

Pengaruh Porositas Terhadap Kinerja Elektrokimia Anoda Aluminium Dalam Proteksi Katodik

Dody Prayitno ^{1)*},

¹⁾Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Trisakti

*Corresponding author: dodyprayitno@trisakti.ac.id

Diterima: 16 Februari 2026

Revisi: 24 Februari 2026

Disetujui: 24 Februari 2026

Terbit: Februari 2026

ABSTRAK

Logam berpori dan metal foam merupakan material dengan struktur seluler yang memiliki densitas rendah dan luas permukaan spesifik tinggi, sehingga memberikan karakteristik mekanik dan fungsional yang berbeda dibandingkan logam padat konvensional. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh porositas anoda aluminium berpori terhadap rasio massa terhadap luas permukaan, laju korosi, serta efektivitas proteksi katodik, baik pada pengujian laboratorium maupun uji lapangan. Hubungan antara porositas dan rasio massa anoda terhadap luas permukaan dinyatakan dengan persamaan empiris $Y=1,3089X^{-0,46}$, yang menunjukkan bahwa peningkatan porositas meningkatkan luas permukaan efektif dan menurunkan rasio massa per satuan luas. Selanjutnya, hubungan antara rasio luas permukaan katoda/anoda dan laju korosi mengikuti persamaan linier $y=1,875x+1,3583$, yang mengindikasikan bahwa peningkatan rasio luas katoda terhadap anoda mempercepat laju pelarutan anoda akibat peningkatan densitas arus anodik. Pengujian perendaman dalam air tawar menunjukkan bahwa peningkatan porositas dari 5% menjadi 15% menurunkan laju korosi secara signifikan. Pada peningkatan porositas melebihi 50%, tidak terjadi perubahan laju korosi yang signifikan. Uji lapangan selama dua bulan di zona terendam air laut Pantai Anyer memperlihatkan bahwa penggunaan anoda berpori menurunkan laju korosi baja hingga 0,20 mm/tahun dibandingkan anoda solid (0,39 mm/tahun) dan tanpa proteksi (0,70 mm/tahun).

Kata Kunci: Anoda Korban, Porositas, Luas Permukaan, Proteksi Katodik,

1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan proses degradasi material yang berlangsung melalui mekanisme reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan elektrolitnya. Salah satu metode proteksi yang banyak digunakan adalah sistem anoda korban (*sacrificial anode cathodic protection*). Pada metode ini, logam yang akan dilindungi dipaksa berperan sebagai katoda melalui pengkopelan listrik dengan logam lain yang memiliki potensial elektrode lebih negatif.

Logam pelindung (anoda korban) mengalami reaksi oksidasi dan melepaskan elektron ke dalam rangkaian eksternal, sedangkan logam yang dilindungi menerima suplai elektron tersebut sehingga potensialnya bergeser ke arah yang lebih negatif (terpolarisasi katodik). Pergeseran potensial ini menekan reaksi oksidasi logam utama sehingga laju korosi menurun secara signifikan. Elektron yang diterima pada permukaan katoda kemudian dikonsumsi oleh reaksi reduksi spesies yang tersedia di lingkungan, seperti reduksi oksigen terlarut dalam air laut.

Perkembangan teknologi material berpori, khususnya *metal foam*, membuka peluang peningkatan kinerja anoda korban melalui modifikasi porositas dan luas permukaan spesifik.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Logam Berpori dan Metal Foam

Logam berpori dan metal foam merupakan material logam yang memiliki pori-pori di dalam strukturnya, sehingga menghasilkan karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda dibandingkan logam padat konvensional. Keberadaan pori menyebabkan material ini memiliki densitas yang lebih rendah, sehingga bobotnya lebih ringan. Selain itu, struktur berpori menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi, yang berpengaruh signifikan terhadap interaksi material dengan lingkungan sekitarnya. Secara umum, performa mekanik maupun fungsional logam berpori sangat dipengaruhi oleh tingkat porositas, ukuran pori, distribusi pori, serta morfologi strukturnya. (Gibson, Ashby, 1997), (Ashby, Evans et al, 2000), (Banhart, 2001).

