

## PENGARUH VARIASI WAKTU PELAPISAN MANGANESE PHOSPHATE PADA BAJA KARBON ST 42 TERHADAP KETAHANAN KOROSI DAN KETAHANAN AUS

- 1) Universitas Tidar  
Magelang  
2) Dosen Universitas Tidar  
Magelang

Corresponding email<sup>1\*)</sup>:  
[Zegananda07@gmail.com](mailto:Zegananda07@gmail.com)

Received: 27-10-2024

Accepted: 26-04-2025

Published: 28-12-2025

©2025 Politala Press.  
All Rights Reserved.

**Zegananda Putra Arianto<sup>1\*)</sup>, Sri Hastuti<sup>2)</sup>, Xander Salahudin<sup>3)</sup>**

**Abstrak.** Salah satu jenis teknologi rekayasa untuk coating adalah pelapisan manganese phosphate. Jenis pengujian antara lain pengujian Scanning Electron Microscope (SEM), pengujian laju korosi potensiodynamik, dan pengujian keausan universal wear. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental pencelupan spesimen kedalam larutan pelapis manganese phosphate dengan menggunakan variasi waktu pencelupan 15 menit, 20 menit, 25 menit. Nilai ketebalan dalam uji SEM tertinggi pada variasi 20 menit sebesar 50,54  $\mu\text{m}$ , dan terendah pada variasi 25 menit sebesar 25,56  $\mu\text{m}$ . Variasi 20 menit mendapatkan nilai laju korosi terendah dengan nilai 0,004437 mmpy, dan 25 menit mendapatkan nilai tertinggi yaitu 0,016429 mmpy. Nilai laju keausan spesifik pada pengujian universal wear terendah dengan variasi 20 menit sebesar 0,000288 mm<sup>3</sup>/kg.m, dan tertinggi 25 menit sebesar 0,000633 mm<sup>3</sup>/kg.m. Hasil dari penelitian keseluruhan paling baik terdapat dalam pelapisan menggunakan variasi 20 menit. Parameter lama pencelupan pada proses pelapisan manganese phosphate tidak meningkatkan ketebalan, laju korosi, dan nilai keausan spesifik.

**Kata Kunci:** Baja ST 42, Manganese Phosphate, Korosi, Keausan

**Abstract.** One type of engineering technology for coating is manganese phosphate coating. Types of testing include Scanning Electron Microscope (SEM) testing, potentiodynamic corrosion rate testing, and universal wear testing. This study used an experimental method of immersing specimens into a manganese phosphate coating solution using variations in immersion time of 15 minutes, 20 minutes, 25 minutes. The highest thickness value in the SEM test was at a variation of 20 minutes of 50.54  $\mu\text{m}$ , and the lowest at a variation of 25 minutes of 25.56  $\mu\text{m}$ . The 20-minute variation obtained the lowest corrosion rate value with a value of 0.004437 mmpy, and 25 minutes obtained the highest value of 0.016429 mmpy. The lowest specific wear rate value in the universal wear test with a variation of 20 minutes was 0.000288 mm<sup>3</sup>/kg.m, and the highest 25 minutes was 0.000633 mm<sup>3</sup>/kg.m. The results of the overall study were best in coating using a variation of 20 minutes. The parameters of the immersion time in the manganese phosphate coating process do not increase the thickness, corrosion rate, and specific wear value

**Keywords:** ST42 Steel, Manganese Phosphate, corrosion, wear

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v12i2.302>

### 1. Pendahuluan

Penggunaan rantai jangkar pada industri maritim juga mempengaruhi perjalanan kapal. Untuk menemukan cara baru untuk meningkatkan ketahanan material terhadap gesekan dan keausan, penelitian harus terus dilakukan. Pelapisan manganese phosphate pada logam adalah salah satu cara. Selain memainkan peran penting dalam menjaga keutuhan kapal, rantai jangkar juga berfungsi sebagai pelengkap dalam kelangsungan daya tahan kapal.

