

Pembentukan Lapisan Anodik Aluminium Oksida melalui Metode Anodisasi untuk Proses Pewarnaan Dyeing pada Aluminium

Vika Rizkia^{1*}, Disky A Chandra², Iwan Susanto³, Gun Gun Ramdhan Gunadi⁴, Ghany Heryana⁵ 

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Indonesia

⁵ Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana Purwakarta, Purwakarta, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received November 06, 2022

Revised November 16, 2022

Accepted May 22, 2023

Available online July 25, 2023

Kata Kunci:

Anodisasi, Dyeing, AAO

Keywords:

Anodizing, Dyeing, AAO



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Anodisasi adalah proses elektrokimia ramah lingkungan untuk memproduksi lapisan oksida tipis hingga berukuran nanometer pada permukaan logam sehingga menjadi lebih dekoratif, tahan lama, dan tahan korosi. Proses anodisasi dalam larutan H_2SO_4 digunakan guna mempersiapkan lapisan anodik aluminium oksida (AAO) untuk selanjutnya dilakukan pewarnaan dengan metode dyeing. Pengaruh rapat arus dan waktu celup anodisasi terhadap permukaan hasil pewarnaan serta ketahanan korosi logam aluminium di investigasi dalam penelitian ini. Spesimen aluminium murni dilakukan proses anodisasi dalam larutan 16% H_2SO_4 dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit untuk selanjutnya dilakukan pencelupan ke dalam larutan dyeing non elektrolitik. Hasil pewarnaan menunjukkan bahwa tingkat penyerapan zat warna paling tinggi dalam parameter rapat arus 3 A/dm². Selain itu, peningkatan waktu celup hingga 60 menit dapat meningkatkan kepekatan warna yang diserap. Pengujian korosi menggunakan metode *salt spray* memperlihatkan bahwa proses anodisasi dan pewarnaan dapat meningkatkan ketahanan korosi pada logam aluminium. Hasil pengujian kekerasan Vickers menunjukkan bahwa semakin tinggi rapat arus menghasilkan penurunan kekerasan rata-rata pada permukaan aluminium hasil anodisasi.

ABSTRACT

Anodization is an environmentally friendly electrochemical process for producing a thin to nanometer-sized layer of oxide on a metal surface so that it becomes more decorative, durable and corrosion-resistant. Anodizing process in H_2SO_4 electrolyte solution was used to prepare anodic aluminum oxide (AAO) layer for non-electrolytic dyeing process. The influence of current densities and anodizing time on the colored surface, as well as the corrosion resistance of aluminum, have been systematically investigated in this study. Prior to the dipping process into non-electrolytic dyeing pigment, pure aluminum specimens were anodized in 16% H_2SO_4 electrolyte solution with the current densities of 1, 3, and 5 A/dm² for 40 and 60 minutes. The coloring results reveal that the highest dye absorption rate occur at a current density of 3 A/dm². Moreover, an increase in anodizing time of up to 60 minutes can increase the intensity of the absorbed color. Corrosion testing using the salt spray method demonstrate that the anodizing and coloring processes can increase the corrosion resistance of aluminum metal. The average surface hardness of anodized aluminum decreases with increasing current density, as determined by Vickers hardness tests.

1. PENDAHULUAN

Aluminium dan paduannya adalah logam non-ferrous yang paling banyak digunakan di dunia industri. Hal ini berkaitan dengan sifat-sifat aluminium yang atraktif meliputi densitas rendah, kekuatan tinggi, kemampuan mesin yang baik, dan keuletan yang tinggi (Strak, Matek, Chlanda, & Sudoł, 2022; Sundararajan, Devarajan, & Jaafar, 2020; Wang et al., 2022). Namun, logam aluminium tanpa perlindungan memiliki kekerasan, ketahanan aus, serta ketahanan korosi yang rendah (Kozhukhova, du Preez, & Bessarabov, 2019; Li, Z., Wei et al., 2021; Truong, P. van Bo, Minh, N. van Anh, Suresh Kumar, & Shkir, 2022). Oleh karena itu, aluminium dan paduannya memerlukan proses anodisasi untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi untuk aplikasi praktisnya (Kale, Rajesh, Maiyalagan, Lee, & Gnanamuthu, 2022; Liu, Wei, He, & Hou, 2016).

Anodisasi adalah proses elektrokimia ramah lingkungan untuk memproduksi lapisan oksida tipis hingga berukuran nanometer pada permukaan logam sehingga menjadi lebih dekoratif, tahan lama, dan tahan korosi. Proses ini menghasilkan lapisan alumina oksida anodik (AAO) yang terdiri dari morfologi lapisan pori pada bagian luar dan lapisan penghalang (barrier) pada bagian dalam. Lapisan pori berbentuk

*Corresponding author.

