



## Pengaruh Penggunaan Ulang *Copper Slag* Pada Proses *Blasting* Terhadap Kekasaran Permukaan Pelat Badan Kapal

Muhammad Ilham Dermawan, Tri Agung Kristiyono, Bagus Kusuma Aditya, Nur Yanu Nugroho, Bagiyo Suwasono  
Departement of Naval Architecture and Shipbuilding Engineering, Hang Tuah University, Indonesia  
[\\*tri.agung@hangtuah.ac.id](mailto:tri.agung@hangtuah.ac.id)

### Abstract

The blasting process in the shipping sector aims to remove dirt, rust and factory scale from the surface of the plate and to create roughness on the surface so that the paint layer can adhere well. In the blasting process, abrasive materials are generally used once or twice. However, in field practice, reuse of copper slag has been used as an abrasive material. This study aims to analyze the surface roughness level of the plate during the blasting process using the Analysis of Variance (ANOVA) method with variations in the use of new copper slag, used copper slag 1 and 2 as abrasive materials that meet the cleanliness standard of ISO 8501-1 SA 2.5 and the surface roughness standard according to IMO-PSPC (Performance Standard for Protective Coatings) with a surface roughness level of 35  $\mu\text{m}$  – 75  $\mu\text{m}$ . From the results of data analysis, it shows that the reuse of copper slag during the blasting process, the roughness level obtained is getting smaller. Therefore, the surface roughness level that meets the IMO-PSPC standard which ranges between 35 $\mu\text{m}$ -75 $\mu\text{m}$  is reused copper slag 2 and while the maximum limit of the plate surface roughness level that meets the IMO-PSPC criteria is used copper slag 3.

**Keywords:** Blasting, copper slag, surface roughnes, ANOVA, IMO PSPC

## 1. PENDAHULUAN

Dalam sektor kelautan dan *offshore*, baja adalah material yang paling umum digunakan untuk pengembangan struktural karena memiliki kekuatan tinggi dan ketersediaannya yang melimpah. Namun, baja sangat sensitif terhadap korosi akibat terpapar lingkungan laut yang keras [22]. Di industri perkapalan, ada dua tahapan penting, yakni pembangunan kapal baru (*shipbuilding*) dan proses perbaikan (*repair/docking process*) yang membutuhkan penghilangan kotoran dan karat dari permukaan plat baja. Agar dapat dilakukan proses selanjutnya ataupun pengecatan, maka dari itu diperlukan proses *blasting*. [3] Metode *blasting* memberikan hasil pembersihan permukaan yang baik dengan tingkat produktivitas yang tinggi sekitar (7-8m<sup>2</sup>/h). Proses *blasting* digunakan untuk mengikis korosi yang diakibatkan oleh oksidasi antara air laut dan udara, membersihkan *mill scale* (pelat baru), dan memberi kekasaran permukaan material agar dapat mencapai tingkat perekatan yang baik antara material dengan zat pelapis pada proses pengecatan [1]. Kemudahan yang ditawarkan dari proses *blasting* adalah kecepatan pengerjaan dan *flexibility* dalam mengikuti bentuk benda kerja yang berlekuk rumit dari proses pembentukan benda kerja. Hal-hal yang menentukan hasil *blasting* antara lain adalah faktor manusia, tekanan udara untuk penembakan, serbuk besi yang digunakan, waktu penembakan, dan jarak penembakan. *Blasting* terbagi menjadi 2 jenis yaitu *dry blasting* (*blasting* kering) dan *wet blasting* (*blasting* basah). *Dry blasting* biasanya diaplikasikan ke benda – benda berbahan logam yang tidak beresiko terbakar, seperti untuk pembersihan korosi atau pelepasan lapisan cat. Sedangkan *wet blasting* diaplikasikan ke benda – benda berbahan logam yang beresiko terbakar atau terletak di daerah yang beresiko terjadi kebakaran, seperti di tangki bahan bakar, kilang minyak (*offshore*), pom bensin. Dalam metode *wet blasting* pasir yang digunakan untuk menyemprotkan ke benda dicampur dengan bahan kimia khusus anti karat yang berguna untuk meminimisir percikan api saat pasir bersentuhan dengan logam saat proses *blasting* [9].



Keberhasilan dari proses *coating* sangat tergantung pada proses *surface preparation*, dimana proses ini akan mempengaruhi kekuatan *adhesi* dari material. [12] Salah satu teknik dari *surface preparation* yang umum digunakan dalam dunia industri adalah *blasting*. Proses ini merupakan pembersihan permukaan dengan cara menembakan material abrasif ke suatu permukaan material dengan tekanan tinggi sehingga menimbulkan gesekan/ tumbukan. Permukaan material tersebut akan menjadi bersih dan kasar. Pemilihan dan penggunaan material abrasif yang tepat akan menambah daya lekat cat. [5] Proses pelapisan zat atau pengecatan penting dilakukan pada permukaan plat baja untuk mencegah korosi pada plat baja. [23] Cat adalah bahan pelapis yang memiliki tiga fungsi utama yaitu dekorasi, memperkuat daya rekat, dan melindungi permukaan objek dari lingkungan korosif. Komponen dasar cat terdiri dari empat elemen: pengikat, pigmen, pelarut/pengencer, dan aditif [18].

