

**PHYSICAL ANALYSIS ON CORROSION OF HIGH CORROSION-RESISTANCE
Mg ALLOYS
(ANALISIS FISISK KOROSI PADA MAGNESIUM PADUAN DENGAN
KETAHANAN KOROSI *)**

Ilhamdi

**Jurusan Tekni Mesin Fakultas Teknik
Universitas Andalas**

**Kampus Limau Manis Padang Universitas Andalas 25163
Sumatera Barat, Indonesia**

Telepon: +62-751-72586, FAX: +62-751-72566, E-mail: il_hamdi@ft.unand.ac.id

Abstrak

Magnesium banyak diaplikasikan karena karakteristiknya yang kuat tapi ringan, namun memiliki kelemahan dalam ketahanan korosi pada medium relative korosif. Sejauh ini perlindungan korosi terhadap Mg sedang berkembang pesat. Akan tetapi, standar pengujian korosi pada Mg, termasuk JIS H0541 tidak terlalu sesuai untuk menguji korosi pada Mg dengan lapisan pelindung korosi.

Penelitian ini menggunakan magnesium paduan (AZ31 dan AZ91) yang dibingkai dalam resin epoxy. Beberapa spesimen dikenakan perlakuan pelapisan konversi dalam larutan 0.1mM $La(NO_3)_3$ dan 0.1mM $Mg(NO_3)_2$. Kemudian diuji korosi pada larutan 3% NaCl, temperatur ruangan selama 48 jam, dengan pH awal 10-11.

Hasil penelitian menunjukkan memperlihatkan fenomena korosi yang berbeda; korosi lebih general terjadi pada AZ31, sedangkan korosi lokal pada AZ91. Karakter dari kedua jenis korosi ini juga akan memberikan sudut pandang evaluasi yang berbeda, dimana korosi AZ31 bisa dijelaskan oleh perkembangan luas korosi, sedangkan pada AZ91 tidak bias dijelaskan dengan parameter ini. Pelapisan koversi memberikan perlindungan sangat bagus diawal pengujian, namun perlindungan melemah dan permukaan specimen terkorosi menyeluruh setelah 48 jam. Dari hasil-hasil ini, metode evaluasi korosi yang lebih baik diajukan.

Kata kunci: Korosi, Paduan Mg, area, penetrasi, evaluasi korosi.

1. Pendahuluan

Magnesium paduan memiliki rasio kekuatan terhadap terhadap berat yang tinggi dan mampu cor yang bagus [1]. Rasio kekuatan terhadap berat sangat penting untuk aplikasi di dunia industri seperti otomotif, perkapalan, pesawat terbang dan perkereta apian. Pemakaian magnesium paduan pada aplikasi ini mampu menurunkan berat kendaraan, yang pada akhirnya menurunkan konsumsi bahan bakar fosil dan emisi gas buangan [2].

Akan tetapi kelamahan dalam ketahanan korosi ketika terekspos ada lingkungan relatif korosif menjadi batasan penggunaan magnesium paduan. Sehingga usaha peningkatan ketahanan korosi pada magnesium dan paduan, dengan tanpa perubahan berarti pada rasio kekuatan-berat menjadi sangat penting untuk dilakukan.

Ada beberapa teknik yang bisa diaplikasikan untuk meningkatkan ketahanan korosi magnesium paduan,

diantaraya adalah pelapisan konversi [3] dan pelapisan anodik [4]. Kedua metode ini merupakan pelapisan dengan bahan kimia dan sedang giat dikembangkan oleh para periset dan ilmuwan pada dekade belakangan ini.

Penggunaan pelapisan kromat paling populer diantara yang lainnya, karena mampu menyediakan ketahanan korosi yang sangat bagus pada magnesium paduan. Namun penggunaan substansi kromat ini mulai dibatasi karena adanya molekul hexavalen kromat yang sangat berbahaya dan beracun ketika terekspos ke udara [5]. Sehingga pelapisan dengan zat kimia hijau/tak beracun menjadi sebuah harapan baru dalam dunia penelitian. Diantara zat kimia hijau ini adalah rare earth metal, yaitu metal-metal pada deret Lantanida.

Di sisi lain, standar-standar pengujian korosi magnesium paduan seperti JIS H0541 terlihat tidak terlalu sesuai untuk spesimen dengan lapisan pelindung dan spesimen yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi. Adalah sesuatu hal yang penting untuk menemukan



metode evaluasi yang lebih cocok, baik dan akurat untuk ketahanan korosi pada magnesium paduan.

Standar pengujian yang ada, JIS H0541 menggunakan asumsi perubahan massa karena korosi memiliki hubungan dengan degradasi kekuatan mekanik pada spesimen. Hal ini sederhana dan sangat cocok untuk korosi yang terjadi secara seragam. Pada kenyataannya tidak semua korosi yang terjadi pada magnesium paduan merupakan korosi seragam, ada beberapa jenis korosi lokal terkadang ditemukan. Sejauh ini belum ada riset yang dilaporkan tentang evaluasi korosi pada magnesium paduan tentang fenomena fisik korosi secara detail. Dalam penelitian ini, perilaku fisik korosi pada magnesium paduan akan diamati dibawah mikroskop metalurgi. Sebagian dari magnesium akan diberikan perlakuan pelapisan konversi dan sebagian yang lain tanpa perlakuan pelapisan. Hasil-hasil pengamatan dibandingkan dengan pengurangan massa (JIS H0541). Berdasarkan hasil ini, sebuah metode evaluasi korosi yang rasional pada magnesium paduan dengan lapisan pelindung diinvestigasi.