E-mail addresses: vika.rizkia@mesin.pnj.ac.id (Vika Rizkia)

susunan sel kolumnar heksagonal yang tegak lurus terhadap permukaan aluminium, sedangkan lapisan penghalang berbentuk hemispherical yang sangat tipis dan padat (Abd-Elnaiem & Rashad, 2018; Su & Chen, 2022; Terashima, Iwai, & Kikuchi, 2022). Lapisan AAO ini memiliki karakteristik inert dan stabil, jernih sehingga tetap mempertahankan tampilan khas aluminium yang mengkilap, memiliki nilai kekerasan dan ketahanan abrasi yang relatif tinggi dibandingkan dengan logam induknya, tahan korosi, serta mudah untuk dilakukan pewarnaan. Sifat aluminium oksida anodik yang menguntungkan ini membuat aluminium dan paduannya cocok untuk berbagai aplikasi termasuk industri pengemasan, arsitektur, serta otomotif (Kikuchi, Taniguchi, Suzuki, & Natsui, 2020; Luo et al., 2022; Maksymuk et al., 2022; Shaffei, Hussein, Awad Abouelata, Osman, & Mohammed, 2021; Zakiyuddin et al., 2021)

Lapisan berpori transparan yang tumbuh pada permukaan aluminium ini dapat menyerap pigmen pewarna sehingga dapat meningkatkan hasil akhir dekoratif dan memberikan nilai tambah pada aluminium. Saat ini, metode pewarnaan pada aluminium dan paduannya meliputi dyeing (Alves et al., 2018; Kongvarhodom, Khumsa-Ang, Siripornmongkolchai, Jearasupat, & Turner, 2020; Yeh, Tsai, Wang, & Chou, 2016), pewarnaan sendiri dari konstituen paduan aluminium atau pewarnaan integral dari inklusi spesies elektrolit ke dalam oksida (Donahue & Exline, 2014; Mun et al., 2021), serta pewarnaan elektrolitik melalui elektrodeposisi logam pada dasar pori AAO (Regone, Casademont, & Arurault, 2022; Xu, Ye, Feng, & Sun, 2014). Di antara seluruh metode pewarnaan yang telah dilakukan, proses pewarnaan organik dengan dye merupakan metode yang paling atraktif terkait tersedianya rentang warna yang beragam serta biaya yang paling murah (Yeh et al., 2016). Berbagai penelitian mengenai proses pewarnaan dyeing dengan warna yang beragam telah dilakukan (Alves et al., 2018; Kongvarhodom et al., 2020; Yeh et al., 2016). Namun, hingga saat ini belum ada penelitian yang membahas mengenai pengaruh parameter anodisasi terhadap hasil pewarnaan menggunakan dye dan juga ketahanan korosinya. Oleh karena itu, penelitian ini akan menginvestigasi pengaruh rapat arus anodisasi terhadap visual pewarnaan serta bagaimana ketahanan korosi logam aluminium tersebut setelah dilakukan anodisasi dan pewarnaan.

2. METODE

Aluminium murni dengan dimensi 30 mm x 50mm x 3mm digunakan sebagai spesimen untuk proses anodisasi. Sebuah lubang dibuat pada posisi tengah atas spesimen sehingga dapat dihubungkan secara elektrik menggunakan kabel tembaga.

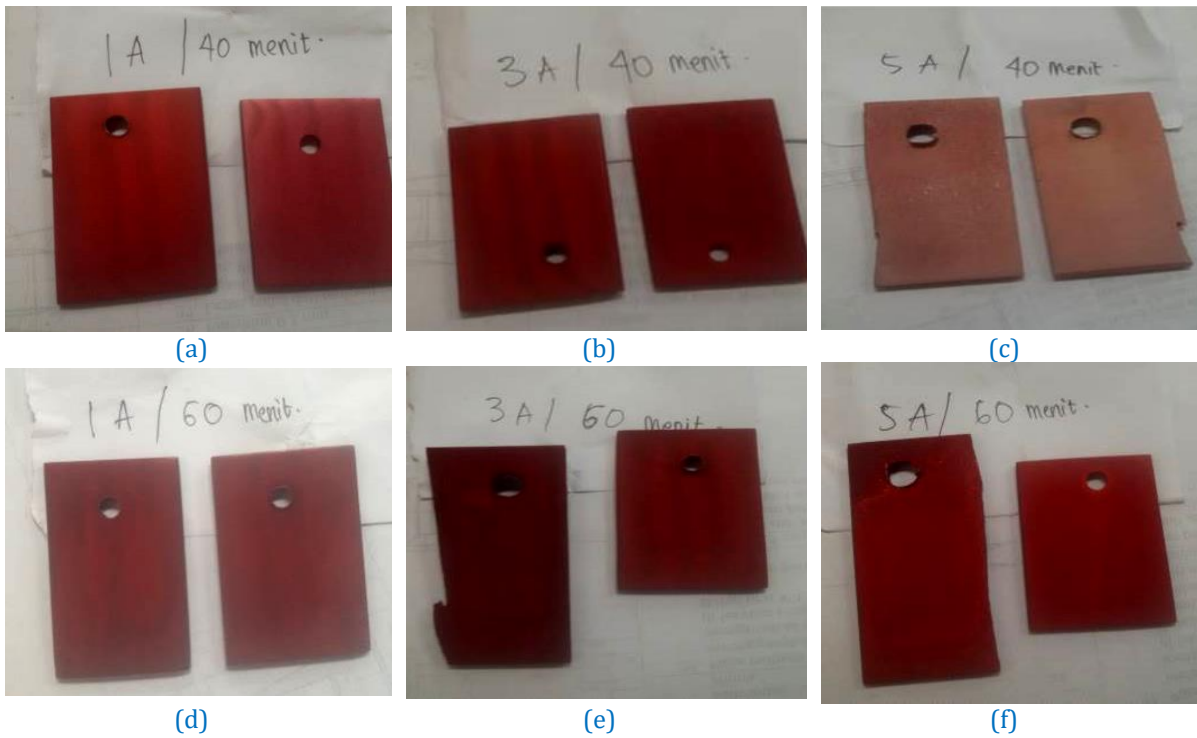
Sebelum dilakukan proses anodisasi, spesimen terlebih dahulu dilakukan pengamplasan mulai dari grit 100 hingga 1500 menggunakan kertas abrasi SiC dilanjutkan dengan pembilasan dengan aquades. Kemudian dilanjutkan dengan pencelupan ke dalam 30% HNO₃ selama 1 menit dan dibilas menggunakan aquades. Setelah itu spesimen aluminium dilakukan proses anodisasi pada 16% H₂SO₄ dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit. Sampel anodisasi (anoda) digantungkan secara vertikal pada tengah beaker glass berhadapan dengan karbon (katoda). Sampel anodisasi selanjutnya dimasukkan ke dalam larutan dye komersial berwarna merah selama 2 menit. Proses sealing dilakukan dalam air dengan temperatur 95^o - 100^oC selama 30 menit. Pengujian kekerasan lapisan oksida hasil anodisasi dilakukan dengan metode Vickers berdasarkan standar ASTM E384-99, menggunakan beban 300 gf, sedangkan pengujian ketahanan korosi aluminium hasil anodisasi dilakukan dengan menggunakan metode salt spray berdasarkan standar ASTM B117-11 dalam 5% Sodium Klorida (NaCl) dengan temperatur uji 35^oC dan volume sedimentasi 2ml/(80 cm²/h).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Produk pewarnaan pada aluminium hasil anodisasi dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit dapat terlihat pada [Gambar 1](#). Karakterisasi sifat mekanis aluminium hasil anodisasi juga dilakukan melalui pengujian kekerasan vickers guna mengetahui nilai kekerasan permukaan aluminium. Adapun nilai kekerasan sampel aluminium tanpa perlakuan dan dengan perlakuan anodisasi dengan seluruh parameter dirangkum pada [Tabel 1](#). Kemudian, pengaruh parameter rapat arus dan waktu celup anodisasi terhadap kekerasan permukaan aluminium terlihat pada [Gambar.2](#).