Tingkat kekasaran permukaan benda kerja yang akan dilakukan pelapisan adalah sangat penting, mengingat tingkat kekasaran akan sangat berpengaruh terhadap daya lekat bahan pelapis terhadap logam yang akan dilapisi. Tingkat kekasaran akan dipengaruhi oleh sifat mekanis logam dan proses pengerjaan yang dilakukan [2], sehingga menghasilkan *profile* (kekasaran) pada hasil permukaan benda kerja setelah dilakukan proses *blasting* tersebut. Dimana ukuran dari material abrasif ini sangat berpengaruh terhadap profil kekasaran yang di hasilkan [11]. Berdasarkan [4] Biro Klasifikasi Indonesia peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) pada vol G “*Guidance for Coating performance Standards*” section 3 sub- bab *coating inspection agreement* yang merujuk bahwa standar kebersihan dan tingkat kekasaran permukaan untuk plat badan kapal mengikuti standar IMO PSPC (*Performance Standard for Protective Coatings*) ANNEX 1 pada paragraf 2 bahwa tingkat kebersihan permukaan harus mencapai standar ISO 8501-1 SA 2,5 [15] dan tingkat kekasaran permukaan yang dicapai antara 30  $\mu\text{m}$  hingga 75  $\mu\text{m}$ .

Pada umumnya *blasting* menggunakan pasir silika sebagai material abrasif. Namun seiring waktu penggunaan pasir silika dialihkan ke material abrasif lainnya. Hal ini dikarenakan pasir silika mengandung unsur logam berat melebihi baku mutu berdasarkan PP No.101 Tahun 2014 sehingga tergolong sebagai bahan berbahaya dan beracun (B3) *fly ash* dari pasir silika dikategorikan limbah beracun dan berbahaya oleh Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal) [8]. *Blasting* dapat menjadi proses berbahaya karena dapat menghasilkan partikel di udara yang berbahaya jika terhirup, dan juga dapat menghasilkan debu dan serpihan dalam jumlah yang signifikan. Tindakan pencegahan keselamatan yang tepat, termasuk penggunaan pakaian pelindung, perlindungan pernapasan, dan tindakan pengendalian, sangat penting saat melakukan operasi *blasting*. [20] Proses *blasting* yang dilakukan di luar ruangan akan menghasilkan polusi debu di atmosfer yang sangat berisiko bagi ekosistem, terutama terkait dengan kesehatan para pekerja di area sekitarnya. Partikel debu yang diciptakan akan terdispersi dalam udara sesuai arah angin hingga menjangkau wilayah di luar pelabuhan dan tempat pembuatan kapal. Partikel yang paling berbahaya, dengan ukuran kurang dari 2,5  $\mu\text{m}$ , dapat memicu penyakit saluran pernapasan seperti batuk, pilek, dan nyeri tenggorokan, serta mengganggu fungsi paru-paru yang dapat meningkatkan risiko penyakit jantung. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemaran Udara untuk Nilai Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan, maka industri pelabuhan dan tempat pembuatan kapal harus memperhatikan sejauh mana penyebaran partikel debu di udara akibat kegiatan sandblasting yang berpotensi merugikan lingkungan, khususnya bagi pekerja di area pelabuhan dan tempat pembuatan kapal serta lingkungan sekitarnya [24]. Paparan *fly ash* dari pasir silika tersebut jika terhirup secara terus-menerus dapat menyebabkan terjadinya silikosis pada paru-paru manusia [18].

Pada tahun 1983, Shaman memperkirakan bahwa lebih dari satu juta pekerja AS berisiko terkena silikosis dan lebih dari 100.000 pekerja ini bekerja sebagai tukang peledakan pasir. Karena potensi bahayanya terhadap kesehatan, NIOSH telah merekomendasikan agar penggunaan pasir silika (atau zat yang mengandung lebih dari 1% silika kristal) dilarang digunakan sebagai bahan abrasif peledakan dan agar bahan yang kurang berbahaya digunakan sebagai pengganti. Sebagai bagian dari rekomendasi ini, NIOSH mengidentifikasi bahan abrasif terak metalurgi, seperti *copper slag*, sebagai pengganti pasir silika yang dapat diterima. Meskipun NIOSH melaporkan terak metalurgi hanya digunakan di 3,1 persen fasilitas yang melakukan peledakan abrasif, peningkatan penggunaannya telah diakui dalam literatur lain. [6] Maka diperlukan alternatif pengganti pasir silika sebagai material abrasif, salah satunya adalah *copper slag*. Selama ini telah banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui sifat-sifat *copper slag* dalam operasi peledakan. Material ini merupakan aplikasi pembersihan yang cepat dan penghematan material karena produk dapat digunakan kembali beberapa kali. *Copper slag* merupakan salah satu bahan peledakan yang paling diminati di Eropa dan diperkenalkan pertama kali pada tahun 1960 dan sejak saat itu *copper slag* banyak digunakan untuk menghilangkan karat, lapisan cat



lama, dan lapisan yang terkontaminasi pada permukaan logam, batu, beton, bata, terutama dalam industri logam, otomotif, pembuatan kapal, dan petrokimia.