Namun, di industri saat ini, rantai jangkar hanya melakukan beberapa fungsi, seperti mengetahui kedalaman perairan dan membantu mengimbangi kapal saat bersandar [1]

Material berbahan logam paduan sering digunakan, salah satu contoh yang biasa digunakan adalah tipe besi baja karbon jenis rendah, karena memiliki nilai kandungan karbon yang kurang dari jumlah 0,3 % dan memiliki kadar besi lebih dari 99 %. Pada baja karbon ST 42 memiliki nilai kadar karbon 0,23 % termasuk dalam golongan baja rendah. Keunggulan dari banyaknya penggunaan baja karbon ST 42 adalah karena besi baja tersebut memiliki sifat keuletan, kekuatan yang lumayan tinggi dan sangat mudah diproses oleh mesin, tetapi nilai kekerasannya sangat rendah dan kurang tahan dari keausan [2]

Peneliti mencoba meneliti cara pelapisan manganese phosphate pada baja karbon ST 42, baja karbon rendah yang digunakan untuk menangani masalah material murah. Mereka mencoba mengatasi kekurangan ketahanan korosi dan ketahanan terhadap korosi baja ST 42. Lapisan fosfat digunakan di berbagai industri, termasuk mobil, pesawat, energi nuklir, dan militer. Fosfat juga bisa disebut sebagai proses yang menghasilkan lapisan kristalin yang menyerap minyak dengan ketahanan aus yang tinggi. Dengan menggunakan pelapis ini, bagian baru seperti ring piston, camshaft, linier silinder, gigi diferensial, dan gigi transmisi dapat dimasukkan [3]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan fosfat dapat menghasilkan perubahan signifikan dalam sifat tahan korosi dan keausan material. Efek tersebut dapat terjadi melalui berbagai mekanisme, seperti peningkatan kekuatan antar partikel, pembentukan lapisan pelindung pada permukaan material, atau bahkan perubahan sifat tribologis secara keseluruhan.

Berdasarkan referensi penelitian sebelumnya akan dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi waktu pelapisan manganese phosphate pada baja ST 42 terhadap ketahanan korosi dan *wear resistance*. Serta belum ada penelitian terkait pengaruh waktu pelapisan terhadap ketahanan korosi dan *wear resistance* dan diharapkan dapat mendapatkan hasil yang sesuai dari pelapisan material tersebut yang akan digunakan pada konstruksi yang berhubungan dengan lingkungan air laut seperti rantai jangkar. Variabel yang digunakan yaitu waktu pelapisan selama 15 menit, 10 menit, 25 menit [4].

## 2. Tinjauan Pustaka

Studi tentang pelapisan fosfat menunjukkan bahwa hasilnya bergantung pada berat pelapis, bahan tambahan yang digunakan, dan berpori mikro di alam. Film fosfat diperlukan untuk melindungi logam berat di lapisan. Tingkat porositas lapisan substrat adalah yang paling penting. Persyaratan untuk perlindungan terhadap korosi dan keausan sangat berbeda, jadi tingkat perlindungan yang ideal harus dipertimbangkan dengan hati-hati. Untuk sistem seng fosfat, perlindungan korosi pada porositas harus minimal dan mudah dicapai. Tingkat porositas yang ideal pastinya lebih tinggi dan mungkin bergantung pada morfologi kristal ini terutama diperlukan dalam kondisi terlumasi [1].

Pelarutan kimia fosfat memberikan hasil bahwa kemampuan isolasi lapisan seng fosfat lebih baik daripada mangan fosfat, tetapi porositas mangan fosfat lebih rendah dibandingkan mangan fosfat. Korosi baja fosfat menunjukkan karakteristik bahwa tidak ada difusi dalam larutan asam, difusi dengan panjang terhingga dalam medium netral, dan difusi semi tak terhingga dalam larutan basa. Pelarutan kimia adalah bentuk utama kegagalan lapisan fosfat, yang disebabkan oleh korosi elektrokimia pada substrat. Kemampuan perlindungan lapisan fosfat terutama tergantung pada kinerja penghalang kerja suatu sistem [4].

