

# Pengaruh waktu pelapisan black oxide terhadap ketahanan korosi dan sifat mekanik pada baja AISI 4340

Devi Eka Septiyani A<sup>1</sup>, Alda Diva Meidina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung  
Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat 40559  
Email korespondensi: [devi.eka@polban.ac.id](mailto:devi.eka@polban.ac.id)

Received: 21 February 2025, Reviewed: 25 March 2025, Published: 30 April 2026  
<https://doi.org/10.71452/jtmi211202618>

**Abstrak.** Pelapisan Blackening atau Black Oxide coating merupakan salah satu metode pelapisan konversi yang membentuk lapisan oksida hitam pada permukaan baja dan digunakan dalam industri untuk meningkatkan ketahanan korosi, estetika, dan sifat mekanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu pelapisan (*blackening*) 10 menit, 30 menit, dan 60 menit pada temperatur 140 °C terhadap ketahanan korosi, kekuatan tarik dan ketebalan lapisan pada baja AISI 4340. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga variasi waktu berhasil membentuk lapisan hitam seragam yang menempel dengan baik pada permukaan, sedangkan ketahanan korosi yang baik diperoleh pada waktu 30 menit. Ketebalan lapisan yang terbentuk berbanding lurus dengan waktu pelapisan, meningkat dari 13,06 µm pada 10 menit hingga 18,55 µm pada waktu 60 menit. Sebaliknya, kekuatan tarik menunjukkan tren hasil yang berbeda pada waktu 10 menit, mencapai kekuatan tarik tertinggi sebesar 1684 MPa; namun, kekuatan tarik mengalami penurunan pada waktu 30 menit dan 60 menit. Penurunan nilai kekuatan tarik ini disebabkan oleh jumlah atom hidrogen yang terbentuk saat proses dehidrogenasi. Atom tersebut terdifusi dan merangkap ke dalam struktur atom baja cenderung lebih banyak ketika waktu pelapisan lebih lama. Perbedaan durasi ini mengakibatkan proses dehidrogenasi memiliki perbedaan dalam menghilangkan sepenuhnya atom *hidrogen* yang terperangkap pada setiap variasi waktu, sehingga menyebabkan penurunan kekuatan tarik.

**Kata kunci:** Black Oxide, Blackening, Ketahanan Korosi, Baja AISI 4340, Kekuatan Tarik.

**Abstract.** Blackening, also known as Black Oxide coating, is a conversion coating method that forms a black oxide layer on the surface of steel used in industry to enhance corrosion resistance, aesthetics, and mechanical properties. This study aims to determine the effect of coating times (*blackening*) of 10 minutes, 30 minutes, and 60 minutes at a temperature of 140 °C on the corrosion resistance, tensile strength, and coating thickness of AISI 4340 steel. The results showed that the variations succeeded in forming a uniform black layer that adhered well to the surface, while good corrosion resistance was obtained at 30 minutes. The thickness of the layer formed was directly proportional to the coating time, increasing from 13.06 µm at 10 minutes to 18.55 µm at 60 minutes. In contrast, the tensile strength showed a different trend of results at 10 minutes, reaching the highest tensile strength of 1684 MPa; however, the tensile strength decreased at 30 minutes and 60 minutes. This decrease in tensile strength value was due to the number of hydrogen atoms formed during the dehydrogenation process. These atoms diffuse and become more entrapped in the steel's atomic structure with longer plating times. This difference in duration results in the dehydrogenation process having different rates of complete removal of trapped hydrogen atoms at each time interval, resulting in a decrease in tensile strength.

**Keywords:** Black Oxide, Blackening, Corrosion Resistance, AISI 4340 Steel, Tensile Strength.

## PENDAHULUAN

Dalam sektor industri, material logam memegang peranan utama untuk komponen dalam berbagai kebutuhan penunjang sebuah mesin yang sangat rentan terhadap korosi dan keausan [1]. Salah satu komponen pegas dalam sistem kendali pesawat, khususnya pada control column pesawat yang memiliki dimensi yang presisi, terbuat dari material baja AISI 4340. AISI 4340 merupakan baja paduan rendah dengan kandungan karbon menengah (0,3-0,6 wt% C) [2], [3] Dan memiliki kekuatan tinggi, ketangguhan tinggi, dan ketahanan panas. Hal ini menyebabkan baja banyak digunakan secara komersial di berbagai industri seperti konstruksi, otomotif, dan dirgantara [4]. AISI 4340 banyak dikerjakan dalam kondisi dikeraskan melalui proses hard-turning, yang mengakibatkan produksi panas tinggi, mudah aus, produktivitas rendah, dan kualitas permukaan yang buruk [4]. Untuk menyempurnakan kualitas permukaan dari komponen tersebut dilakukan proses pelapisan sebagai metode untuk mengatasi masalah dengan teknik pelapisan logam [1], [5]. Teknik pelapisan *black oxide* menjadi