*Copper slag* telah digunakan di industri perkapalan sebagai material abrasif pada proses *blasting* terhadap permukaan material plat badan kapal. Sifat fisik dan kimia merekomendasikan material ini sebagai salah satu bahan peledak yang paling efektif, yang dapat digunakan pada hampir semua jenis permukaan, baik di dalam maupun di luar ruangan. *Copper slag* merupakan produk yang ekologis dan tidak beracun (kandungan silika bebas < 0,1%). [13] yang menetapkan spesifikasi teknis *copper slag* sebagai media abrasif non-logam yang aman dan efektif dan [14] yang menjamin bahwa *copper slag* telah diuji dan lulus metode uji standar internasional terkait kualitas, komposisi kimia, kekerasan, dan keamanan penggunaannya dalam proses *blasting*. *Copper slag* merupakan pilihan yang populer untuk peledakan abrasif karena kecepatan pemotongannya yang cepat dan kadar debu yang rendah. Jika dibandingkan dengan terak batu bara, *copper slag* memiliki kepadatan yang lebih tinggi (sekitar 20%) dan dapat didaur ulang berkali-kali.

Hal ini menjadikan *copper slag* sebagai pilihan yang lebih hemat biaya, karena menghasilkan peledakan yang lebih cepat dan mengurangi konsumsi produk. [25] Untuk mengetahui efisiensi *copper slag* sebagai bahan *blasting*, yang meliputi luas area yang dibersihkan per jam, dan konsumsi abrasif untuk membersihkan permukaan acuan [16]. [21] menyatakan bahwa penggunaan material abrasif hanya sekali pakai, yang artinya sisa pemakaian pertama akan dibuang. Material abrasif bekas ini memiliki beberapa pilihan untuk digunakan kembali diantaranya dapat digunakan kembali sebagai material abrasif proses *blasting*, material bangunan, material konstruksi jalanan, dan diolah menjadi limbah tidak berbahaya. Universitas New Orleans, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan. Dianggap bahwa *copper slag* merupakan material peledakan yang sangat efisien, dengan sifat yang sangat baik untuk membersihkan dan meledakkan berbagai jenis permukaan. Karena merupakan produk yang ekologis, terak tembaga dapat berhasil digunakan dalam peledakan di ruang terbuka, dengan dampak minimal terhadap lingkungan. Kemungkinan penggunaan kembali material memungkinkan penghematan material.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang bertujuan untuk menyelidiki pengaruh variasi *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2 pada belat baja karbon rendah. Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis, meliputi persiapan material, persiapan material abrasif dan pelaksanaan proses *blasting*, visual inspeksi tingkat kebersihan dengan standar tingkat kebersihan ISO 8501-1 SA 2,5 d, menghitung berat kebutuhan *copper slag* dan menganalisis data. Seluruh pengujian dilakukan dalam lingkungan yang terkendali untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil. Penelitian ini tidak membahas biaya proses *blasting*, dampak lingkungan dan kesehatan manusia.

Justifikasi ukuran sampel merupakan elemen krusial dalam perancangan eksperimen yang efektif. Artikel tentang metodologi menunjukkan bahwa penentuan ukuran sampel perlu didukung oleh bukti ilmiah yang berlandaskan pada tujuan penelitian, kendala teknis, dan faktor-faktor sumber daya — bukan sekadar angka minimum yang umum. Dengan demikian, pengujian yang melibatkan 3 spesimen untuk tiap variasi dalam studi ini dianggap sesuai dengan standar ilmiah selama prosedur pengujian, pengendalian variasi, dan alasan pemilihan jumlah spesimen dijelaskan secara rinci. [7]

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari pelat baja karbon rendah ketebalan 8 mm dimensi panjang 500 mm dan lebar 500 mm, yang dipilih karena aplikasinya yang luas pada struktur kapal. Proses *blasting* dilakukan dengan menggunakan nozle, tekanan dan sudut tembak yang sama dengan variasi *copper slag* penggunaan baru, *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2 dengan standar kebersihan sesuai dengan ISO 8501-1 SA 2,5 dan standar tingkat kekasaran permukaan pelat yang telah ditetapkan IMO - *Performance Standard for Protective Coatings* (PSPC) antara 30 hingga 75 mikron.