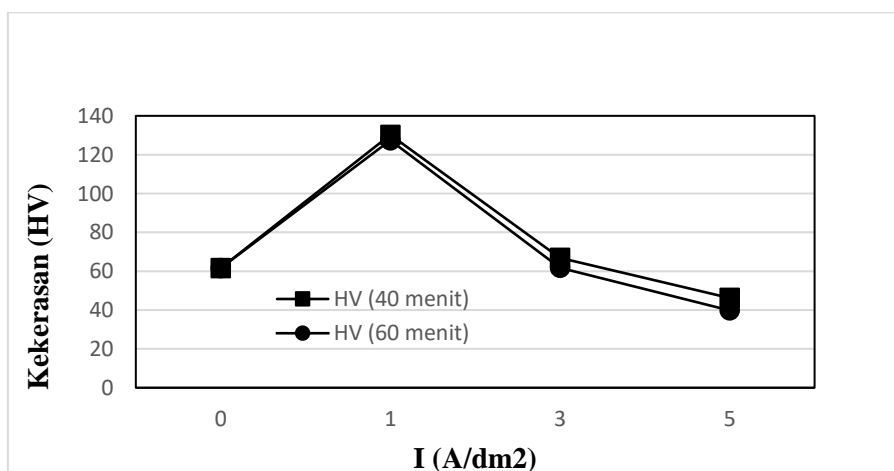
Pengujian salt spray dilakukan untuk menginvestigasi ketahanan korosi aluminium hasil anodisasi dan pewarnaan dalam lingkungan ekstrem. Adapun visual hasil pengujian salt spray dapat terlihat pada [Gambar 3](#).



