiap jenis material abrasif *sandblasting*. Kekuatan adhesi yang dihasilkan pada material abrasif pasir garnet memperoleh rata-rata sebesar 17,92 MPa. Untuk material abrasif *steel grit* menghasilkan rata-rata kekuatan adhesi sebesar 15,72 MPa. Sedangkan material abrasif *aluminium oxide* menghasilkan rata-rata kekuatan adhesi sebesar 13,34 MPa. Kekuatan adhesi lapisan

perlindungan sangat bergantung pada mekanisme *mechanical interlocking* yang dipengaruhi oleh bentuk partikel abrasif dan profil kekasaran permukaan yang dihasilkan.

Material yang dilakukan proses *sandblasting* dengan jenis pasir garnet menghasilkan rata-rata kekuatan adhesi tertinggi dibandingkan dengan jenis material abrasif lainnya yaitu sebesar 17,92 MPa. Hal tersebut diakibatkan oleh profil butir yang berbentuk sub-*angular* sehingga mampu menghasilkan *anchor pattern* dengan bentuk yang seragam dan rapat. Akibatnya, lapisan TSA mampu menutupi seluruh permukaan material dan menciptakan *mechanical interlocking* yang sangat baik sehingga dapat meningkatkan daya rekat antarmuka secara signifikan. Diketahui nilai daya lekat yang tinggi juga diakibatkan terbentuknya tegangan sisa di antara lapisan. Hal tersebut dikarenakan lapisan TSA yang tebal mengalami penyusutan saat pendinginan, sehingga membentuk sifat tarik menarik antara *splat* lapisan. *Mechanical interlocking* tersebut berdampak pada mode kegagalannya dimana pada nilai adhesi tertinggi yaitu 19,04 MPa.

Sementara itu, material yang dilakukan proses *sandblasting* dengan jenis *steel grit* menghasilkan rata-rata kekuatan adhesi yang cukup baik namun berada di bawah nilai kekuatan pasir garnet yaitu sebesar 15,72 MPa. Berdasarkan pengamatan mikro struktur, hal tersebut disebabkan tumbukan material *steel grit* yang padat dan kuat menciptakan lembah dan puncak yang lebih signifikan. Bentuk material *steel grit* yang lebih *angular* menciptakan *anchor pattern* yang kasar dan dalam dengan jarak profil yang lebar. Keberadaan puncak profil yang tajam dapat mengganggu homogenitas penumpukan lapisan TSA yang bersifat lokal. Hal tersebut berdampak pada mode kegagalannya. Kegagalan *steel grit* didominasi oleh kegagalan kohesi. Karakteristik topografi yang dimiliki oleh *steel grit* dapat memicu titik lemah pada ikatan antar lapisan (*inter-splat*) itu sendiri.

Di sisi lain, material yang dilakukan proses *sandblasting* dengan jenis *aluminium oxide* menghasilkan rata-rata kekuatan adhesi yang paling rendah di antara jenis material *sandblasting* lainnya yaitu hanya sebesar 13,34 MPa. Hal ini diakibatkan bentuk butir *aluminium oxide* yang sangat *angular*. Sehingga saat disemprotkan, hasilnya akan menciptakan profil lembah dan puncak yang sangat tajam dan sempit. Namun, cairan TSA memiliki viskositas yang tinggi sehingga cairan kesulitan untuk masuk dan mengisi dasar lembah yang sempit. Hal tersebut membentuk *shadowing effect*, sehingga partikel TSA dapat melapisi permukaan namun tidak sepenuhnya masuk dan menutupi celah-celah lembah. Akibatnya terbentuk *void* di antarmuka lapisan dan material dapat melemahkan sifat *mechanical interlocking*.