### 2.1. Persiapan Material dan Peralatan

Persiapan material melibatkan pemotongan pelat baja menjadi 6 bagian yang kemudian dikelompokkan berdasarkan variasi *copper slag* yang diinginkan. Setiap kelompok mewakili parameter *copper slag* tertentu, memastikan perbandingan yang konsisten di semua variabel uji. Aplikasi dilakukan menggunakan sistem semprot udara konvensional dengan nozel standar dan pengaturan kompresor. Bahan ditunjukkan pada Gambar 1, mengilustrasikan spesimen yang disiapkan untuk proses *blasting*.

Peralatan inspeksi meliputi:

- Alat *Elcometer* 319 (alat untuk menghitung kelembapan area).



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- Alat *Dry Abrasive Blast Cleaning*.
- Wadah material abrasif bekas.
- Timbangan digital.
- *Roughness meter* (alat uji kekasaran).
- *Stopwatch*.
- Pelat baja ASTM A36 500 mm x 500 mm x 8 mm.
- Material abrasif *copper slag*.



(a). Spesimen copper slag baru



(b). Spesimen copper slag penggunaan ulang-1



(c). Spesimen copper slag penggunaan ulang-2

Gambar 1. Material baja ringan grade A yang digunakan untuk setiap variasi copper slag

## 2.2. Persiapan Material Abrasif

Copper slag adalah material abrasif yang lazim dipakai dalam proses blasting di sektor perkapalan karena memiliki tingkat kekerasan yang tinggi, bentuk partikel yang tajam, serta efektif dalam membersihkan permukaan baja. Dalam kajian ini, copper slag diterapkan dalam tiga variasi, yaitu copper slag baru, copper slag yang digunakan kembali untuk pertama kali, dan copper slag yang digunakan kembali untuk kedua kalinya. Perbedaan dalam variasi penggunaan copper slag mengakibatkan perubahan pada karakteristik fisik partikel, terutama pada ketajaman dan ukuran butirannya. Semakin sering copper slag digunakan, partikel tersebut akan mengalami proses pengikisan akibat benturan berulang selama proses blasting, sehingga berdampak pada kemampuan pembersihan dan pembentukan profil kekasaran permukaan. Data copper slag dijelaskan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data material abrasif copper slag

Jenis Abrasif	Range size partikel	Kondisi fisik	Keterangan
Copper slag penggunaan baru	0,50 – 2,36 mm atau 200 $\mu\text{m}$ – 2360 $\mu\text{m}$	Butiran tajam, ukuran seragam	Material baru belum digunakan
Copper slag penggunaan ulang -1	0,50 – 2,00 mm atau 150 $\mu\text{m}$ – 2000 $\mu\text{m}$	Sudut butiran mulai tumpul	Hasil blasting pertama
Copper slag penggunaan ulang -2	0,20 – 1,50 mm atau 100 $\mu\text{m}$ – 1500 $\mu\text{m}$	Butiran lebih tumpul, ukuran lebih kecil	Hasil blasting kedua



(a). Material abrasif copper slag



(b) Jenis - jenis copper slag

Gambar 2. Material abrasif copper slag yang digunakan pada proses blasting

### 2.3. Persiapan Lingkungan

Sebelum dilakukan proses *blasting*, temperatur udara basah dan udara kering dihitung dengan alat *elcometer* selama 2 menit. Selisih dari temperatur udara basah dan kering dimasukkan *Dew point* (DP) dan *Relatif Humidity* (RH) untuk mendapatkan nilai *Dew point* (DP) dan *Relatif Humidity* (RH). Kondisi lingkungan dipastikan agar kelembaban relatif di bawah 85% dan temperature substrat lebih besar 3°C dari titik embun (*Dew Point*). Gambar 2 memberikan representasi visual pada proses pengukuran kelembapan suhu area.



Gambar 3. Hasil pengukuran suhu kelembapan area

### 2.4. Proses *Blasting*

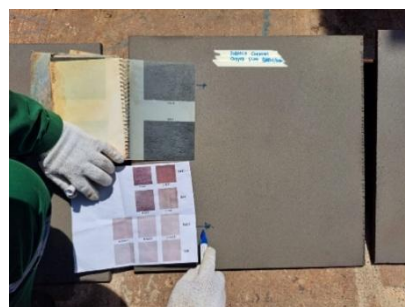
Proses *blasting* dilakukan dan dihitung waktu proses menggunakan *stopwatch* untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan hingga tercapai kebersihan permukaan SA 2,5 sesuai standar ISO 8501-1. Material bekas hasil *blasting* yang pertama dikumpulkan dalam wadah dan diayak tetapi, pada galangan kapal ini sudah melewati proses tersebut sehingga material abrasif bekas sudah *ready stok* pada workshop. Setelah itu melakukan kembali proses *blasting* terhadap spesimen lain dengan material abrasif penggunaan ulang 1 dan dilanjutkan dengan material abrasif penggunaan ulang 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar ini secara visual menggambarkan proses *blasting*.