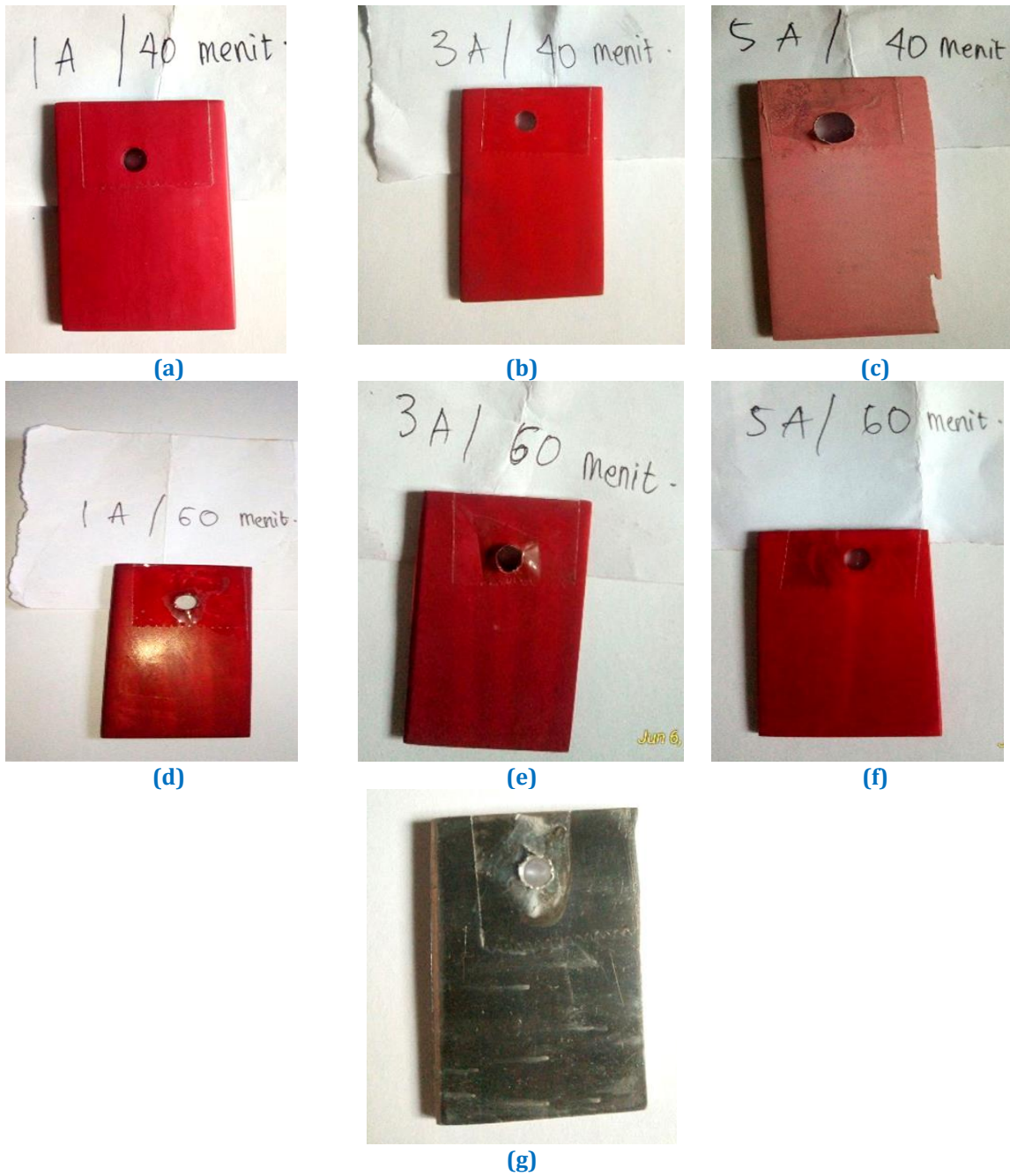
Gambar 1. Perubahan Warna yang Terjadi pada Sampel Hasil Anodisasi dalam 16% H_2SO_4 dengan : (a) 1 A/dm² Selama 40 menit, (b) 3 A/dm² Selama 40 menit, (c) 5 A/dm² Selama 40 menit, (d) 1 A/dm² Selama 60 Menit, (e) 3 A/dm² Selama 60 Menit, (f) 5 A/dm² Selama 60 Menit

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan dengan Menggunakan Metode Vickers pada Permukaan Aluminium Hasil Anodisasi dalam 16% H_2SO_4 dengan Rapat Arus 1, 3, dan 5 A/dm² Selama 40 dan 60 Menit

I (A/dm ²)	T (Menit)	kekerasan (HV)					Kekerasan Rata-Rata (HV)
		1	2	3	4	5	
0	0	50	86	67	54	51	61,6
1	40	102	163	106	130	150	130,2
	60	84	88	154	176	135	127,4
3	40	77	69	43	83	62	66,8
	60	78	54	56	56	65	61,8
5	40	51	44	38	35	63	46,2
	60	35	39	44	39	42	39,8



Gambar 2. Hubungan antara Parameter Anodisasi Rapat Arus dan Waktu Celup terhadap Kekerasan Permukaan Lapisan Oksida Hasil Anodisasi

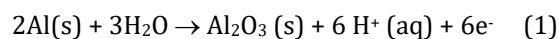


Gambar 3. Hasil Pengujian Salt Spray pada Sampel Hasil Anodisasi dalam 16% H_2SO_4 dengan : (a) 1 A/dm² Selama 40 Menit, (b) 3 A/dm² Selama 40 Menit, (c) 5 A/dm² Selama 40 Menit, (d) 1 A/dm² Selama 60 Menit, (e) 3 A/dm² Selama 60 Menit, (f) 5 A/dm² Selama 60 Menit, dan (g) Tanpa Anodisasi

Pembahasan

Proses pembentukan pori selama proses anodisasi meliputi dua proses yaitu pembentukan serta pelarutan larutan oksida. Lebih jauh dapat dijelaskan dengan tahapan sebagai berikut (Li et al., 2019; Mohammed, Moreno, & Kosel, 2018; Musselman, Delumeau, Araujo, Wang, & MacManus-Driscoll, 2020; Safyari, Mori, Ucsnik, & Moshtaghi, 2023; Vanpaemel, Abd-Elnaiem, de Gendt, & Vereecken, 2015):

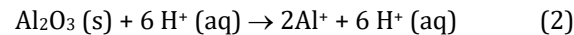
Ketika tegangan diaplikasikan dalam sel elektrokimia, reaksi Persamaan (1) terjadi pada *interface* substrat aluminium/oksida hingga terbentuk kondisi yang seimbang.