pilihan utama karena tidak mengubah dimensi, namun tetap memberikan perlindungan terhadap komponen dan meningkatkan usia pakai. Teknik Pelapisan banyak digunakan untuk mengatasi korosi [6], [7].

Dalam penerapannya, waktu pencelupan atau waktu pelapisan merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kualitas hasil pelapisan. Standar acuan pada proses pelapisan *Black Oxide* adalah standar kemiliteran Amerika MIL-DTL-13924 [8]. Dalam standar tersebut, durasi pelapisan masih memiliki rentang yang sangat panjang. Durasi waktu tahan pelapisan dengan waktu singkat mungkin berpotensi menyebabkan lapisan tidak terbentuk dengan sempurna, namun dengan waktu yang lama juga berpotensi mengurangi sifat kekuatan tarik material [1].

Pelapisan *black oxide* atau *blackening* merupakan salah satu metode pelapisan konversi (*conversion coating*), dengan membentuk lapisan pelindung tipis yang digunakan secara luas pada industri untuk meningkatkan ketahanan korosi, kekuatan mekanik, dan estetika permukaan logam [9], [10]. Proses ini dilakukan melalui

reaksi kimia antara permukaan logam besi dengan larutan basa kuat bersuhu tinggi yang menghasilkan lapisan oksida hitam berupa magnetit ( $Fe_3O_4$ ) [11], [12], [13], [14].

Pelapisan *black oxide* ini membentuk lapisan pelindung dan mengubah tampilan logam menjadi hitam seragam, bahkan di dalam lubang-lubang tak terlihat. Proses ini tidak merubah dimensi dari logam serta tidak menutup kemungkinan dapat memperbaiki sifat pada material [15]. Pelapisan ini dapat mengurangi pantulan cahaya pada permukaan logam, sehingga cocok digunakan pada komponen yang membutuhkan visibilitas rendah dan ketahanan aus yang baik [16], [17].

Beberapa studi sebelumnya telah mengkaji pengaruh parameter pelapisan terhadap baja karbon. Hany dan Sakti (2019) yang berjudul “Pengaruh Lama Waktu Pemanasan pada Proses *Blackening* Baja ST 41 Terhadap Ketebalan dan Kekilapan Lapisan” meneliti pengaruh waktu dan suhu pemanasan pada proses blackening dengan variasi waktu 30,60, dan 90 menit terhadap kekilapan dan ketebalan lapisan baja ST41[1], sementara Ashab dan Sakti (2021) dalam jurnal berjudul “Analisa Waktu Pemanasan dan Temperatur Pemanasan pada Proses *Blackening* Baja ST41 Bentuk Plat dan Silinder terhadap Ketebalan dan Uji Tarik” menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu pemanasan dapat meningkatkan ketebalan namun menurunkan kekuatan tarik pada baja yang sama[5]. Putra dkk dalam jurnal “pengaruh lama waktu dan suhu pemanasan pada proses blackening terhadap kekerasan baja ST 37” juga mengungkap bahwa proses *blackening* mampu meningkatkan kekerasan baja ST37 seiring peningkatan suhu dan waktu pemanasan [15]. Pada tiga penelitian sebelumnya, masih dibahas peningkatan ketebalan berdasarkan variasi waktu dan temperatur pelapisan, dan belum membahas terkait ketahanan korosi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan variasi waktu pelapisan Black Oxide dengan variasi waktu 10 menit, 30 menit, dan 60 menit, serta mengetahui dan menganalisis kekuatan tarik, ketebalan pelapisan, dan ketahanan korosi pada variasi waktu proses pelapisan *Black Oxide*.