Gambar 4. Proses *blasting* pada spesimen pelat

### 2.5. Visual Inspeksi Hasil *Blasting*

Setelah proses *blasting* dilanjutkan dengan melakukan inspeksi hasil *blasting* secara visual dengan cara membandingkannya terhadap standar ISO: 8501-1 1988 “*Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Cleanliness*”. Tingkat kebersihan yang diinginkan yaitu SA 2,5 (*very through blast cleaning*) yang ditampilkan pada Gambar 4, yang secara visual proses visual inspeksi pada tingkat kebersihan sesuai dengan standar ISO 8501-1 SA 2,5



Gambar 5 Proses inspeksi tingkat kebersihan dilakukan oleh inspektor sesuai standar ISO 8501-1 SA 2,5



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## 2.6. Pengukuran Kekasaran Permukaan Pelat

Pengukuran kekasaran permukaan spesimen hasil *blasting* dilakukan dengan alat *roughness meter*. Tingkat kekasaran permukaan pelat ini akan berpengaruh terhadap hasil *coating*, sehingga perlu diperhatikan dengan teliti. Kekasaran permukaan memiliki bentuk seperti lembah dan bukit kecil dalam jumlah yang banyak karena terbentuk sebagai hasil dari tembakan material abrasif dalam kecepatan yang tinggi dan kekuatan yang besar. Pengukuran ini mengacu pada standar yang telah ditetapkan oleh IMO - *Performance Standard for Protective Coatings* (PSPC) 30 hingga 75  $\mu\text{m}$  (*mikron*) yang ditunjukkan pada Gambar 5, yang memberikan referensi visual tentang bagaimana proses pada saat pengukuran tingkat kekasaran permukaan pelat



(a) Proses pengukuran tingkat kekasaran permukaan menggunakan alat roughness meter dan replica tape



(b) Hasil dari setelah dilakukan pengukuran tingkat kekasaran permukaan pelat

Gambar 6 Proses pengukuran tingkat kekasaran permukaan pelat yang dilakukan oleh inspektur

## 2.7. Pengolahan Data

Dalam penelitian ini menggunakan analisis *Analysis of Variance* (ANOVA). Teknik ini berfungsi untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar rata-rata dari tiga kelompok atau lebih berdasarkan satu variabel bebas. Sebelum dilakukan kedua penelitian tersebut, data harus melewati tahapan uji *normalitas*. Analisis data menggunakan *software IBM SPSS statistic 27*. Setelah pengujian *normalitas* dilakukan dan memenuhi nilai probabilitas ( $> 0.05$ ), maka dilanjutkan pengujian *homogenitas*. Uji *homogenitas* adalah pengujian statistik yang dilakukan untuk menilai kesamaan variasi antara dua kelompok atau lebih. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah data pada masing-masing kelompok memiliki variabilitas yang seragam. Uji ini penting dilakukan sebelum membandingkan rata-rata antar kelompok, karena asumsi *homogenitas* varians menjadi syarat dalam berbagai analisis statistik, termasuk uji *Analysis of Variance* (ANOVA). Hasil dari uji ini menjadi dasar dalam menentukan kelayakan penggunaan metode analisis tertentu. Pada SPSS uji ini dilakukan dengan uji *Levene*, dimana pedoman pengambilan keputusannya adalah sebagai berikut:

- Jika nilai sig.  $< 0.05$  maka data berasal dari populasi yang mempunyai varians tidak sama.
- Jika nilai sig.  $> 0.05$  maka data berasal dari populasi yang mempunyai varians sama.

Setelah pengujian *Analysis of Variance* (ANOVA) dilakukan uji lanjutan yaitu uji *post hoc* atau uji beda yang dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui secara spesifik pasangan kelompok mana yang terbaik secara signifikan. Uji *post hoc* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Tukey HSD*. Uji *post hoc* hanya dilakukan jika hasil ANOVA signifikan ( $p < 0,05$ ) dan pemilihan metode uji harus disesuaikan dengan asumsi dan karakteristik data agar hasilnya valid dan menghindari kesalahan statistik.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil tingkat kekasaran permukaan (*roughness*) pelat dalam proses *blasting* menuju SA 2,5 menunjukkan apakah profil permukaan yang dihasilkan telah memenuhi ketentuan IMO - *Performance Standard for Protective Coatings* (PSPC), yang mensyaratkan profil kekasaran berada pada kisaran 30 hingga 75  $\mu\text{m}$  (*mikron*) untuk memastikan daya lekat *coating* optimal pada struktur kapal. Nilai *roughness* yang berada dalam rentang tersebut menandakan bahwa proses *blasting* tidak hanya mencapai tingkat kebersihan visual ISO 8501-1 SA 2,5, tetapi juga menghasilkan profil jangkar yang memadai sesuai standar pelapisan perlindungan korosi. Sebaliknya, nilai *roughness* yang terlalu rendah dapat menyebabkan *adhesi coating* kurang maksimal, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko konsumsi *coating* berlebih dan potensi cacat



lapisan. Dengan demikian, hasil tingkat kekasaran permukaan pelat menjadi indikator penting kualitas persiapan permukaan dalam memenuhi persyaratan IMO PSPC. Data tentang tingkat kekasaran permukaan pelat yang sudah diperoleh setelah dilakukan pengukuran pada masing-masing spesimen akan disusun dalam Tabel 1.