Pelepasan elektron dalam persamaan (1) menghasilkan arus anodisasi pada permukaan elektroda anoda (aluminium). Sehingga dalam kondisi potensiostatik, pada permulaan proses anodisasi terlihat

bahwa arus yang terdeteksi meningkat secara signifikan, hal ini mengindikasikan terbentuknya lapisan oksida awal yang biasa disebut lapisan oksida penghalang (*barrier layer*). Pada proses pembentukan lapisan penghalang, pertumbuhan lapisan oksida secara tegak lurus jauh lebih lambat dibandingkan pada sisi-sisi nukleus, oleh karena itu pertumbuhan secara lateral sangat mendominasi pada tahap ini dan menutupi seluruh permukaan aluminium. Kemudian, peningkatan arus secara signifikan ini dilanjutkan dengan penurunan arus drastis menuju nilai yang relatif rendah ketika lapisan penghalang ini mulai berkembang.

Kemudian, di waktu yang sama terjadi pelarutan lapisan oksida yang menghasilkan morfologi pori pada AAO seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2). Fenomena ini ditandai dengan terjadinya sedikit peningkatan arus hingga stabil.



Selama proses pembentukan oksida dengan morfologi pori, lapisan penghalang dengan karakteristik tipis dan padat terlarut secara kontinu karena peningkatan medan listrik lokal (*field-assisted dissolution*), dan lapisan penghalang baru akan terbentuk kembali pada *interface* aluminium/oksida. Terjadinya pelarutan dan pembentukan lapisan oksida secara simultan ini diakibatkan oleh perbedaan kelarutan kimia pada lapisan oksida (cacat, impurities, batas butir mengakibatkan distribusi arus yang tidak merata). Rapat arus lebih tinggi terdeteksi di daerah tonjolan (bagian yang terdapat cacat, impurities, batas butir) pada *interface* aluminium/oksida sehingga terbentuk lapisan oksida yang lebih tebal pada bagian tersebut. Sementara secara simultan, pelarutan *field-assisted* juga terjadi pada *interface* aluminium/oksida yang mengakibatkan penipisan *interface* aluminium/oksida sehingga mengakibatkan terbentuknya pori. Kemudian seiring dengan berjalannya waktu, struktur pori pada bagian dasar pori mulai tumbuh stabil (pertumbuhan pori *steady state*) dan keteraturan susunan pori mulai meningkat yang ditandai dengan terdeteksinya daerah rapat arus konstan. Pada pertumbuhan pori *steady state* ini, terdapat kesetimbangan dinamis antara pertumbuhan lapisan oksida dengan pelarutan akibat medan listrik (*field-assisted dissolution*).

Gambar 1 menunjukkan produk pewarnaan pada aluminium hasil anodisasi dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit. Berdasarkan **Gambar 1**, seluruh spesimen dalam penelitian ini berhasil menyerap warna merah setelah dilakukan pencelupan dalam zat warna (dye) berwarna merah. Selain itu, dalam penelitian ini juga terlihat bahwa proses penyerapan zat warna dipengaruhi oleh rapat arus dan temperatur celup. Secara visual, tingkat kepekatan (gelap) warna permukaan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya rapat arus hingga 3 A/dm², namun kembali menurun ketika rapat arus ditingkatkan hingga 5 A/dm². Hal ini terjadi karena peningkatan rapat arus dari 1 menuju 3 A/dm² mengakibatkan terjadinya proses pelarutan kimia pada AAO, khususnya pada bagian permukaan pori yang selalu terpapar larutan elektrolit, sehingga menghasilkan morfologi AAO dengan diameter pori yang lebih besar dan dinding antar pori yang lebih tipis. Hal serupa juga ditunjukkan pada berbagai penelitian sebelumnya yaitu peningkatan rapat arus menghasilkan laju pelarutan tinggi lapisan oksida pada dasar pori dan selanjutnya lapisan tersebut akan berkembang. Sebagai tambahan, peningkatan rapat arus anodisasi akan meningkatkan kuat medan listrik dan faktor ekspansi volume (Zhang et al., 2019). Oleh karena itu akibat meningkatnya ukuran diameter pori, maka daya serap lapisan AAO terhadap larutan dye juga semakin meningkat. Kemudian, ketika rapat arus mencapai 5 A/dm² kemungkinan terjadi pelarutan kembali lapisan berpori yang telah terbentuk optimum pada 3 A/dm² hingga mengalami penurunan ketebalan lapisan AAO, akibatnya terjadi penurunan kemampuan penyerapan warna. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan temperatur anodisasi akan meningkatkan rapat arus anodisasi dan proses pelarutan pada AAO dan mengakibatkan penurunan ketebalan lapisan (Iwai & Kikuchi, 2021; Sepulveda-Escobar & Morrison, 2020; Usman & Curioni, 2021). Penelitian lainnya menunjukkan bahwa perbedaan ketebalan lapisan AAO mempengaruhi tingkat kepekatan (kegelapan) warna yang dihasilkan pada permukaan aluminium (Regone et al., 2022).