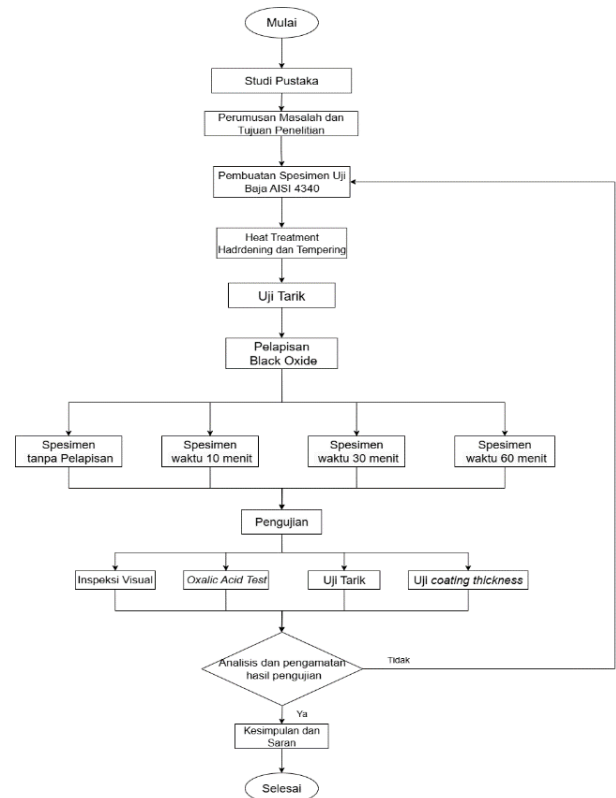
## METODE

### Jenis Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian adalah metode eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui hasil dari variasi waktu pada pelapisan *Black Oxide* terhadap ketahanan korosi, ketebalan lapisan dan kekuatan tarik pada material baja AISI 4340.

### Diagram Alir Penelitian

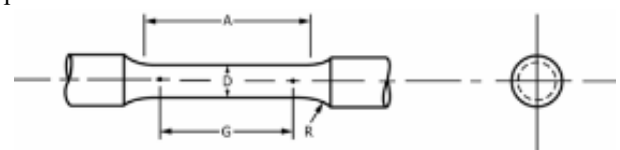
Penelitian dilaksanakan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

### Proses Persiapan Material

Tahap awal proses preparasi material dengan membuat spesimen material baja AISI 4340 sesuai dengan standar pengujian tarik ASTM E8 [13], seperti yang terlihat pada Gambar 2. Selanjutnya, pemotongan untuk spesimen pengujian ketahanan korosi metode *oxalic acid drop test*, kemudian diberikan perlakuan panas *quenching pada suhu 840 °C dengan media oli dan tempering* pada suhu 210 °C untuk meningkatkan kekuatan material. Setelah itu, dilakukan pengamplasan untuk menghilangkan substrat dari oli. Proses persiapan spesimen ditunjukkan seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Spesimen Uji ASTM E8[18]



Gambar 3. a) Hardening, b) Tempering

### Proses Pelapisan Black Oxide

Proses pelapisan *black oxide* pada material baja AISI 4340 dilakukan menggunakan larutan senyawa kimia terkontrol, yaitu NaOH sebanyak 650 grs/Lt, NaNO<sub>3</sub> sebanyak 350 grs/Lt, dan aquades dengan temperatur pemanasan tetap pada suhu 140 °C, sesuai dengan proses pelapisan *black oxide* pada material baja paduan rendah dalam standar MIL-DTL-13924 [8]. Waktu perendaman dilakukan pada variasi 10 menit, 30 menit dan 60 menit. Hasil pelapisan dapat dilihat pada Gambar 4 dan hasil *Smudging Test* dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 4. a) Sebelum pelapisan, b) sesudah pelapisan

### Proses Pengujian




Pengujian pertama yang dilakukan merupakan visual inspeksi dengan melihat warna hitam seragam pada permukaan serta *smudging test*. Pengujian kedua adalah ketahanan korosi intergranular menggunakan metode *Oxalic acid drop test* terhadap permukaan lapisan pelindung, dengan ion logam dan ion non logam dari asam oksalat akan bereaksi menjadi terlarut atau tidak pada lapisan [19]. Pengujian ketiga, yaitu pengujian ketebalan lapisan yang terbentuk menggunakan alat *coating thickness gauge* yang menggunakan prinsip *eddy current* dalam pengukurannya [20]. Pengujian terakhir adalah uji tarik untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum hasil pelapisan *black oxide* sesuai dengan standar pengujian ASTM E8.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Visual Inspeksi