Pengujian Tekuk Terhadap Variasi Material Abrasif Sandblasting

Dalam mengevaluasi kekuatan adhesi lebih lanjut pada lapisan TSA dengan substrat, perlunya dilakukan proses pengujian tekuk. Pengujian tekuk dilakukan untuk mengevaluasi keuletan lapisan TSA. Sehingga dengan dilakukannya pengujian tekuk, diperoleh kualitas elastisitas lapisan TSA secara visual. Adapun penampakan visual pengujian tekuk tiap lapisan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan hasil pengujian tekuk

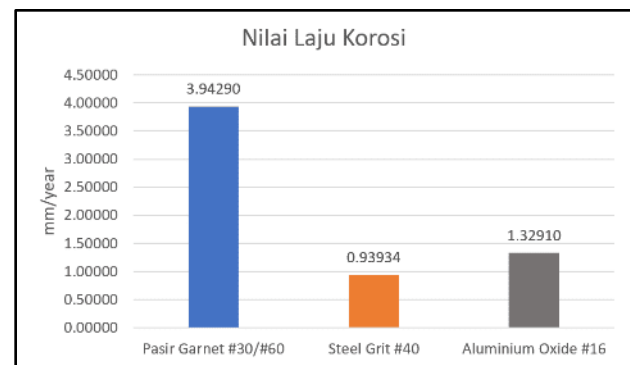
Material yang dilakukan proses sandblasting dengan jenis pasir garnet menghasilkan visual kegagalan berupa retak atau *crack* yang cukup signifikan. Hal tersebut diakibatkan ketebalan lapisan yang cukup tinggi yaitu pada rata-rata 374 μm , sehingga menyebabkan penurunan fleksibilitas pada lapisan. Penyusutan lapisan memicu kehadiran tegangan sisa (*residual stress*) saat proses pendinginan, membentuk sifat lapisan yang kaku sehingga regangan tarik yang dialami lapisan menjadi lebih besar. Hal tersebut menciptakan ikatan antarlapisan yang sangat kuat dan mengakibatkan lapisan tidak memiliki ruang gerak secara mikroskopis pada lapisan sehingga berdampak pada terbentuknya *crack* di beberapa lokasi dari daerah yang ditekuk.

Sementara itu, material yang dilakukan proses sandblasting dengan jenis *steel grit* menunjukkan hasil yang sangat baik dimana saat ditekuk tidak ada retak yang terbentuk secara signifikan. Hal tersebut dikarenakan ketebalan lapisan yang rendah sehingga menghasilkan fleksibilitas lapisan yang lebih baik. Regangan tarik yang diperoleh pada lapisan lebih kecil. Selain itu kualitas pembungkukan dipengaruhi juga pada profil permukaannya. Meskipun puncak profil dapat mengganggu homogenitas lapisan, namun jarak *anchor pattern* yang lebar tidak memicu konsentrasi tegangan yang signifikan pada lapisan. Hal tersebut dibuktikan dengan morfologi permukaan yang ditunjukkan pada pengamatan mikro struktur. Sehingga saat material dibungkukan, *anchor pattern* mampu mendistribusikan tegangan yang lebih merata dan merenggang dengan baik tanpa mengalami kegagalan struktural yang signifikan.

Sama halnya dengan material yang diprepa[15]rasi dengan *steel grit*, material yang diproses sandblasting dengan *aluminium oxide* menghasilkan visual yang cukup baik saat dilakukan pembungkukan. Tidak terbentuknya retakan yang signifikan pada sampel disebabkan oleh ketebalan lapisan yang paling rendah di antara semua variasi jenis material sandblasting. Akibatnya lapisan lebih elastis dan memiliki beban regangan yang lebih kecil saat dibungkukan. Minimnya penumpukan lapisan dapat meminimalisasi gaya tarik-menarik dan tegangan di area antar lapisan. Meskipun kekuatan adhesi lapisan pada material hasil sandblasting dengan *aluminium oxide* paling rendah, keberadaan void yang diakibatkan *shadowing effect* membuat lapisan dapat lebih mudah untuk mengalami pergeseran mikro sehingga potensi terjadinya inisiasi retak pada lapisan bernilai kecil.