Terkait dengan waktu pencelupan, berdasarkan **Gambar 1** juga dapat terlihat bahwa warna yang diserap oleh spesimen hasil anodisasi selama 60 menit lebih pekat (gelap) dibandingkan spesimen 40 menit. Hal ini disebabkan karena meningkatnya ukuran diameter pori pada AAO yang disebabkan oleh meningkatnya waktu celup anodisasi.

Hal ini sesuai dengan penelitian yang melaporkan bahwa struktur pori pada lapisan AAO terus berkembang pada proses pencelupan selama 160 hingga 330 detik dengan rapat arus 0.5 A/dm². Lebih jauh, peningkatan lebar diameter pori memungkinkan untuk terjadinya peningkatan penyerapan zat warna pada permukaan aluminium.

Hasil pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers pada permukaan logam aluminium hasil anodisasi seluruh parameter dalam penelitian ini dirangkum pada **Tabel.1**. Adapun pengaruh parameter rapat arus dan waktu celup anodisasi terlihat pada **Gambar.2**.

Berdasarkan [Tabel 1](#), dan [Gambar.2](#), penelitian ini menunjukkan bahwa pada waktu celup yang sama, semakin tinggi rapat arus menghasilkan penurunan kekerasan rata-rata pada permukaan aluminium hasil anodisasi. Hal ini terjadi karena laju pelarutan oksida dan pembentukan oksida berpori pada *interface* aluminium/lapisan oksida semakin tinggi dan mengarah kepada pelebaran ukuran diameter pori. Sehingga fenomena ini mengakibatkan terjadinya penurunan kekerasan lapisan oksida permukaan. Pada rentang temperatur anodisasi 25-55°C terjadi peningkatan agresivitas larutan yang mengarah kepada pembentukan pori khususnya pada daerah dekat permukaan oksida, hal ini merupakan penyebab utama terjadinya penurunan kekerasan dan ketahanan aus pada lapisan anodik.

[Gambar.2](#) juga menunjukkan hubungan terbalik antara waktu pencelupan dengan kekerasan rata-rata permukaan lapisan oksida, dimana waktu celup selama 60 menit menghasilkan kekerasan yang lebih rendah dari 40 menit. Fenomena ini disebabkan karena semakin lama durasi anodisasi maka akan semakin efisien reaksi pori dengan larutan elektrolit asam sulfat. Dengan kata lain akan semakin tinggi tingkat difusi Al^{3+} dan O^{2-} yang terjadi dan mengarah kepada meningkatnya proses pembentukan dan pelarutan oksida sehingga terjadi pelebaran diameter pori permukaan.

Berdasarkan [Tabel 1](#), dan [Gambar.2](#), penelitian ini menunjukkan bahwa pada waktu celup yang sama, semakin tinggi rapat arus menghasilkan penurunan kekerasan rata-rata pada permukaan aluminium hasil anodisasi. Hal ini terjadi karena laju pelarutan oksida dan pembentukan oksida berpori pada *interface* aluminium/lapisan oksida semakin tinggi dan mengarah kepada pelebaran ukuran diameter pori. Sehingga fenomena ini mengakibatkan terjadinya penurunan kekerasan lapisan oksida permukaan ([Bononi, Conte, Giovanardi, & Bozza, 2017](#)). Pada rentang temperatur anodisasi 25-55°C terjadi peningkatan agresivitas larutan yang mengarah kepada pembentukan pori khususnya pada daerah dekat permukaan oksida, hal ini merupakan penyebab utama terjadinya penurunan kekerasan dan ketahanan aus pada lapisan anodik.

[Gambar.2](#) juga menunjukkan hubungan terbalik antara waktu pencelupan dengan kekerasan rata-rata permukaan lapisan oksida, dimana waktu celup selama 60 menit menghasilkan kekerasan yang lebih rendah dari 40 menit. Fenomena ini disebabkan karena semakin lama durasi anodisasi maka akan semakin efisien reaksi pori dengan larutan elektrolit asam sulfat. Dengan kata lain akan semakin tinggi tingkat difusi Al^{3+} dan O^{2-} yang terjadi dan mengarah kepada meningkatnya proses pembentukan dan pelarutan oksida sehingga terjadi pelebaran diameter pori permukaan.