Metal foam merupakan salah satu bentuk logam berpori yang memiliki struktur seluler dengan distribusi pori yang relatif seragam dan tingkat porositas yang tinggi. Struktur seluler ini dapat berbentuk open-cell maupun closed-cell, tergantung pada keterhubungan antarpori di dalam material. Karakteristik tersebut memberikan kombinasi sifat unik, seperti rasio kekuatan terhadap berat yang baik, kemampuan penyerapan energi, serta peningkatan luas permukaan reaktif. (Banhart, J. 2001).

2.2 Hubungan Porositas dan Luas Permukaan Spesifik

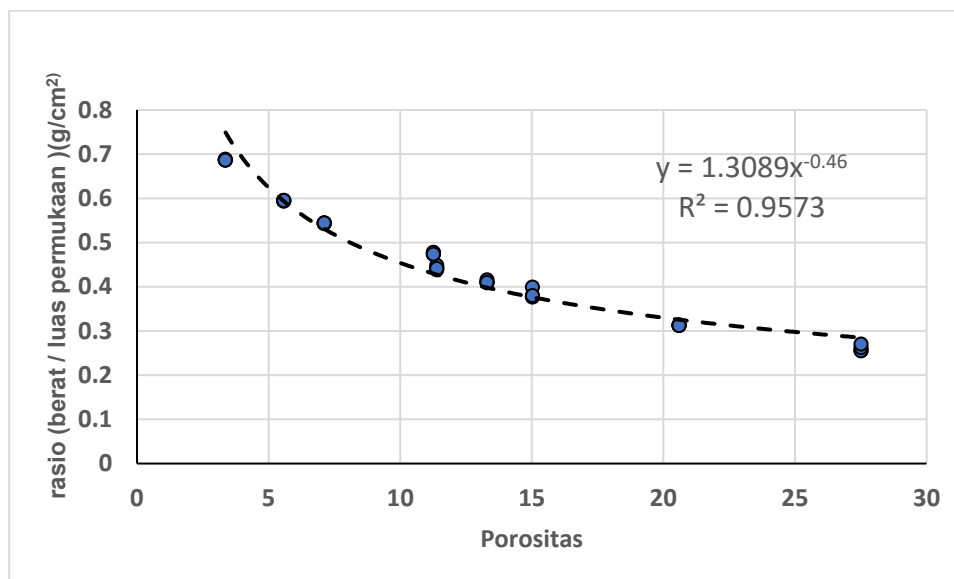
Rasio yang ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan perbandingan antara massa aluminium foam (gram) terhadap luas permukaannya (cm²). Luas permukaan aluminium foam mencakup luas permukaan eksternal (terpapar) serta luas permukaan internal yang berasal dari dinding pori-pori. Porositas merepresentasikan persentase volume pori di dalam struktur aluminium foam, yang secara langsung memengaruhi total luas permukaan efektif material.

Hubungan antara rasio massa anoda terhadap luas permukaan anoda dan tingkat porositas dapat dinyatakan melalui persamaan berikut (Dody,2023) :

$$Y=1,3089 X^{-0,46} \quad [1]$$

dengan Y menyatakan rasio massa anoda terhadap luas permukaan anoda (g/cm²), dan X menyatakan persentase porositas (%).

Gambar 1 menunjukkan bahwa peningkatan porositas aluminium foam menyebabkan peningkatan luas permukaan total material. Peningkatan luas permukaan ini berdampak pada penurunan rasio massa terhadap luas permukaan, yang berimplikasi pada distribusi arus anodik yang lebih merata. Akibatnya, laju korosi anoda cenderung lebih terkendali. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan efektif pada anoda dapat mempengaruhi karakteristik degradasi elektrokimianya.