Pelapisan fosfat menunjukkan bahwa lapisan sampel referensi terbuat dari  $Mn_2.5(HPO)(PO_4)(H_2O)$  (*mangan hydrogen fosfat hidrat*), dengan ukuran Kristal rata rata 100 nm. Rendahnya kualitas pola XRD disebabkan oleh rendahnya kristalinitas dan menghalangi estimasi ukuran kristalit [5]. Dalam hal ini tidak ada ketergantungan yang jelas antara waktu pasivasi dan ukuran kristalit rata-rata diamati. Ukuran kristalit rata-rata kisaran 23-32 nm. Setelah 15 menit merendam sampel, diperoleh ukuran Kristal yang berbeda. Lapisan mangan fosfat diperoleh tanpa proses aktivasi terlihat secara visual. Namun, lapisan tersebut tidak stabil, karena ukuran kristal seperti itu hancur lebih cepat karena kerapuhan lapisan [6].

## 3. Metodologi

### Bahan

Material yang digunakan dalam penelitian ini Baja karbon ST 42 kadar karbon rendah, karena kadar baja karbon rendah adalah <0,3%. Besi (Fe) sebesar 98,40%. Hal ini menunjukkan bahwa baja ST 42 termasuk baja karbon rendah, beberapa unsur pengotor seperti Mn, Mo, dan W dalam kadar relatif kecil dibawah <0,2%. Adapun material pelapisan lainnya berupa *manganese phosphate* [7][8].



Gambar 1. Baja Karbon ST 42



Gambar 2. Manganese Phosphate

### Tahap Penelitian

#### a. Preparasi Sampel

Sampel uji yang digunakan dalam penelitian ini yaitu baja karbon ST 42 dan larutan pelapis manganese phosphate. Sebelum melakukan pelapisan material dipersiapkan terlebih dahulu. Menurut standar SSPC SP 2. Langkah sebelum dilakukannya pelapisan adalah menghilangkan karat, debu, korosi, dan kotoran yang terlihat dengan cara diampelas dan di bersihkan menggunakan lap bersih [9][10]. Setelah itu material baru siap dilapisi menggunakan pelapis dengan suhu antara 90°-98° C agar larutan pelapis sampel dengan sempurna.

#### b. Proses Pelapisan

Proses pelapisan dengan menggunakan larutan pelapis utama *manganese phosphate* dan menggunakan metode celup pada suhu 90°-98° . Proses pelapisan ini menggunakan parameter waktu pada proses pencelupan [11][12]. Waktu yang digunakan yaitu 15 menit, 20 menit, 25 menit. Jumlah spesimen dalam penelitian ini sebanyak 9 buah. Pelapisan dilakukan secara bersamaan per variasi agar mendapatkan hasil lapisan yang sama pada tiap spesimen.



### Gambar 3. Proses Pencelupan Spesimen

#### c. Proses Pengujian

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini berupa pengujian laju korosi dan pengujian keausan. Setelah dilakukan proses preparasi sampel dan proses pencelupan lalu dilakukan pengujian ketebalan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), pengujian laju korosi potensiodinamik dan pengujian keausan menggunakan *universal wear*.

##### 1. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian *scanning electron microscope* (SEM) berfungsi untuk mengamati dan menganalisis hasil ketebalan lapisan *coating*. Standar yang digunakan dalam pemakaian alat ini yaitu mengacu pada standar *ASTM E986-04*. Pada pengujian SEM penampang melintang ini spesimen yang digunakan dipotong 20 mm x 10 mm x 10 mm agar dapat dicekam di dalam pencekam alat uji SEM.

##### 2. Pengujian Korosi Potensiodinamik

Dalam pengujian laju korosi potensiodinamik mempunyai tujuan untuk mengetahui laju korosi material baja karbon ST 42 yang dilapisi *manganese phosphate* menggunakan metode elektrokimia. Persiapan awal spesimen sampai kebersihan spesimen mengacu pada *ASTM G1-90*. Pengujian korosi potensiodinamik ini menggunakan elektroda bantu berupa material karbon, untuk elektroda pembanding yaitu *AgCl* dan elektroda kerja yaitu spesimen yang akan diuji. Elektroda kerja sebagai tempat berlangsungnya reaksi, reduksi, dan oksidasi yang dapat memberikan respon bagi benda yang diuji [13][14].