Pengujian ini dilakukan dengan melihat hasil pelapisan yang terbentuk secara kasatmata apakah warna hitam yang terbentuk sudah seragam di bawah lampu penerang, serta melakukan *Smudging Test*, yaitu mengusapkan permukaan lapisan untuk melihat apakah lapisan yang terbentuk memiliki daya rekat yang baik dengan tidak adanya noda pada kain putih. Standar acuan yang digunakan pada *smudging test* ini tercantum pada MIL-DTL-13924 poin 4.4.1 *Smut Test*. Pengujian secara visual merupakan penentu pertama dalam proses pelapisan *black oxide* dengan melihat hasil pelapisan yang terbentuk pada permukaan material sudah berwarna hitam seragam dan menutupi seluruh permukaan. Sedangkan, pengujian *Smudging Test* dilakukan dengan menggunakan kain putih dan tidak meninggalkan noda agar hasil pelapisan dapat diterima. Pengujian ini harus dilakukan sebelum melakukan pengujian korosi [8].

Tabel 1. Hasil Pengujian *smut test*



Spesimen	Hasil <i>Smudging Test</i>
10 Menit	
30 Menit	
60 Menit	


Hasil inspeksi visual menunjukkan bahwa seluruh variasi waktu berhasil membentuk lapisan oksida hitam, menutupi permukaan material dan tidak meninggalkan noda pada kain putih setelah proses pelapisan dilakukan. Bulatan hitam pada gambar merupakan spesimen uji yang telah dilakukan pelapisan *black oxide*.

### Uji ketahanan korosi metode *Oxalic acid drop test*

*Oxalic acid drop test* bertujuan untuk mengetahui kualitas lapisan *black oxide* terhadap ketahanan korosi menggunakan larutan asam oksalat dengan konsentrasi 5% selama 8 menit pada permukaan material [8][21]. Hasil dilihat secara makroskopik dengan pembesaran 1x dan secara visual terhadap lapisan yang terbentuk pada permukaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian secara Makroskopik

Spesimen	Hasil <i>Oxalic acid drop test</i>
10 Menit	
30 Menit	

Spesimen	Hasil Oxalic acid drop test
60 Menit	

Berdasarkan pengamatan hasil uji *Oxalic acid drop test* pada baja AISI 4340 menunjukkan bahwa pada menit ke-10, lapisan hitam (ditandai dengan lingkaran merah) belum terbentuk sempurna sehingga sebagian permukaan menunjukkan tanda pelarutan, yang mengindikasikan potensi korosi. Pada waktu pelapisan 30 menit, lapisan hitam terlihat merata dan stabil, serta tidak menunjukkan pelarutan, yang menunjukkan ketahanan yang baik terhadap korosi. Sementara itu, pada pelapisan 60 menit, kondisi permukaan relatif serupa dengan waktu 30 menit, menandakan bahwa stabilitas lapisan tetap terjaga pada durasi yang lebih lama. Kualitas Good yang tercantum pada spesifikasi MIL-DTL-13924 [8] menunjukkan bahwa pada lapisan yang terbentuk, saat diberi tetesan asam oksalat memberikan noda yang berwarna hitam atau coklat gelap dengan tepian yang lebih terang pada tempat tetesan. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tidak mengalami pelarutan dan memiliki daya tahan terhadap larutan asam oksalat. Pengujian ini menjadi syarat utama untuk menentukan kualitas hasil lapisan *Black Oxide* yang terbentuk.