Gambar 1. Korelasi Antara Porositas (%) dan Rasio Berat Anoda Terhadap Luas Permukaan Anoda (g/cm²)

2.3 Pengaruh Rasio Luas Permukaan Katoda/Anoda terhadap Laju Korosi

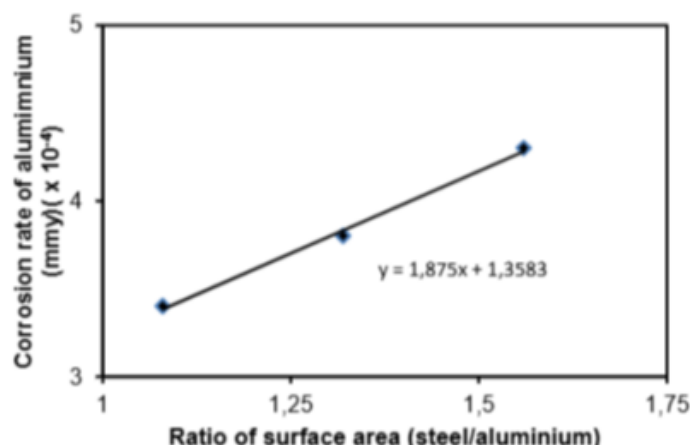
Peranan Rasio Luas Permukaan Katoda terhadap Anoda dalam Menentukan Laju Korosi (Fontana, 1987). Hubungan antara rasio luas permukaan katoda terhadap anoda dan laju korosi anoda dalam media HCl 10% (dengan katoda berupa baja dan anoda aluminium padat) dinyatakan melalui persamaan empiris (Dody, 2018) sebagai berikut:

$$y = 1,875x + 1,3583 \quad [2]$$

dengan y menyatakan laju korosi anoda (10^{-4} mm/tahun) dan x menyatakan rasio luas permukaan katoda terhadap anoda.

Persamaan tersebut menunjukkan adanya hubungan linier positif antara rasio luas permukaan katoda/anoda dan laju korosi anoda. Peningkatan rasio luas permukaan katoda terhadap anoda menyebabkan kenaikan laju korosi anoda secara proporsional. Secara elektrokimia, kondisi ini terjadi karena semakin besar area katoda relatif terhadap anoda, maka densitas arus anodik pada anoda meningkat, sehingga mempercepat proses pelarutan logam anoda. (Fontana, 1987)

Hubungan linier antara kedua parameter tersebut ditunjukkan pada Gambar 2. Temuan ini menegaskan pentingnya optimasi luas permukaan anoda dalam desain sistem proteksi katodik agar distribusi arus proteksi lebih efektif dan laju konsumsi anoda tetap terkendali.

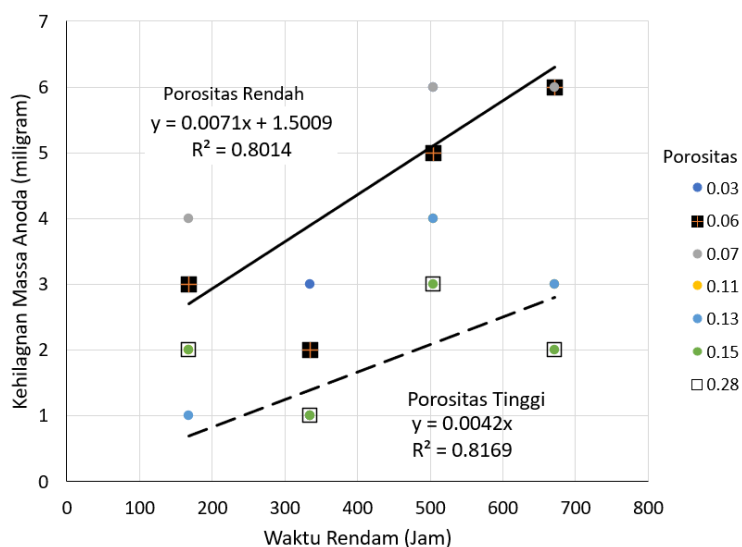


Gambar 2. Hubungan Laju Korosi Aluminium Terhadap Rasio Luas Permukaan Katoda/Anoda (Katoda: Baja; Anoda: Aluminium).