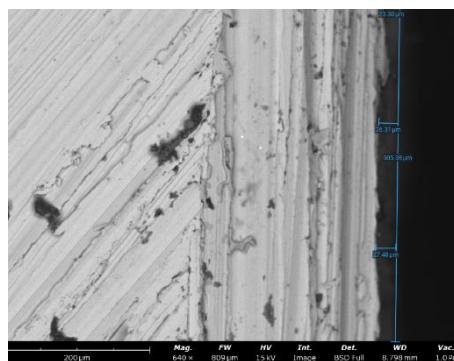
##### 3. Pengujian Keausan *Universal Wear*

Pengujian keausan *universal wear* berfungsi untuk mengetahui besarnya nilai keausan spesifik yang dinyatakan dengan satuan  $\text{mm}^3/\text{kg.m}$ . Proses ini dilakukan dengan menggunakan alat *Ogoshi High Speed Universal Wear Testing Machine* (Type OAT-U). Dalam pengujian ini mengacu pada standar *ASTM D3885*, dimana benda uji digesek dengan diberikan beban sebesar 6,36 kg dari cincin yang berputar dengan lama pengausan selama 1 menit. Pembebatan gesek ini akan menghasilkan kontak antara permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan spesimen. Dalam melakukan pengujian keausan, untuk mengetahui nilai keausan spesifik mengacu pada standar *ASTM D4060*, dimana nilai keausan spesifik dihitung berdasarkan kehilangan berat atau ketebalan lapisan pelapis selama pengujian.

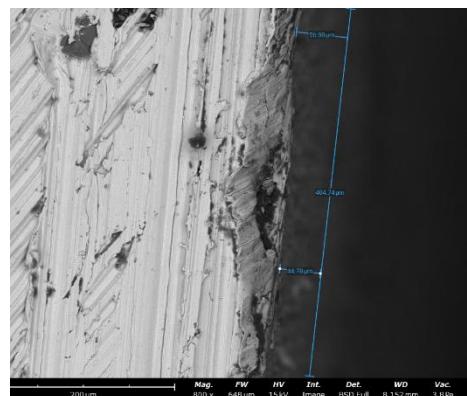
## 4. Hasil dan Pembahasan

### Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

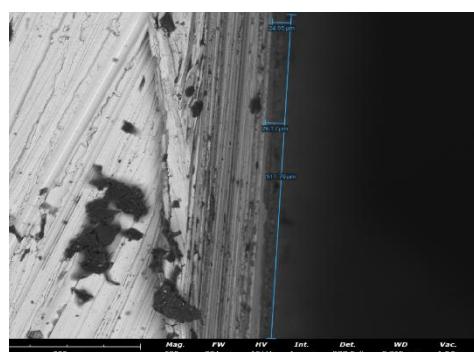
Pengujian SEM ketebalan pelapisan *manganese phosphate* pada baja ST 42 menggunakan perbesaran 600-800 kali. Dalam pengujian dengan perbesaran ini bertujuan untuk mendapatkan ukuran ketebalan lapisan *coating* pada setiap variasi waktu yang digunakan. Penelitian ketebalan ini dilakukan pengukuran pada setiap 2 sampai 3 titik dari setiap variasi diambil yang paling tinggi hingga paling rendah. Data yang diperoleh kemudian diambil rata-rata setiap variasi waktu. Hasil pengamatan SEM penampang melintang ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6.



Gambar 4. Pembesaran 640 kali pada variasi waktu 15 menit

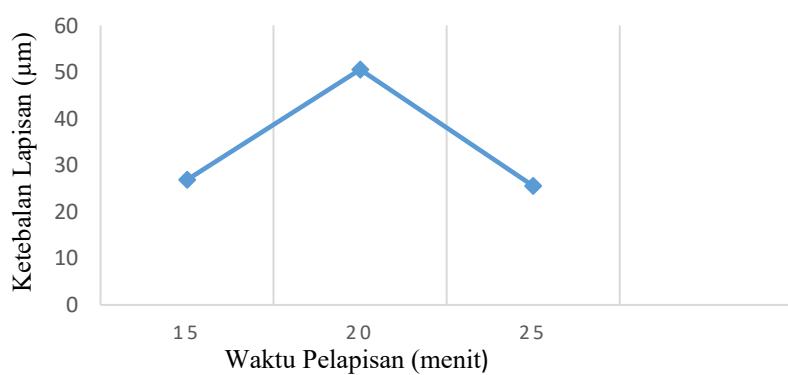


Gambar 5. Pembesaran 800 kali variasi 20 menit



Gambar 6. Pembesaran 630 kali variasi 25 menit

Berdasarkan hasil pengujian SEM dengan memperlihatkan grafik ketebalan lapisan dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut.