#### Uji Ketebalan Lapisan yang terbentuk

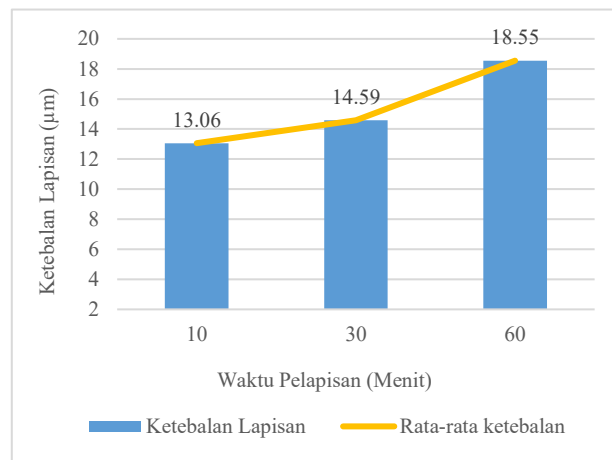
Proses pelapisan secara terkontrol menggunakan larutan senyawa kimia NaOH dan NaNO<sub>3</sub> pada suhu tinggi, yaitu 140 °C, untuk memfasilitasi persebaran oksida hitam pada permukaan material dengan mengetahui pertumbuhan lapisan setiap variasi waktu 10 menit, 30 menit, dan 60 menit. Material baja AISI 4340 dicelupkan secara menyeluruh hingga terendam dalam larutan sehingga lapisan yang terbentuk akan sempurna dan merata pada seluruh permukaan. Hasil dari pengukuran dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Ketebalan Lapisan terbentuk

Spesimen Waktu (menit)	Temperatur (°C)	Rata - rata Ketebalan (µm)
10	140	13,06
30	140	14,59
60	140	18,55

Hasil pengukuran ketebalan lapisan berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa ketebalan lapisan magnetite pada waktu 10 menit mendapat nilai paling kecil, yaitu setebal 13,06 µm, dan ketebalan lapisan magnetite paling tebal didapatkan pada waktu 60 menit, yaitu 18,55 µm. Perbandingan setiap variasi waktu pelapisan terhadap

pertumbuhan ketebalan lapisan magnetite dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik pertumbuhan ketebalan lapisan

Berdasarkan grafik pada Gambar 5, ketebalan lapisan magnetit yang terbentuk cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya durasi waktu pelapisan. Namun, setelah waktu pelapisan mencapai 30 menit, terjadi peningkatan ketebalan yang signifikan dengan suhu yang digunakan yang stabil pada 140 °C. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Firsty (2019), yang menyatakan bahwa hasil lapisan yang terbentuk akan semakin meningkat seiring dengan lamanya waktu dan tingginya temperatur proses pelapisan [1].

#### Uji Tarik

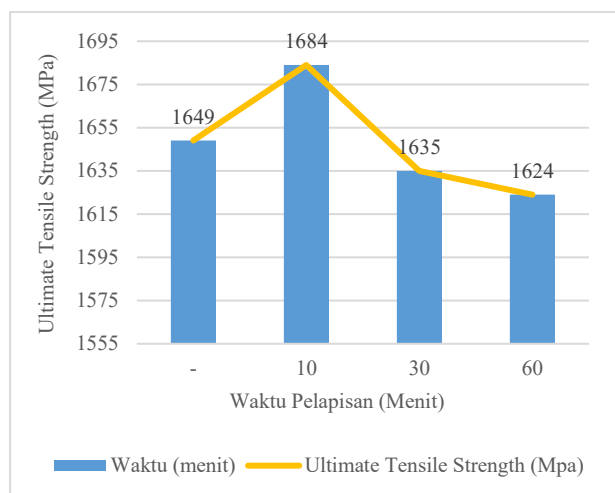
Pengujian tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8 untuk mengetahui nilai kekuatan maksimum material baja AISI 4340 setelah melalui proses pelapisan black oxide. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pelapisan terhadap sifat mekanik material, khususnya kekuatan tarik, guna memastikan apakah terjadi perubahan signifikan setelah perlakuan permukaan tersebut. Hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Kekuatan tarik maksimum

Spesimen	Waktu (menit)	Ultimate Tensile Strength (MPa)
Tanpa Pelapisan	-	1649
Pelapisan Black	10	1684
	30	1635
	60	1624