Perbandingan hasil pengujian korosi menggunakan metode salt spray pada aluminium hasil anodisasi dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit dengan aluminium tanpa anodisasi terlihat pada [Gambar.3](#). Seperti yang terlihat pada [Gambar. 3\(g\)](#), logam aluminium tanpa proses anodisasi menunjukkan secara jelas terbentuknya korosi yang cukup parah pada bagian sisi potongan, yang kemungkinan terjadi akibat permukaan kasar hasil potongan yang menjadi pusat tegangan sehingga mudah diserang oleh ion korosif. Selain itu, produk korosi lokal juga terlihat berbentuk kluster pada permukaan lain. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan oksida yang terbentuk secara alami pada permukaan logam aluminium tidak cukup untuk melindungi logam tersebut dalam lingkungan korosif. Sedangkan, seluruh spesimen aluminium dalam penelitian ini yang telah terproteksi oleh proses anodisasi tidak memperlihatkan adanya produk korosi baik pada bagian sisi potong maupun pada bagian tengah spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa parameter anodisasi dengan rapat arus 1, 3, dan 5 A/dm² selama 40 dan 60 menit mampu membentuk lapisan AAO yang dapat meningkatkan ketahanan korosi aluminium pada lingkungan korosif. Selain itu, proses pewarnaan juga tidak mengurangi ketahanan korosi dari material aluminium.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian adapat disimpulkan bahwa produk hasil anodisasi dalam larutan H₂SO₄ pada seluruh parameter rapat arus dan waktu pencelupan dalam penelitian ini berhasil menyerap warna merah setelah dilakukan pencelupan dalam zat warna (dye). Parameter rapat arus dan waktu celup proses anodisasi sangat mempengaruhi tingkat kepekatan zat warna yang diserap oleh aluminium. Dimana, tingkat penyerapan zat warna paling tinggi ditunjukkan oleh aluminium hasil anodisasi dengan rapat arus 3 (tiga) A/dm². Kemudian, tingkat kepekatan zat warna juga semakin meningkat dengan semakin lamanya waktu pencelupan. Selain itu, rapat arus juga mempengaruhi kekerasan lapisan permukaan yang dihasilkan, yaitu semakin tinggi rapat arus yang diaplikasikan pada aluminium menghasilkan kekerasan permukaan yang semakin rendah. Hal ini terjadi akibat adanya pelarutan oksida dan peningkatan ukuran diameter pori. Sebagai tambahan, proses pewarnaan non elektrolit (dyeing) pada permukaan aluminium juga tidak mengurangi ketahanan korosi yang telah ditingkatkan oleh proses anodisasi. Hal ini ditunjukkan dengan tidak terdeteksinya produk korosi pada aluminium hasil anodisasi dan pewarnaan pada seluruh parameter penelitian.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih diberikan kepada Hibah Penelitian Produk Vokasi Unggulan Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 2022 Politeknik Negeri Jakarta yang telah mendanai penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abd-Elnaiem, A. M., & Rashad, M. (2018). Morphology of anodic aluminum oxide anodized in a mixture of phosphoric acid and lithium phosphate monobasic. *Materials Research Express*, 6(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae32d>.
- Alves, G. J. T., Maia, G. A. R., Antunes, S. R. M., Oliveira, M. de F., Cunha, M. T. da, & Rodrigues, P. R. P. (2018). Application of experimental design for AA6351 aluminum alloy anodization and coloring. *Materials Research Express*, 6(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae347>.
- Bononi, M., Conte, M., Giovanardi, R., & Bozza, A. (2017). Hard anodizing of AA2099-T8 aluminum lithium copper alloy: Influence of electric cycle, electrolytic bath composition and temperature. *Surface and Coatings Technology*, 325, 627–635. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.028>.
- Donahue, C. J., & Exline, J. A. (2014). Anodizing and Coloring Aluminum Alloys. *Journal of Chemical Education*, 91(5), 711–715. <https://doi.org/10.1021/ed3005598>.
- Iwai, M., & Kikuchi, T. (2021). Fabrication of unique porous alumina films with extremely high porosity and an ultra-flat barrier layer by anodizing aluminum in sodium metaborate. *Electrochimica Acta*, 399. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139440>.
- Kale, V. N., Rajesh, J., Maiyalagan, T., Lee, C. W., & Gnanamuthu, R. M. (2022). Fabrication of Ni–Mg–Ag alloy electrodeposited material on the aluminium surface using anodizing technique and their enhanced corrosion resistance for engineering application. *Materials Chemistry and Physics*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125900>.
- Kikuchi, T., Taniguchi, T., Suzuki, R. O., & Natsui, S. (2020). Fabrication of a plasma electrolytic oxidation/anodic aluminum oxide multi-layer film via one-step anodizing aluminum in ammonium carbonate. *Thin Solid Films*, 697. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137799>.
- Kongvarhodom, C., Khumsa-Ang, K., Siripornmongkolchai, B., Jearasupat, S., & Turner, C. W. (2020). Anodic aluminum oxide film fabricated with galvanostatic anodization for non-electrolytic dyeing. *Materials Letters*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126992>.
- Kozhukhova, A. E., du Preez, S. P., & Bessarabov, D. G. (2019). Preparation of anodized aluminium oxide at high temperatures using low purity aluminium (Al6082). *Surface and Coatings Technology*, 378. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124970>.
- Li, Z., Wei, H., Chen, D., Chang, M., Hu, H., Ye, X., Zhang, Y., ... Wang, M. (2021). Optical properties of multicolor, hierarchical nanocomposite films based on anodized aluminum oxide. *Optical Materials*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110557>.
- Li, J., Zhu, K., Wang, J., Yan, K., Liu, J., Yao, Z., & Xu, Y. (2019). Optimisation of conductivity of PEO/PVDF-based solid polymer electrolytes in all-solid-state Li-ion batteries. *Materials Technology*, 4(37), 1. <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1827873>.
- Liu, D., Wei, G., He, P., & Hou, H. (2016). The Effect of Sealing and Trivalent Chromium Passivating on Anodized Aluminum. *In Int. J. Electrochem.*, 11. Retrieved from www.electrochemsci.org
- Luo, X., Ren, C., Wu, J., Zhang, D., Xi, Y., Yan, X., ... Dong, C. (2022). Experimental and computational insights into self-assembly sodium oleate on anodized aluminum interface in electric field. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110334>.
- Maksymuk, M., Zazakowny, K., Lis, A., Kosonowski, A., Parashchuk, T., & Wojciechowski, K. T. (2022). Development of the anodized aluminum substrates for thermoelectric energy converters. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.371>.
- Mohammed, H., Moreno, J., & Kosel, J. (2018). Advanced Fabrication and Characterization of Magnetic Nanowires. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71077>.
- Mun, S. C., Kang, G. C., Jeong, Y. B., Park, H. J., Kim, Y. S., Hong, S. H., ... Kim, K. B. (2021). Development of coloring alloys: Color design for lightweight Al-Mg-Si alloys. *Materials & Design*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109449>.
- Musselman, K. P., Delumeau, L. V., Araujo, R., Wang, H., & MacManus-Driscoll, J. (2020). Electrochemical removal of anodic aluminium oxide templates for the production of phase-pure cuprous oxide nanorods for antimicrobial surfaces. *Electrochemistry Communications*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106833>.
- Regone, N. N., Casademont, C., & Arurault, L. (2022). Influence of the anodization electrical mode on the final properties of electrocolored and sealed anodic films prepared on 1050 aluminum alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126369>.