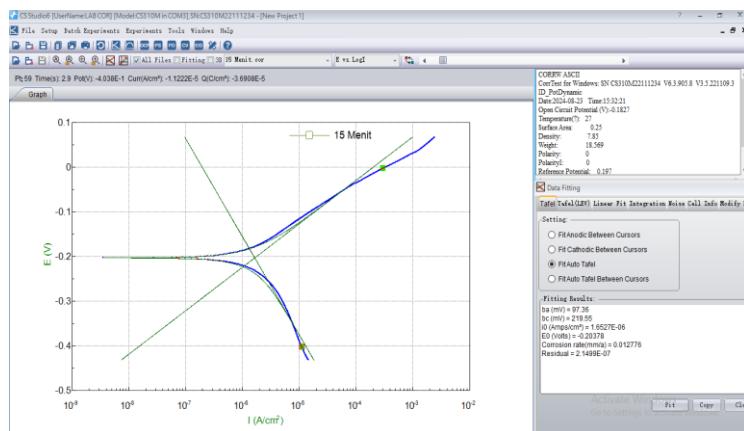


Gambar 7. Grafik ketebalan lapisan

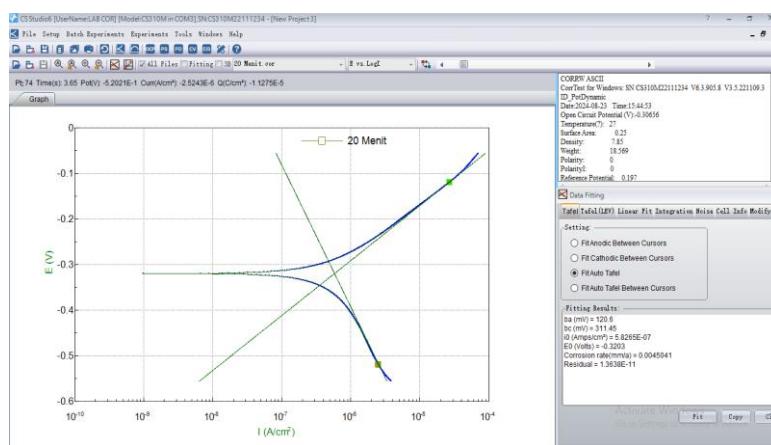
Berdasarkan data hasil pengujian SEM untuk mendapatkan ketebalan tertinggi pada variasi waktu 20 menit yaitu sebesar  $50,54 \mu\text{m}$ . Nilai ketebalan yang terendah yaitu pada variasi waktu 25 menit yaitu sebesar  $25,56 \mu\text{m}$ .

### Pengujian Korosi

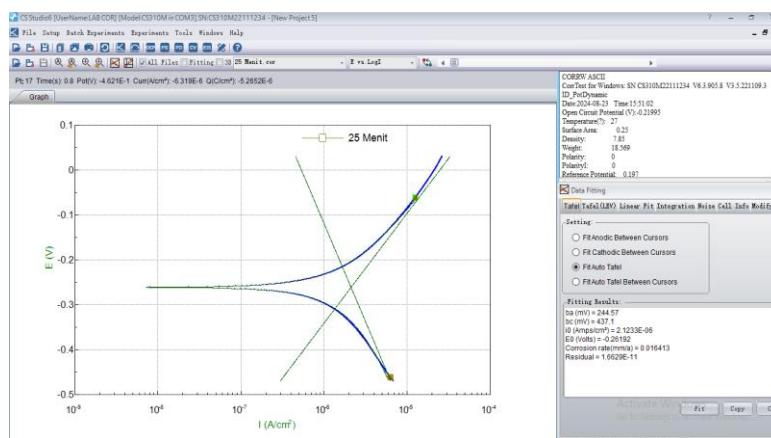
Pengujian laju korosi potensiodinamik ini menggunakan 3 variabel untuk pengujian laju korosinya. Spesimen terdiri dari 3 variasi pencelupan pada waktu pelapisan yaitu variasi 15 menit, 20 menit, dan 25 menit. Hasil data dan grafik dari pengujian korosi potensiodinamik dengan metode elektrokimia yang menggunakan 3,5% NaCl dan aquades sebanyak 300 ml dengan variasi waktu pelapisan 15 menit, 20 menit, dan 25 menit.