Berdasarkan data pada Tabel 4, terlihat bahwa nilai kekuatan tarik maksimum pada spesimen mengalami variasi setelah dilakukan proses pelapisan *black oxide* dengan durasi yang berbeda. Spesimen tanpa pelapisan memiliki kekuatan tarik sebesar 1649 MPa, sedangkan pada spesimen yang dilapisi selama 10 menit terjadi peningkatan kekuatan tarik menjadi 1684 MPa. Namun, seiring bertambahnya durasi pelapisan menjadi 30 dan 60 menit, nilai kekuatan tarik menunjukkan penurunan masing-masing menjadi 1635 MPa dan 1624 MPa. Perubahan ini mengindikasikan bahwa waktu pelapisan memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik material, di

mana pelapisan dengan durasi tertentu dapat meningkatkan kekuatan, namun pelapisan yang terlalu lama justru dapat menyebabkan penurunan kekuatan. Secara umum, hal ini menunjukkan bahwa ketebalan dan karakteristik lapisan yang terbentuk selama proses pelapisan dapat memengaruhi kemampuan material dalam menahan beban tarik. Perbandingan nilai kekuatan tarik berdasarkan variasi waktu pelapisan ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik nilai kekuatan tarik maksimum

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara variasi waktu pelapisan black oxide terhadap nilai kekuatan tarik maksimum pada baja AISI 4340. Berdasarkan grafik, spesimen tanpa pelapisan memiliki kekuatan tarik sebesar 1649 MPa, yang meningkat menjadi 1684 MPa setelah pelapisan selama 10 menit. Namun, kekuatan tarik menurun secara bertahap pada pelapisan 30 dan 60 menit, masing-masing menjadi 1635 MPa dan 1624 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa pelapisan *black oxide* dengan durasi singkat dapat meningkatkan kekuatan tarik, sedangkan pelapisan dengan durasi lebih lama justru menurunkan sifat mekanik material. Penurunan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ashab (2021), menunjukkan bahwa semakin lama waktu pelapisan, maka kekuatan tarik material cenderung menurun [5]. Salah satu

mekanisme yang diduga menjadi penyebab utama adalah terjadinya fenomena *hydrogen embrittlement*, yaitu proses masuknya atom hidrogen ke dalam struktur logam selama proses pelapisan yang menyebabkan kerapuhan material. Fenomena ini juga telah dijelaskan dalam standar militer AS, MIL-DTL-13924[8].

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa pada pengujian ketebalan lapisan, semakin lama waktu pelapisan, ketebalan lapisan yang terbentuk cenderung meningkat. Di sisi lain, nilai kekuatan tarik maksimum menunjukkan peningkatan pada durasi 10 menit, namun menurun pada durasi 30 menit dan 60 menit, yang mengindikasikan bahwa durasi pelapisan terlalu lama dapat menurunkan sifat mekanik material. Pada pengujian, ketahanan korosi meningkat seiring dengan lamanya waktu pelapisan, dan hasil pada durasi 30 menit memberikan ketahanan yang baik. Hasil penelitian menunjukkan durasi pelapisan yang efektif, yakni pada kisaran 10 hingga 30 menit untuk mendapatkan kombinasi terbaik antara ketahanan korosi dan sifat mekanik. Sebagai tindak lanjut, disarankan dilakukan penelitian lanjutan dengan mempersempit variasi waktu dan menambahkan variasi suhu dan pengujian pada fenomena *hydrogen embrittlement* untuk meminimalkan efek negatif serta meningkatkan efektivitas proses pelapisan *black oxide* atau *blackening*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Material & Metalurgi, Jurusan Teknik Mesin dan Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi dan mendanai penelitian ini.

## KONTRIBUSI PENULIS

Kontribusi penulis pertama meliputi beberapa kegiatan, yaitu mengolah data, menganalisis data penelitian, menulis naskah awal, merevisi, memperbaiki dan menyunting naskah, membimbing dan mengarahkan penelitian. Sedangkan penulis kedua menyusun konsep dasar, merancang metode penelitian, melakukan eksperimen, survei, dan pengumpulan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Firsty Novemia Hany, "Pengaruh Lama Waktu Pemanasan pada Proses Blackening Baja ST 41 Terhadap Ketebalan dan Kekilapan Lapisan Permukaan," pp. 25–30, 2019.
- [2] A. Manoj, M. M. Basha, S. M. Basha, and M. R. Sankar, "A Review - Black Oxide Coating on Metal Substrates of Steels, Aluminium, Magnesium, and Copper," *Adv. Sci. Technol.*, vol. 106, pp. 46–53, 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.106.46.
- [3] B. Bandanadjaja and D. Idamayanti, "Pengaruh Proses Normalising dan Tempering Ganda Terhadap Peningkatan Nilai Modulus of Toughness Baja AISI 4340," vol. 41, no. 2, pp. 134–141, 2020, doi: 10.14710/teknik.v41n2.25959.
- [4] H. A. Rahman, N. Jouini, and J. A. Ghani, "A Review of High-Speed Turning of AISI 4340 Steel with Minimum Quantity Lubrication (MQL)," pp. 1–15, 2024.
- [5] M. Yasib Ashab and A. M. Sakti, "Blackening Baja ST41 Bentuk Plat dan Silinder Terhadap Ketebalan dan Uji Abstrak," *Jtm*, vol. 09, no. 1, pp. 69–74, 2021.
- [6] Y. K. Afandi, I. S. Arief, J. Teknik, S. Perkapalan, and F. T. Kelautan, "Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating," vol. 4, no. 1, pp. 1–5, 2015.