Tabel 2. Hasil data tingkat kekasaran permukaan pelat

Sample	Kekasaran Permukaan ( $\mu\text{m}$ )
Copper slag penggunaan baru I	130 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan baru II	122 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan baru III	120 $\mu\text{m}$
Rata-rata	124 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 1 I	110 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 1 II	109 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 1 III	100 $\mu\text{m}$
Rata-rata	106 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 2 I	84 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 2 II	66 $\mu\text{m}$
Copper slag penggunaan ulang – 2 III	64 $\mu\text{m}$
Rata-rata	71 $\mu\text{m}$

### 3.1. Hasil Analisis Data Tingkat Kekasaran Permukaan Pelat

Analisis statistik dilakukan untuk menentukan signifikansi pengaruh variasi *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2 terhadap tingkat kekasaran permukaan pelat. Uji *normalitas* dan *homogenitas* dilakukan sebagai evaluasi awal untuk memilih metode statistik yang tepat. Hasil uji *normalitas* disajikan pada Tabel 3, sedangkan hasil uji *homogenitas* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil uji *normalitas* tingkat kekasaran permukaan pelat

Jenis <i>Copper Slag</i>	Test of Normality					
	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
<i>Copper slag</i> penggunaan baru	0.314	3		0.893	3	0.363
<i>Copper slag</i> penggunaan ulang-1	0.353	3		0.824	3	0.174
<i>Copper slag</i> penggunaan ulang-2	0.353	3		0.824	3	0.174

Tabel 4. Hasil uji *homogenitas* tingkat kekasaran permukaan pelat

	Tests of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.	
Based on Mean	2.570	2	6	0.156	
Based on Median	0.240	2	6	0.794	
Based on Median and with adjusted df	0.240	2	3.728	0.798	
Based on trimmed mean	2.140	2	6	0.199	

Ketika data memenuhi asumsi *normalitas* dan *homogenitas*, *Analysis of Variance* (ANOVA) digunakan untuk menganalisis perbedaan antar kelompok. Hasil uji ANOVA untuk data tingkat kekasaran permukaan pelat pada Tabel 5. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi *copper slag* memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap tingkat kekasaran permukaan pelat.

Tabel 5. Hasil uji ANOVA tingkat kekasaran permukaan pelat

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Antar Kelompok	4310.889	2	2155.444	35.991	0.000
Dalam Kelompok	359.33	6	59.889		
Total	4670.222	8			

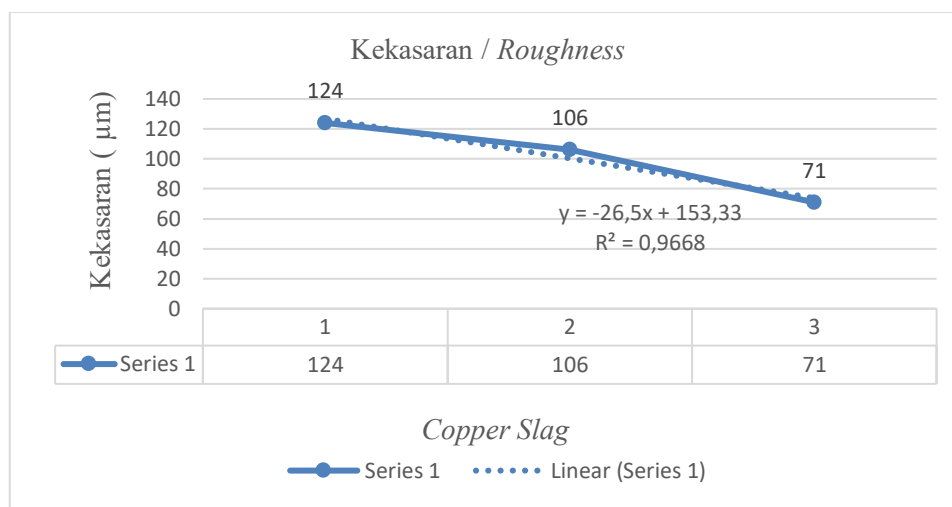


Selain itu, hasil uji *post hoc* yang digunakan setelah ANOVA untuk uji tekuk disajikan pada Tabel 6, yang menunjukkan kelompok spesifik mana yang menunjukkan signifikansi perbedaan