2.4 Kehilangan Massa Anoda terhadap Waktu Perendaman

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara kehilangan massa anoda dan waktu perendaman dengan variasi tingkat porositas. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa anoda dengan porositas yang lebih tinggi mengalami kehilangan massa yang lebih rendah dibandingkan anoda dengan porositas yang lebih rendah pada interval waktu yang sama. Secara umum, kehilangan massa meningkat seiring dengan bertambahnya waktu perendaman, yang menunjukkan berlangsungnya proses degradasi material secara progresif.

Namun demikian, anoda berporositas tinggi menunjukkan laju degradasi yang relatif lebih terkendali. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur berpori berperan dalam mendistribusikan reaksi elektrokimia secara lebih merata pada permukaan anoda, sehingga mengurangi konsentrasi arus lokal dan menekan terjadinya pelarutan yang tidak seragam. Dengan demikian, karakteristik porositas menjadi faktor penting dalam mengontrol mekanisme konsumsi anoda selama proses proteksi katodik.



Gambar 3. Kehilangan Massa Anoda terhadap Waktu Perendaman pada Variasi Porositas dalam air tawar. (Dody, 2023).

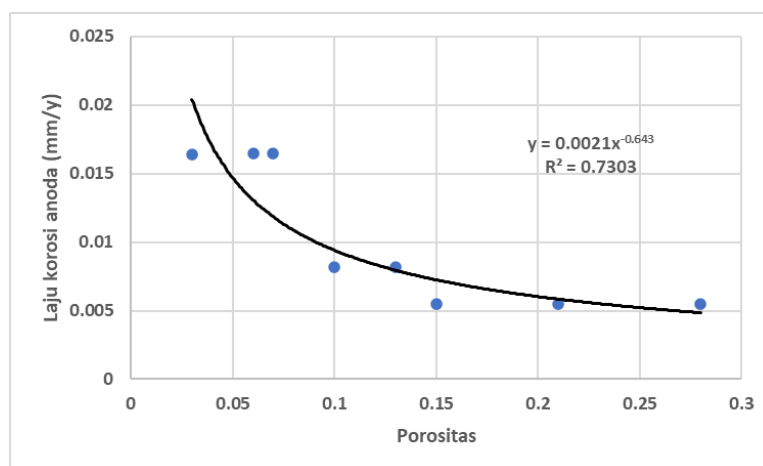
2.5 Pengaruh Porositas terhadap Laju Korosi

Gambar 4 menunjukkan bahwa peningkatan porositas dari 5% menjadi 15% menyebabkan penurunan laju korosi anoda yang signifikan, dari 0,02 mm/tahun menjadi 0,01 mm/tahun (sekitar 50%). Namun, peningkatan porositas di atas 10% tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap laju korosi, yang cenderung stabil pada kisaran 0,01 mm/tahun.

Hubungan matematis antara porositas dan laju korosi dinyatakan sebagai berikut:

$$y = 0.0021x^{-0.643} \quad [3]$$

di mana y adalah laju korosi anoda aluminium berpori (mm/y) dan x adalah porositas (%). Hasil ini menunjukkan adanya porositas optimum pada kisaran 15%.



Gambar 4. Laju Korosi Anoda Aluminium Berpori (mm/y) Terhadap Porositas Dalam Larutan air tawar Setelah 672 Jam Perendaman (Dody, 2023)

2.6 Uji Lapangan di Lingkungan Air Laut

Pengujian selama dua bulan pada zona submerged (terendam) menggunakan air laut Pantai Anyer dengan mesin simulasi ombak menunjukkan perbedaan laju korosi baja yang signifikan pada setiap kondisi perlindungan. Baja yang diproteksi menggunakan anoda berpori menunjukkan laju korosi sebesar 0,20 mm/tahun, sedangkan penggunaan anoda solid menghasilkan laju korosi sebesar 0,39 mm/tahun. Sementara itu, baja tanpa proteksi anoda mengalami laju korosi tertinggi, yaitu 0,70 mm/tahun. (Yuda, 2026), (Dody, 2024)