Pengaruh Variasi Material Sandblasting Terhadap Laju Korosi

Variasi material abrasif sandblasting yang digunakan dapat mempengaruhi morfologi antarmuka. Selain itu, melalui morfologi yang dibentuk berdampak pada hasil integritas antara lapisan TSA dengan permukaan material. Untuk menentukan integritas antara lapisan TSA dengan permukaan material, diperlukan pengujian korosi. Pengujian korosi dilakukan untuk menentukan laju korosi sehingga didapatkan evaluasi ketahanan degradasi dan kemampuan proteksi lapisan TSA terhadap material. Morfologi lapisan TSA dengan lapisan permukaan seperti kehadiran porositas, konduktivitas dapat mempengaruhi laju korosi lapisan TSA. Perbandingan laju korosi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perbandingan laju korosi

Berdasarkan hasil pengujian korosi, spesimen hasil sandblasting menggunakan material abrasif pasir garnet, diperoleh laju korosi yang paling tinggi, yaitu sebesar 3,9429 mm/tahun. Tingginya laju korosi terindikasi memiliki korelasi kuat dengan tingginya kandungan garam terlarut bawaan material abrasif. Merujuk pada Tabel 1, pasir garnet memiliki kandungan garam terlarut sebesar $16,10 \times 10^{-5} \text{ mg/mm}^2$, sehingga kehadiran garam terlarut ini

. klorida yang dimiliki oleh pasir garnet merupakan bagian dari garam terlarut yang dapat meningkatkan nilai konduktivitas. Meningkatnya nilai konduktivitas akan berdampak pula pada peningkatan laju korosi. Hal tersebut disebabkan oleh kandungan garam terlarut meningkatkan konduktivitas elektrolit di antarmuka lapisan, yang secara termodinamika mempercepat kinetika reaksi korosi. Fenomena ini sejalan dengan penelitian Zimmermann, yang menyatakan bahwa klorida yang terdapat di antar muka substrat dan pelapis memiliki sifat higroskopis yang kuat, sehingga air akan berdifusi masuk dan menciptakan elektrolit yang kuat sehingga memicu terbentuknya korosi [15].

Sebaliknya, spesimen hasil *sandblasting* menggunakan material abrasif *steel grit* memiliki nilai laju korosi yang paling rendah, yaitu sebesar 0,93934 mm/tahun. Meskipun puncak profil yang tajam mengganggu homogenitas lapisan secara lokal, namun lapisan TSA mampu menutupi seluruh permukaan material dengan mengikuti kontur *anchor pattern*. Akibatnya, lapisan TSA mampu membentuk *mechanical interlocking* yang baik sehingga permukaan material dapat terlindungi secara optimal. Selain itu, kandungan garam terlarut yang dimiliki oleh material sangat rendah, yaitu sebesar 2,3 mg/m². Jumlah kandungan garam terlarut yang sedikit tersebut dikarenakan material abrasif *steel grit* tidak membawa ion agresif yang dapat mengontaminasi material, sehingga nilai konduktivitas yang dihasilkan sangat rendah. Rendahnya nilai konduktivitas tersebut juga didukung oleh ketiadaan jalur penetrasi air sehingga tidak terjadi aktivitas sel elektrolitik

Kemudian, spesimen hasil *sandblasting* menggunakan material abrasif *aluminium oxide* menunjukkan laju korosi yang sedikit lebih tinggi dari material abrasif *steel grit* yaitu sebesar 1,3290 mm/tahun. Hal tersebut dikarenakan pada permukaan material memiliki kandungan garam terlarut sebesar 3,5 mg/m². nilai kandungan garam terlarut yang diperoleh dari pengujian konduktivitas membuktikan bahwa material abrasif *aluminium oxide* belum mampu membersihkan kontaminan yang terdapat di permukaan material. Selain itu, morfologi *interface* antara lapisan TSA dengan material terdapat beberapa *void* yang terbentuk. Terbentuknya *void* tersebut dikarenakan dampak dari *shadowing effect* akibat lembah profil yang sempit dan menjorok ke dalam.

Secara holistik, hasil evaluasi menunjukkan adanya fenomena yang signifikan antara sifat mekanik dan ketahanan degradasi lapisan TSA akibat variasi material abrasif. Material pasir garnet terbukti sangat ideal dalam membangun fondasi mekanik, bentuk partikelnya yang sub-angular memberikan *mechanical interlocking* terbaik yang berujung pada nilai adhesi tertinggi (17,92 MPa), namun residu garam terlarut bawaannya memicu

konduktivitas antarmuka yang mengakibatkan lapisan ini memiliki laju korosi terburuk (3,9429 mm/tahun) serta rentan terhadap inisiasi retak pada pengujian tekuk.