Tabel 6. Hasil uji post hoc tingkat kekasaran permukaan pelat

Post hoc			
Tukey HSDa			
Nilai Kekasaran	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Copper slag penggunaan ulang-2	3	71.3333	
Copper slag penggunaan ulang-1	3	106.3333	106.3333
Copper slag penggunaan baru	3		124.000
Sig.		1.000	0.070

Secara keseluruhan, analisis ini menegaskan bahwa variasi *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2 merupakan parameter penting yang memengaruhi tingkat kekasaran permukaan pelat. Tingkat kekasaran permukaan pelat yang optimal dicapai pada *copper slag* penggunaan ulang-1, sementara tingkat kekasaran permukaan pelat yang lebih tinggi teramati pada *copper slag* penggunaan baru. Oleh karena itu, pemilihan variasi *copper slag* yang tepat sangat penting untuk menyeimbangkan tingkat kekasaran permukaan pelat pada proses *blasting*. Hasil ini juga digambarkan secara grafis pada Gambar 7.



Gambar 1. Hasil grafik diagram fungsi tingkat kekasaran permukaan pelat

Pada Gambar 1 yang dilampirkan ditunjukkan bahwa dalam persamaan  $Y = -26.5x + 153.33$   $R^2 = 0.9668$  dimana variabel (X) mencakup *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2. Sementara itu, tingkat kekasaran permukaan pelat sebagai variable persamaan (Y). Diketahui bahwa *copper slag* penggunaan baru dengan kondisi range size particle sebesar 0,50 – 2,36 mm atau 200 µm – 2360 µm [16] menghasilkan tingkat kekasaran permukaan pelat sebesar 124 µm, *copper slag* penggunaan ulang-1 dengan kondisi range size particle sebesar 0,50 – 2,00 mm atau 150 µm – 2000 µm [17] memperoleh tingkat kekasaran permukaan pelat sebesar 106 µm dan *copper slag* penggunaan ulang-2 dengan kondisi range size particle sebesar 0,20 – 1,50 mm atau 100 µm – 1500 µm [10] menghasilkan tingkat kekasaran permukaan pelat sebesar 71 µm. Berdasarkan dengan standar tingkat kekasaran IMO-PSPC 35 µm – 70 µm, dengan ini hasil tingkat kekasaran yang memenuhi standar adalah *copper slag* penggunaan ulang-2, mengikuti persamaan  $Y = -26.5x + 153.33$   $R^2 = 0.9668$  dimana batas maksimum tingkat kekasaran permukaan yang memenuhi standar copper slag penggunaan ulang-3 dengan kondisi range size particle sebesar 0,20 – 1,40 mm atau 100 µm – 1000 µm [10]. Dengan demikian tingkat kekasaran permukaan pelat yang dihasilkan pada *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang-1 melebihi standar yang ditetapkan oleh IMO - Performance Standard for Protective Coatings (PSPC) yaitu antara 35 µm hingga 70 µm.

Tingkat kekasaran permukaan pelat yang terlalu tinggi ini dapat menyebabkan peningkatan konsumsi cat, menciptakan ketidakmerataan pada *film coating*, serta memicu kemungkinan terjadinya korosi lebih awal



karena adanya area profil yang tidak terisi dengan baik. Sementara itu, penggunaan kedua dari copper slag menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang memenuhi kriteria IMO – Performance Standard for Protective Coatings (PSPC), yang berada pada rentang 35  $\mu\text{m}$ –70  $\mu\text{m}$ . Ini menunjukkan bahwa profil permukaan plat yang dihasilkan sudah optimal untuk memperbaiki daya ikat dari lapisan cat tanpa menyebabkan pemborosan pada bahan cat. Situasi ini menunjukkan bahwa copper slag yang digunakan untuk kedua kalinya dapat menciptakan keseimbangan antara efektivitas proses pembersihan dan kualitas profil permukaan plat. Pemeriksaan kekasaran permukaan adalah elemen yang sangat penting dalam tahap penyediaan permukaan, karena tingkat kekasaran yang ada berdampak besar pada kekuatan perlekatan cat atau lapisan pelindung pada bahan. Proses peledakan menciptakan profil permukaan yang lebih kasar, memungkinkan lapisan cat untuk menempel lebih baik melalui cara penguncian mekanik. [19].