Gambar 8. Kurva tafel variasi waktu 15 menit



Gambar 9. Kurva tafel variasi 20 menit



Gambar 10. Kurva tafel variasi 25 menit

Berdasarkan grafik dan data hasil uji laju korosi pada pengujian korosi potensiodinamik diperoleh nilai laju korosi setiap variasi waktu pada Tabel 1.

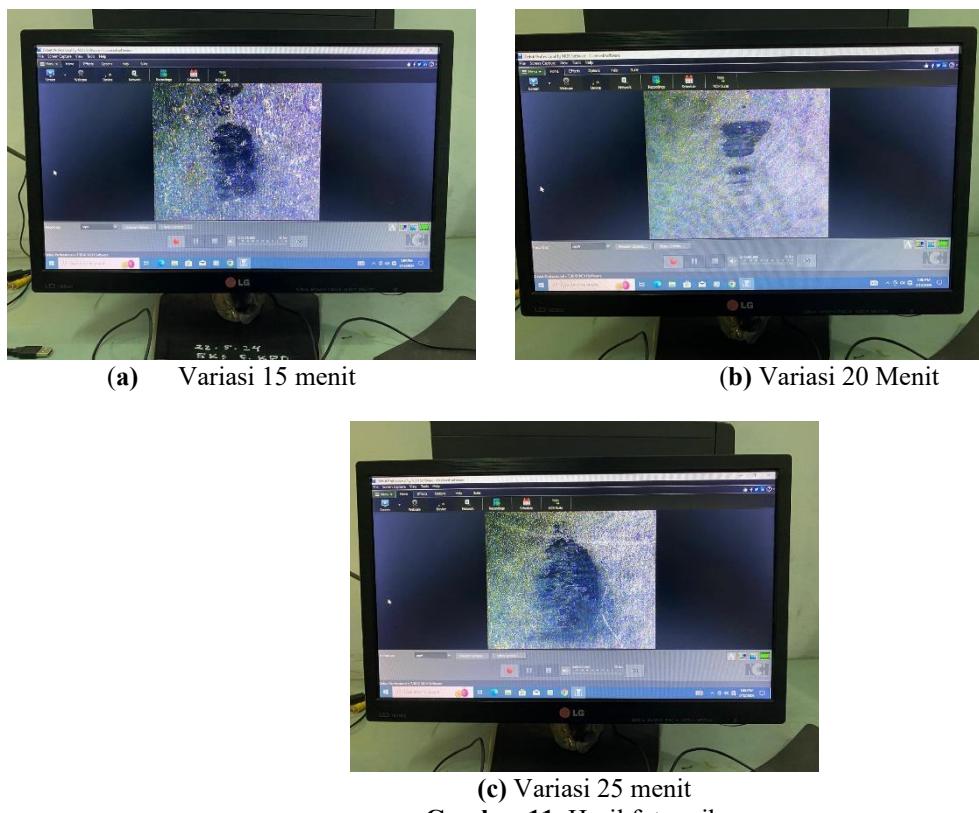
Tabel 1. Hasil pengujian korosi

Waktu (menit)	E <sub>cor</sub> (mV)	I <sub>cor</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	Laju Korosi (mmpy)	Relative Corrosion Resistance
15	-0,20378	0,0000016527	0,01278	Outstanding (< 0.02 mmpy)
20	-0,3203	0,00000058265	0,004437	Outstanding (< 0.02 mmpy)
25	-0,26192	0,0000021233	0,016429	Outstanding (< 0.02 mmpy)