Di sisi lain, *steel grit* menghadirkan keseimbangan performa pelapisan yang paling optimal, bentuknya yang angular menghasilkan kekasaran permukaan tertinggi (79,5 μ m) yang mampu menjaga fleksibilitas lapisan secara sempurna pada uji tekuk sekaligus memberikan laju korosi terendah (0,93934 mm/tahun) berkat minimnya kontaminasi klorida. Meskipun kekuatan adhesinya (15,72 MPa) di bawah garnet, kegagalan yang terjadi bersifat kohesif, mengindikasikan bahwa ikatan antarmuka substrat tetap utuh, adapun *aluminium oxide* berkinerja paling tidak efisien secara komprehensif, profil permukaannya yang terlampau tajam dan sempit menyebabkan kegagalan penetrasi TSA (*shadowing effect*), yang berujung pada nilai adhesi terendah (13,34 MPa) dengan laju korosi moderat (1,32910 mm/tahun) akibat retensi residu kontaminan.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian komprehensif yang telah dilakukan, karakteristik spesimen setelah proses *sandblasting* menunjukkan variasi yang signifikan bergantung pada jenis media abrasif yang digunakan. Secara mikro struktur, spesimen yang diproses menggunakan *steel grit* memiliki morfologi paling kasar dengan tingkat kekasaran mencapai 79,5 μ m dan jarak profil yang lebar. Sebagai perbandingan, *aluminium oxide* menghasilkan kekasaran menengah di angka 74 μ m dengan jarak profil yang lebih rapat, sementara penggunaan pasir garnet membentuk topografi permukaan yang paling halus pada level 70 μ m. Menariknya, topografi yang halus pada pasir garnet justru menghasilkan daya lekat terbaik, spesimen ini mencatat nilai *pull-off test* tertinggi sebesar 17,92 MPa berkat *mechanical interlocking* yang optimal serta penguatan ikatan antarlapisan akibat tegangan sisa penyusutan. Di sisi lain, *steel grit* memberikan kekuatan menengah (15,72 MPa) dengan kecenderungan kegagalan kohesi karena puncak profil mendistorsi homogenitas lapisan, sedangkan *aluminium oxide* berada pada posisi terendah (13,34 MPa) akibat dominasi kegagalan adhesi yang dipicu oleh terbentuknya *void* (rongga) di area antarmuka.

Meskipun pasir garnet unggul dalam daya lekat, performa mekanis dan ketahanan lingkungannya menunjukkan kelemahan pada aspek lain. Pada pengujian tekuk, spesimen *steel grit* dan *aluminium oxide* mendemonstrasikan fleksibilitas yang sangat baik tanpa adanya kegagalan struktural yang berarti. Sebaliknya, spesimen pasir garnet justru menunjukkan hasil terburuk