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan penggunaan ulang *copper slag* sebagai material abrasif pada proses *blasting* menunjukkan bahwa ketika *copper slag* digunakan ulang pada proses *blasting* dengan tingkat kekasaran permukaan pelat yang dihasilkan semakin menurun sesuai dengan mengikuti persamaan  $Y = -26.5x + 153.33$   $R^2 = 0.9668$  dimana variabel yang dimasukkan yaitu (X) adalah *copper slag* penggunaan baru dan *copper slag* penggunaan ulang 1 dan 2 dan tingkat kekasaran permukaan adalah variabel (Y). Sementara itu, batas maksimum untuk tingkat kekasaran permukaan yang memenuhi standar IMO-PSPC yang berkisar antara 35  $\mu\text{m}$  – 70  $\mu\text{m}$  adalah *copper slag* penggunaan ulang-3.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andi, H., L & Apriliani, R (2020). *Sandblasting* Pada Kapal MV Berlian Indah. Jurnal Saintara
- [2] As'ad, Muhammad (2008). Pengaruh Tekanan Udara Terhadap Nilai Kekasaran Pada Benda Kerja Plat Dengan Bahan ST 37 Pada Proses Blasting. Skripsi thesis. Universitas Muhammadiyah Surakarta
- [3] Benkovsky, D & T, Swiatecki (1966). *Technology of Ship Repairing*. Moscow : MIR Publisher
- [4] Biro Klasifikasi Indonesia. (2013). *Guidance For Coating Performance Standards*, Vol G : Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Jakarta.
- [5] Carolus Trijatkiko, Herman Pratikno dan Agung Purniawan. (2026). Analisa Pengaruh Material Abrasif Pada Blasting Terhadap Kekuatan Lekat Cat dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Air Laut. Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
- [6] Dale Stephenson, Terry M. Spear & Marie Seymour (2002). *Characterization of the Aerosol Generated During Abrasive Blasting with Copper Slag*, Montana Tech of The University of Montana. USA
- [7] Daniel Lakens. (2022). Sample Size Justification. University of California Press
- [8] Denny, D., & Ashari, L., M. (2018). Studi Komparasi Kelayakan Teknis Pemanfaatan Limbah B3 Sandblasting Terhadap Limbah B3 Sandblasting Dan Fly Ash Sebagai Campuran Beton, *Jurnal Technology Environmental Technology. Sanitary Engineering*
- [9] Febby Hamzah Rosyadi. (2017). Effect Pressure and Grain Size Silica Sand in Blasting Process to Corrosion Rate ASTM A36 steel Department of Mechanical Engineering. University of Brawijaya
- [10] *GritSablare Sustainable Solutions for Blasting & Cleaning*. (2012). 10 Eliza Zamfirescu Leonida Street Bucharest. Romania
- [11] Hadi Rachmat Prasetya. (2017). Effect Of Silica Sand Mesh In Sandblasting Processes On Hydrophobic And Hydrophilic Properties Of AISI 316L Stainless Steel Surface. Department of Mechanical Engineering. Universitas Brawijaya
- [12] Hudson, R. (1982). Surface Preparation for Coating. The National Physical Labotary
- [13] ISO 11126-3. (2018). *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products. Specifications for Non-metallic Blast-cleaning Abrasives*,
- [14] ISO 11127-7. (2022). *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products. Test Methods for Non-metallic Blast-cleaning Abrasives*
- [15] ISO 8501-1. (2011). *Corrosion Protection of Steel Structures by Painting. International Organization for Standardization*
- [16] K. Kambham, S. Sangameswaran, S. R. Datar, dan B. Kura. (2005). *Copper slag Optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting. Journal of Cleaner Production*



- [17] Kepler International Co.,Ltd. (2000). 44/20 Moo 4 Tambol Klongyong, Amphur Phuttamonthon, Nakornpratom, Thailand
- [18] Liza & Salawati. (2017). Silikosis. JKS Jurnal Kedokteran Syiah Kuala
- [19] Moch Miftakhurrohman & Luluk Edahwati. (2024). Analisa Pengaruh Variasi Material Abrasif terhadap Kekasaran Permukaan dan Kekuatan Adhesi pada Baja Karbon Sedang. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
- [20] Novi Anggiat Lasma & Tri Agung Kristiyono. (2023). *Experimental Study on The Effect of Epoxy Zinc and Thinner Ratio on Platform Structure Coating Quality*. Hang Tuah University
- [21] Perkasa, R.E, Gunawan, L, Santosa, S.P dan Afdhal. (2023). A. Mechanical Anisotropy of Cold-Rolled St-37 Steel Plate Under High Strain Rates Loadings. Int. J. Mech. Eng. Technol.
- [22] Qi, C. Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., & Wu, H. (2021). *A Review of Blasting Waste Generation and Management in The Ship Repair Industry*. Journal of Environmental Management
- [23] Soni Rusmana., Tri Agung Kristiyono., Ali Azhar., Intan Baroroh & Didik Hardianto (2025). *Analysis of The Effect of The Second Thickness Layer or Intermediate Layer on The Three Layer System on Adhesion Strength on Carbon Steel Surface*. Hang Tuah University
- [24] Suwasono, B. Putra, I.,K.,A.,S., Kristiyono, T.,A., & Azhar, A. (2021). *Adhesive Coating Value Based on The Main Ingridient Of Ship Paint*. Professional
- [25] Tri Agung Kristiyono, Soemarno, Marjono, Aminudin Afandhi & Dwisetiono. (2025). *Environmental Risks Due to Sand Blasting Dust in Dock and Shipyard Areas Based on Particulate Matter Value*. International Journal on Engineering Applications