- Safyari, M., Mori, G., Ucsnik, S., & Moshtaghi, M. (2023). Mechanisms of hydrogen absorption, trapping and release during galvanostatic anodization of high-strength aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.111>.
- Sepulveda-Escobar, P., & Morrison, A. (2020). Online teaching placement during the COVID-19 pandemic in Chile: challenges and opportunities. *European Journal of Teacher Education*, 43(4), 587–607. <https://doi.org/10.1080/02619768.2020.1820981>.
- Shaffei, M. F., Hussein, H. S., Awad Abouelata, A. M., Osman, R. M., & Mohammed, M. S. (2021). Effect of sealing on characteristics of nano-porous aluminum oxide as black selective coatings. *Cleaner Engineering and Technology*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100156>.
- Strąk, A., Małek, M., Chlanda, A., & Sudoł, E. (2022). The impact of temperature and mechanical load on corrosion resistance of anodized aluminum EN AW-6063 (T6 temper) alloy for potential architectonic application. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104128>.
- Su, D., & Chen, E. (2022). Construction of fluorescent anodic aluminum oxide films coloured by 3,4,9,10-perylene tetracarboxylic salt. *Materials Chemistry and Physics*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126095>.
- Sundararajan, M., Devarajan, M., & Jaafar, M. (2020). Investigation of surface and mechanical properties of Anodic Aluminium Oxide (AAO) developed on Al substrate for an electronic package enclosure. *Surface and Coatings Technology*, 401. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126273>.
- Terashima, A., Iwai, M., & Kikuchi, T. (2022). Nanomorphological changes of anodic aluminum oxide fabricated by anodizing in various phosphate solutions over a wide pH range. *Applied Surface Science*, 605. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154687>.
- Truong, P. van Bo, N. van, Minh, N. van Anh, N. V., Suresh Kumar, G., & Shkir, M. (2022). Investigation of corrosion and wear resistance of PEO coated D16T aluminium alloys in the marine tropical climate conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126587>.
- Usman, B. J., & Curioni, M. (2021). Influence of temperature on the corrosion testing of anodized aerospace alloys. *Corrosion Science*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109772>.
- Vanpaemel, J., Abd-Elnaiem, A. M., de Gendt, S., & Vereecken, P. M. (2015). The Formation Mechanism of 3D Porous Anodized Aluminum Oxide Templates from an Aluminum Film with Copper Impurities. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(4), 2105–2112. <https://doi.org/10.1021/jp508142m>.
- Wang, Z., Li, M., Han, Q., Yun, X., Zhou, K., Gardner, L., & Mazzolani, F. M. (2022). Structural fire behaviour of aluminium alloy structures: Review and outlook. *Engineering Structures*, , 114746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114746>.
- Xu, Q., Ye, W.-J., Feng, S.-Z., & Sun, H.-Y. (2014). Synthesis and properties of iridescent Co-containing anodic aluminum oxide films. *Dyes and Pigments*, 111, 111, 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.06.012>.
- Yeh, S.-C., Tsai, D.-S., Wang, J.-M., & Chou, C.-C. (2016). Coloration of the aluminum alloy surface with dye emulsions while growing a plasma electrolytic oxide layer. *Surface and Coatings Technology*, 287, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.091>.
- Zakiyuddin, Z., Firzan, F., Yarmaliza, Y., Farisni, T. N., Fitriani, F., Reynaldi, F., ... Umar, U. T. (2021). Meningkatkan Program Pemberdayaan Perempuan dan Keluarga Berencana. *COMSEP: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 107–112.
- Zhang, C. Y., Shao, W. L., Zhou, W. X., Liu, Y., Han, Y. Y., Zheng, Y., & Liu, Y. J. (2019). Biodiesel production by esterification reaction on k⁺ modified mgal-hydrotalcites catalysts. *Catalysts*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/catal9090742>.