Berdasarkan Tabel 1, pengujian korosi menunjukkan laju korosi paling baik pada variasi 20 menit, dimana nilai laju korosi paling sedikit yaitu mencapai 0,004437 mm/y. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu pelapisan tidak terlalu mempengaruhi nilai laju korosinya, tetapi pada variasi waktu 20 menit menghasilkan pelapisan paling efektif, walaupun di waktu 15 menit dan 25 menit menunjukkan *relative corrosion resistance* yang *outstanding*. Komposisi dalam ketebalan *coating*, [1] menggunakan proses *coating alkyd* terhadap nilai laju korosi suatu baja karbon terhadap lingkungan air laut. Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan suatu pelapis tidak menjamin lapisan menjadi sempurna. Hal tersebut dapat terjadi disebabkan karena adanya kandungan manganese phosphate tidak merata pada saat melapisi ketika perendaman kurang dari 20 menit atau lebih [15]. Hasil penelitian dan nilai laju korosi dapat digunakan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap laju korosi dalam lingkungan tertentu.

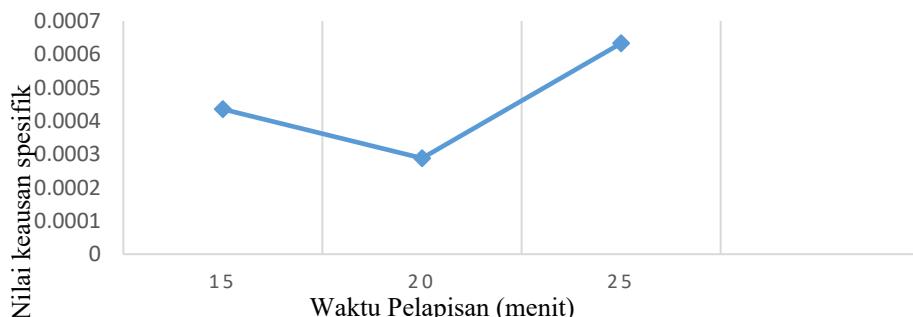
#### Pengujian Wear Resistance

Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Pada pengujian keausan ini menggunakan kode variasi pelapisan yaitu 15 menit, 20 menit, dan 25 menit. Gambar 11 (a,b,c) menunjukkan hasil spesimen.



**Gambar 11.** Hasil foto mikro

Data dari pengujian hasil uji keausan *universal wear* pada variasi 15 menit, 20 menit, 25 menit ditunjukkan pada Gambar 11.



**Gambar 14.** Data hasil uji keausan universal wear

Pengujian keausan menunjukkan nilai keausan spesifik yang paling baik pada variasi Y yaitu 20 menit, dimana nilai keausan spesifik rata-ratanya paling rendah yaitu  $0,000288 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ . Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu pelapisan tidak terlalu mempengaruhi nilai keausan spesifiknya, tetapi pada variasi waktu 20 menit adalah waktu pelapisan paling efektif. Hal ini juga sejalan pada penelitian yang dilakukan [2] mengenai komposisi dalam ketebalan coating, tetapi penelitian ini menggunakan proses *powder flame spray coating* dengan *powder Ni-Cr* terhadap nilai laju keausan suatu baja karbon terhadap ketahanan aus. Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan suatu pelapis tidak menjamin lapisan menjadi sempurna. Hal tersebut disebabkan karena tidak meratanya pelapis saat perendaman di waktu tertentu. Hasil penelitian dan nilai keausan spesifik dapat digunakan untuk mengetahui ketahanan aus suatu material terhadap laju keausan dalam lingkungan tertentu.

## 5. Kesimpulan

Hasil pengujian laju korosi pada *coating* berpengaruh terhadap laju korosi material yang di *coating*, peningkatan waktu proses pelapisan *manganese phosphate* pada baja ST 42 tidak berpengaruh atau memperkecil laju korosi. Nilai laju korosi dengan pengujian korosi potensiodinamik paling rendah terdapat pada variasi waktu 20 menit dengan nilai sebesar  $0,004437 \text{ mm/y}$ . Nilai laju korosi yang tertinggi terdapat pada variasi waktu 25 menit dengan nilai sebesar  $0,016429 \text{ mm/y}$ . Dari hasil pengujian korosi dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu pelapisan tidak terlalu mempengaruhi nilai laju korosinya, tetapi pada variasi waktu 20 menit menghasilkan pelapisan paling efektif, walaupun di waktu 15 menit dan 25 menit menunjukkan *relative corrosion resistance* yang *outstanding*. Hasil dari pengujian *wear resistance* yang menggunakan metode *universal wear* terhadap variasi waktu pelapisan *manganese phosphate* pada baja ST 42 tidak berpengaruh atau memperkecil nilai keausan spesifik. Nilai keausan spesifik pada pengujian *wear resistance* paling rendah terdapat pada variasi waktu 20 menit dengan nilai keausan spesifik rata-rata sebesar  $0,000288 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ . Nilai keausan spesifik pada pengujian *wear resistance* paling rendah terdapat pada variasi waktu 25 menit dengan nilai keausan spesifik rata-rata sebesar  $0,000633 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ .

## 6. Saran

Saran Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi ketebalan lapisan dan kondisi lingkungan yang berbeda, serta pengujian jangka panjang untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa pelapisan *manganese phosphate*.

## Daftar Pustaka

- [1] Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji, A. Analisa Laju Korosi pada pelat baja Karbon dengan Variasi ketebalan coating. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), G1-G5, 2015.
- [2] Arthana, I. W. G., Widjyarta, I. M., & Suardana, N. P. G. S. Ketahanan aus lapisan Ni-Cr pada dinding silinder liner dengan menggunakan powder flame spray coating. *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 14(2), 87, 2017.
- [3] Das, S., Siddiqui, A. R., & Bartaria, V. Evaluation of aluminum alloy brake drum for automobile application. *IJSTR*, 2, 96-102, 2013.
- [4] Weng, D., Jokiel, P., Uebleis, A., & Boehni, H. Corrosion and protection characteristics of zinc and manganese phosphate coatings. *Surface and Coatings Technology*, 88(1-3), 147-156, 1997.
- [5] Hivart, P., Hauw, B., Crampon, J., & Bricout, J. P. Annealing improvement of tribological properties of manganese phosphate coatings. *Wear*, 219(2), 195-204, 1998.
- [6] Duszczyk, J., Siuzdak, K., Klimczuk, T., Strychalska-Nowak, J., & Zaleska-Medynska, A. Manganese phosphatizing coatings: the effects of preparation conditions on surface properties. *Materials*, 11(12), 2585, 2018.
- [7] Ince, M. Treatment of manganese-phosphate coating wastewater by electrocoagulation. *Separation Science and Technology*, 48(3), 515-522, 2013.
- [8] Wang, C. M., Liaw, H. C., & Tsai, W. T. Effects of temperature and applied potential on the microstructure and electrochemical behavior of manganese phosphate coating. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2994-3001, 2006.
- [9] Li, G. Y., Lian, J. S., Niu, L. Y., & Jiang, Z. H. A zinc and manganese phosphate coating on automobile iron castings. *ISIJ international*, 45(9), 1326-1330, 2005.
- [10] Mahendra, A. Y., Prabowo, A. R., & Triyono, T. Failure analysis of motorcycle shock breakers. *Open Engineering*, 11(1), 1150-1159, 2021.
- [11] Septiyanto, Muhammad Abdul Rafiq, Indreswari Suroso, and Noviana Utami. "Analisis kekerasan dan keausan bearing pada pesawat Cessna Grand Caravan 208B." *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 11.1, 2022.

- [12] Tjahjanti, P. H., Nugroho, W. H., & Wahyuni, H. C. Physics and Chemistry Test on Aluminum-Based Composite Materials as an Alternative Material for the Manufacture of Brake Drum. *Advanced Materials Research*, 789, 449-454, 2013.
- [13] Totik, Y. The corrosion behaviour of manganese phosphate coatings applied to AISI 4140 steel subjected to different heat treatments. *Surface and Coatings Technology*, 200(8), 2711-2717, 2006.
- [14] Khaleghi, M., Gabe, D. R., & Richardson, M. O. W. Characteristics of manganese phosphate coatings for wear-resistance applications. *Wear*, 55(2), 277-287, 1979.
- [15] Fadhilah, A. A., Ruyat, Y., & Manawan, M. T. Perbandingan Performa Komponen Senjata Ringan Dengan Lapisan Manganese Phosphate dan Lapisan CrSi asil Proses Pysical Vapor Deposition (PVD). *Teknologi Persenjataan*, 3(1), 2021.