Hasil tersebut menunjukkan bahwa anoda berpori memberikan efektivitas proteksi yang lebih baik dibandingkan anoda solid. Baja tanpa sistem proteksi menunjukkan laju korosi paling tinggi, yang menegaskan pentingnya penerapan proteksi katodik pada lingkungan terendam. Struktur berpori pada anoda diduga meningkatkan efisiensi sistem proteksi katodik melalui peningkatan luas permukaan aktif, sehingga distribusi arus proteksi menjadi lebih merata dan efektif

3. PEMBAHASAN.

Hasil studi pustaka menunjukkan bahwa porositas merupakan parameter kunci yang memengaruhi kinerja elektrokimia anoda aluminium dalam sistem proteksi katodik. Secara fundamental, peningkatan porositas pada logam berpori dan *metal foam* menyebabkan bertambahnya luas permukaan spesifik akibat kontribusi permukaan internal dari dinding pori. Kondisi ini menurunkan rasio massa terhadap luas permukaan, sebagaimana ditunjukkan pada hubungan empiris ($Y = 1,3089X^{-0,46}$), yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi porositas, semakin kecil rasio massa per satuan luas permukaan. Dengan kata lain, luas permukaan efektif meningkat secara nonlinier terhadap porositas.

Peningkatan luas permukaan efektif ini berimplikasi langsung terhadap distribusi arus anodik. Berdasarkan prinsip elektrokimia, densitas arus merupakan fungsi dari luas permukaan aktif. Pada anoda berpori, arus proteksi dapat terdistribusi lebih merata sehingga mengurangi konsentrasi arus lokal (*localized current density*). Hal ini berkontribusi terhadap mekanisme pelarutan yang lebih homogen dan mengurangi kecenderungan terjadinya korosi tidak seragam (*localized attack*). (Shubham Agrawal, 2020)

Hubungan antara rasio luas permukaan katoda/anoda dan laju korosi yang dinyatakan oleh persamaan ($y = 1,875x + 1,3583$) memperkuat argumentasi tersebut. Peningkatan rasio luas katoda terhadap anoda menyebabkan kenaikan laju korosi anoda secara linier. Secara elektrokimia, semakin besar luas katoda relatif terhadap anoda, semakin tinggi densitas arus yang harus disuplai oleh anoda, sehingga mempercepat konsumsi anoda. Oleh karena itu, strategi peningkatan luas permukaan anoda melalui rekayasa porositas menjadi pendekatan rasional untuk menyeimbangkan rasio luas permukaan dan mengontrol laju degradasi.

Temuan pada pengujian kehilangan massa terhadap waktu perendaman menunjukkan bahwa anoda dengan porositas lebih tinggi mengalami kehilangan massa yang lebih rendah pada interval waktu yang sama. Meskipun degradasi tetap meningkat seiring waktu, laju konsumsi pada struktur berpori lebih terkendali. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan luas permukaan tidak serta-merta meningkatkan laju pelarutan, tetapi justru memperbaiki distribusi reaksi elektrokimia sehingga proses korosi berlangsung lebih stabil.

Analisis laju korosi terhadap porositas menunjukkan adanya kecenderungan penurunan laju korosi dari 0,02 mm/tahun menjadi 0,01 mm/tahun ketika porositas meningkat dari 5% menjadi 15%. Namun, di atas kisaran 10–15%, laju korosi cenderung mencapai kondisi stabil. Hal ini mengindikasikan keberadaan porositas optimum, di mana peningkatan luas permukaan telah cukup untuk menghasilkan distribusi arus yang merata, tetapi belum menurunkan integritas mekanik atau memperbesar jalur difusi elektrolit secara berlebihan. Dengan demikian, porositas sekitar 15% dapat dipertimbangkan sebagai kondisi optimum dalam sistem ini.