- [7] R. Babu, N. Arunnellaiappan, T. Arun, and M. Nair, "Development of Black Corrosion-Resistant Ceramic Oxide Coatings on AA7075 by Plasma Electrolytic Oxidation," *Trans. Indian Inst. Met.*, 2018, doi: 10.1007/s12666-018-1459-9.
- [8] "MIL-DTL-13924D," no. March, 1999.
- [9] R. W. Farrell, "Blackening of Ferrous Metals," in *Surface treatments*, pp. 390–396.
- [10] R. T. Kamayuda *et al.*, "ANALISA WAKTU PEMANASAN DAN TEMPERATUR PEMANASAN PADA PROSES BLACKENING BAJA ST41 BENTUK PLAT DAN SILINDER TERHADAP KETEBALAN LAPISAN Abstrak," pp. 163–167.
- [11] S. W. Ooi, P. Yan, and R. H. Vegter, "Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 35, no. 1, pp. 12–25, 2019, doi: 10.1080/02670836.2018.1530425.
- [12] D. H. Stamatis, "TQM Engineering Handbook," in *TQM Engineering Handbook*, 1997.
- [13] S. Chandra-ambhorn, S. Srihirun, and T. Siripongsakul, "Effects of blackening parameters on the formation and adhesion of oxide on AISI 4140 steel," 2018, doi: 10.1108/ACMM-12-2017-1877.
- [14] H. K. D. H. Bhadeshia, "Prevention of Hydrogen Embrittlement in Steels," *ISIJ Int.*, vol. 56, pp. 24–36, 2016.
- [15] E. A. P. Putra, M. H. B. Pasaribu, A. Tegar, Setiawan, and Erwin Ardias Saputra, "PENGARUH LAMA WAKTU DAN SUHU PEMANASAN PADA PROSES BLACKENING TERHADAP KEKERASAN HASIL PELAPISAN," vol. 5, no. 2, pp. 1–23, 2016.
- [16] D. Purnama, K. Razzaq, R. Muhammad, and N. Ikhwan, "The Effect of Seawater Use and Solution Composition on the Quality of Blackening Results," vol. 9, no. 3, 2024.
- [17] K. Rapouch, J. Trčka, A. Selucká, and L. Foret, "Historical processes of chemical blackening of steel and their corrosion resistance," *Corros. Mater. Prot.*, vol. 68, pp. 63–71, 2024, doi: 10.2478/kom-2024-0007.
- [18] ASTM E8, "ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1," *Annu. B. ASTM Stand.* 4, vol. i, no. C, pp. 1–27, 2010, doi: 10.1520/E0008.
- [19] R. L. M. S. A. W. Sekar Arum Kinanti, Laili Rachmawati, "the Use of Oxalic Acid As a Washing Agent To Remove," *Use Oxalic Acid As a Washing Agent To Remove Iron Stain Defects Veg. Tann. Leather Pengguna. Asam Oksalat Sebagai Washing Agent Untuk Menghilangkan Defek Iron Stain Pada Kulit Samak Nabat*, vol. 20, no. 2021, pp. 136–147, 2021.
- [20] Chandra, "Apa sih Coating Thickness Gauge itu?," *TestingIndonesia*, 2022. .
- [21] D. E. S. Arifin and A. F. Amalia, "Pengaruh Waktu Penahanan Dehidrogenasi Setelah Pelapisan Black Oxide Pada Baja AISI 4340 Terhadap Sifat Mekanik," *Mech. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 17, no. 1, p. 213, 2026, doi: <https://doi.org/10.23960/mech.v17.i1.2026213>.