karena mengalami inisiasi retak, hal ini dipicu oleh tingginya ketebalan lapisan TSA yang membebani lapisan dengan tegangan internal. Lebih lanjut, dari segi ketahanan korosi, laju korosi terendah ditemukan pada spesimen *steel grit* (0,93934 mm/tahun), yang kemudian disusul oleh *aluminium oxide* (1,32910 mm/tahun) karena minimnya keberadaan garam terlarut serta nilai konduktivitas yang rendah. Sebaliknya, spesimen yang menggunakan pasir garnet mengalami laju korosi tertinggi hingga mencapai 3,9429 mm/tahun, sebuah degradasi yang diakibatkan oleh kehadiran ion klorida dari residu pasir tersebut yang secara signifikan memicu peningkatan nilai konduktivitas.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis merumuskan beberapa rekomendasi komprehensif guna menyempurnakan studi lanjutan. Evaluasi kekuatan ikatan adhesi sebaiknya diperluas melalui pengujian *pull-off* dalam kondisi basah, mengingat operasional aktual material ini berada pada lingkungan terendam. Analisis mendalam pada struktur mikro juga direkomendasikan menggunakan karakterisasi *scanning electron microscope* (SEM) untuk memetakan *anchor pattern* serta mengkuantifikasi rasio *void* secara presisi. Selanjutnya, untuk menguji ketahanan mekanis antarmuka lapisan TSA pada substrat baja, studi mendatang perlu menginkorporasikan pengujian tekuk berulang serta pembebanan kejutan guna mengidentifikasi batas leleh dan resistensi perambatan retak. Di samping itu, pemahaman holistik terkait laju dan bentuk korosi dapat dicapai melalui variasi pH larutan serta suhu media, sehingga fenomena kegagalan material di kondisi lingkungan yang dinamis dapat terpetakan dengan baik. aspek fundamental lain yang patut ditelaah lebih lanjut adalah pengaruh kandungan garam terlarut pada material abrasif terhadap kualitas akhir pelapisan. Sebagai tahapan penyempurnaan, pengaplikasian *sealer* pasca pelapisan sangat disarankan pada pengujian berikutnya guna merepresentasikan metode proteksi yang sebenarnya dan menghasilkan data pengujian yang lebih valid.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Pratikno, R. D. Mulya, and W. L. Dhanistha, "Analysis of Abrasive Materials dan Air Pressure Variations for Thermal Spray Aluminum Coating on Adhesion Strength and Corrosion Resistance in Seawater Environment," *International Journal of Offshore and Coastal Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2025, doi: [10.12962/j225800914.v9i1.4467](https://doi.org/10.12962/j225800914.v9i1.4467).
- [2] L. Thakur and H. Vasudev, *Thermal Spray Coatings*. Florida: Taylor & Francis Group, 2021, doi: [10.1201/9781003213185](https://doi.org/10.1201/9781003213185).
- [3] M. A. S. Anam, P. Manik, and G. Rindo, "Analisis Pengaruh Material Abrasif Pada Blasting Dengan Variasi Metode Coating Terhadap Prediksi Laju Korosi Dan Daya Rekat Adhesi," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 12, no. 2, pp. 1–11, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [4] C. Trijatmiko, H. Pratikno, and A. Purniawan, "Analisa Pengaruh Material Abrasif Pada Blasting Terhadap Kekuatan Lekat Cat dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Air Laut," *Jurnal Teknik ITS*, vol. Vol. 5, No. 2, 2016, doi: [10.12962/j23373539.v5i2.18090](https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18090).
- [5] M. Ridho Alfaridzi, A. Wibawa, B. Santosa, and W. Amiruddin, "Analisis Pengaruh Salinitas Air dan Material Abrasive Blasting Terhadap Laju Korosi Pada Baja ST 45," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 13, no. 3, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.
- [6] NACE No. 12, "Specification for the Application of Thermal Spray Coating (Metallizing) of Aluminium, Zinc, and Their Alloys and Composites for the Corrosion Protection of Steel," 2016, *NACE International*.
- [7] ISO 8501-1, "Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Product - Visual Assessment of Surface Cleanliness," 2007, *International Standard Organization*.
- [8] ISO 8503-2, "Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products-Surface Roughness Characteristics of Blast-Cleaned Steel Substrates-," 2012.
- [9] ISO 8502-9, *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products. Tests for the Assessment of Surface Cleanliness. Part 9: Field Method for the Conductometric Determination of Water-Soluble Salts*. British Standards Institution, 2020.
- [10] ISO 19840, "Paints and Varnishes Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems Measurement of, and Acceptance Criteria For, the Thickness of Dry Films on Rough Surfaces," 2012. [Online]. Available: www.iso.org
- [11] NORSOK M-501, "Surface Preparation and Protective Coating," *NORSOK, Annex 2A*, 2022.
- [12] ASTM D 4541, "Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," Aug. 01, 2017, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [10.1520/D4541-17](https://doi.org/10.1520/D4541-17).
- [13] ASTM G 102, "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements," 2015, *ASTM International*. doi: [10.1520/G0102-89R15E01](https://doi.org/10.1520/G0102-89R15E01).

- [14] S. Brossard, "Microstructural Analysis Of Thermal Spray Coatings By Electron Microscopy," 2010. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00492966v1>, doi: [10.3390/coatings15101216](https://doi.org/10.3390/coatings15101216).
- [15] C. A. Zimmermann, L. A. D. Koslowski, M. I. S. Araújo, and M. L. L. Silveira, "The influence of soluble salts content on the performance of an epoxy coating system via accelerated corrosion tests," *Revista Materia*, vol. 25, no. 2, pp. 1–14, 2020, doi: [10.1590/S1517-707620200002.1048](https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1048).