Validasi lebih lanjut diperoleh dari uji lapangan pada lingkungan air laut zona terendam (*submerged*). Anoda berpori menunjukkan laju korosi baja sebesar 0,20 mm/tahun, lebih rendah dibandingkan anoda solid (0,39 mm/tahun), dan jauh lebih rendah dibandingkan baja tanpa proteksi (0,70 mm/tahun). Hasil ini menegaskan bahwa rekayasa struktur pori meningkatkan efisiensi sistem proteksi katodik dalam kondisi lingkungan nyata yang dinamis. Peningkatan performa ini kemungkinan besar

disebabkan oleh kombinasi antara peningkatan luas permukaan aktif, distribusi arus yang lebih seragam, dan penurunan gradien potensial lokal pada permukaan baja.

Secara keseluruhan, sintesis hasil studi pustaka dan pengujian menunjukkan bahwa rekayasa porositas pada anoda aluminium bukan hanya memengaruhi sifat fisik material, tetapi juga mengoptimalkan mekanisme elektrokimia dalam sistem proteksi katodik. Pendekatan ini berpotensi menjadi strategi desain yang efektif untuk meningkatkan efisiensi proteksi sekaligus mengendalikan laju konsumsi anoda dalam aplikasi lingkungan laut.

4. KESIMPULAN

- a. Peningkatan porositas meningkatkan luas permukaan spesifik dan memperbaiki distribusi arus anodik.
- b. Rasio luas katoda/anoda berbanding lurus dengan laju korosi anoda.
- c. Anoda berpori menunjukkan kehilangan massa dan laju korosi yang lebih terkendali dibandingkan anoda solid.
- d. Porositas optimum berada pada kisaran $\pm 15\%$, dengan penurunan laju korosi hingga $\pm 50\%$.
- e. Uji lapangan membuktikan anoda berpori lebih efektif dalam menurunkan laju korosi baja di lingkungan laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann.
- Banhart, J. (2001). *Metal Foams: Production and Stability*. MIT Press.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 559–632.
- Dody Prayitno and M. Irsyad, 2018, "Effect of Ratio of Surface Area on The Corrosion Rate", *SINERGI* Vol. 22, No.1, February 2018: 7-12, DOAJ: [doaj.org/toc/2460-1217](https://doi.org/10.22441/sinergi.2018.1.002), DOI:doi.org/10.22441/sinergi.2018.1.002.
- Dody Prayitno, Joko Riyono, Herjuno Rizki, Trio Akhirul Anwar, 2023, "Pengembangan Metal Foam (Aluminium) Sebagai Anoda Korban Terhadap Laju Korosi Baja, Laporan Penelitian Unggulan Fakultas (Puf), Universitas Trisakti, https://simppm.trisakti.ac.id/public/data/laporan_penelitian_internal/525/Full-E3309CIJQTPooBNoV8TOHD6JK46QCATT.pdf
- Yudatama Mulia, 2026, Studi Perlindungan Korosi Pada Splash Zone Dengan Anoda Korban, Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti
- Dody Prayitno, Aji Dwi Prasetyo, 2023, "Proteksi Katodik: Pengaruh Bentuk Bangun Ruang Terhadap Laju Korosi Anoda", *Metrik Serial Humaniora Dan Sains (E) Issn: 2774-2377* Vol 4 No 1, Pp 18-25
- Mars G, Fontana (1987) *Mars Fontana-Corrosion Engineering*. McGraw-Hill
- Dody Prayitno, Annas Yuniar Konsinyawan, 2024, "Simulasi: Laju Korosi Baja Pelampung Di Media Air Laut Berombak" *Journal of Mechanical Engineering and*

Mechatronics, ISSN: 2527-6212, Vol. 9 No. 1, pp. 1 – 10, © 2024 Pres Univ Press
Publication, Indonesia

Shubham Agrawal, Peng Bai, 2020, “Operando Electrochemical Kinetics in Particulate
Porous Electrodes by Quantifying the Mesoscale Spatiotemporal
Heterogeneities” <https://doi.org/10.1002/aenm.202003344>
or [arXiv:2008.01880v2](https://arxiv.org/abs/2008.01880v2) [**physics.app-ph**]