2. Eksperimen

2.1 Spesimen

Magnesium paduan yang digunakan dibeli di pasaran dalam bentuk batangan dan silinder. Spesimen dibuat dengan memotong magnesium paduan tersebut menjadi ukuran penampang 10 x 10 mm dan 3 x 3 mm. Spesimen batangan dilambangkan dengan B, sedangkan yang silinder dengan S.

Spesimen berupa magnesium paduan yang telah dipotong, dibingkai dalam campuran resin Epofix-Struer dan hardener epofix dengan perbandingan 1 : 8,5. Setelah kering sempurna (lebih kurang 24 hours), spesimen diampelas dengan kertas abrasif secara bertingkat dari mesh 240, 400, 800, 1000 dan 1500, dan diakhiri dengan pemolesan pasta alumina 0.1 μm . Pemolesan selesai setelah permukaan seperti cermin tercapai pada spesimen.

Beberapa spesimen direndam dalam campuran larutan 0.1mM $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ dan 0.1mM $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3$ selama 5 jam. Proses pelapisan konversi pada komposisi telah menghasilkan perlindungan terhadap korosi yang bagus terhadap magnesium paduan [3,8]. Spesimen yang dilapisi ini diistilahkan sebagai spesimen dilapisi, sedangkan spesimen yang tidak dilapisi diistilahkan dengan spesimen tak terlapisi.

Untuk mengetahui komposisi spesimen dilakukan analisis pada SEM (JEOL Rint 2500) di Toyohashi University of Technology.

2.2 Pengujian Korosi

Sebelum pengujian korosi dilakukan, terlebih dahulu massa spesimen ditimbang diatas timbangan digital, sebagai massa awal.

Pengujian korosi dilakukan pada larutan setara air laut yakni larutan aquaeous 3% NaCl. Spesimen direndam dalam larutan 3% NaCl selama 48 jam. Pengujian korosi dilakukan pada pH awal 10-11 dan temperatur ruang.

Salah satu spesimen dikeluarkan dari larutan pada saat 6, 12, 24 dan 48 jam perendaman, untuk melihat perkembangan korosi pada spesimen tersebut. Sebelum diamati spesimen terlebih dahulu dibersihkan dengan gundar gigi plastik dan disiram dengan air yang mengalir, lalu dikeringkan dengan hair dryer dan larutan alkohol.

Sebagian spesimen yang lain dikeluarkan pada waktu-waktu tersebut untuk diteliti secara partikular.

Untuk melihat pengaruh korosi terhadap massa spesimen, dilakukan penimbangan spesimen pada timbangan digital setelah dikeringkan pada temperatur 90. C selama 24 jam.

2.2 Pengamatan Korosi

Spesimen terkorosi ditimbang, dilanjutkan dengan pengamatan dibawah mikroskop metalurgi. Pengamatan ini bermaksud untuk melihat tingkat kerusakan korosi yang terjadi pada permukaan spesimen tersebut.

Tingkat kerusakan korosi dapat diukur sebagai luas permukaan korosi, jumlah cacat dan kekasaran permukaan bagian yang terkorosi. Tingkat kerusakan korosi ini bisa menggambarkan ketahanan korosi dari spesimen, dimana semakin besar kerusakan korosi yang terjadi maka semakin rendah ketahanan korosi dari spesimen uji.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Komposisi kimia spesimen

Hasil analisis komposisi sampel spesimen bisa dilihat pada Tabel 1. Tabel tersebut menunjukkan bahwa kedua jenis spesimen memiliki komposisi yang berbeda. Spesimen B memiliki komposisi paduan utama magnesium; yakni aluminium (Al) sekitar 9% sedangkan hanya sekitar 1% Al dijumpai pada spesimen S. Namun komposisi paduan utama yang lain; yakni seng (Zn) didapati relatif setara pada kedua spesimen yaitu sekitar 1 %.

Angka komposisi specimen bahwa mengindikasikan bahwa spesimen B mendekati komposisi AZ91, sedangkan spesimen S adalah tipe AZ31.



Tabel 1. Komposisi spesimen

Unsur	Al	Zn	Si	Cu	Ca	Mn	Fe	Ni	Mg
Spesimen B	8.3-9.7	0.35-1.0	0.10-max	0.03-max		0.15-max	0.005-max	0.002-max	Bal
Spesimen S	2.5-3.5	0.6-1.4	0.10-max	0.05-max	0.04-max	0.2-1.0	0.005-max	0.005-max	bal

3.2 Efek ukuran spesimen dan jenis korosi.

Spesimen dengan ukuran berbeda terkadang memberikan fenomena fisik yang berbeda pada permukaan terkorosinya. Gambar 2 memperlihatkan hasil yang kontras antara spesimen B (AZ31) dengan spesimen S (AZ91). Sekitar setengah dari total permukaan uji spesimen AZ91 tak terlapsi yang berukuran 3x3 mm telah terkorosi setelah 36 jam perendaman. Sedangkan pada spesimen ukuran 10x10 mm hanya terkorosi 4,5% dari permukaannya, pada waktu yang sama.

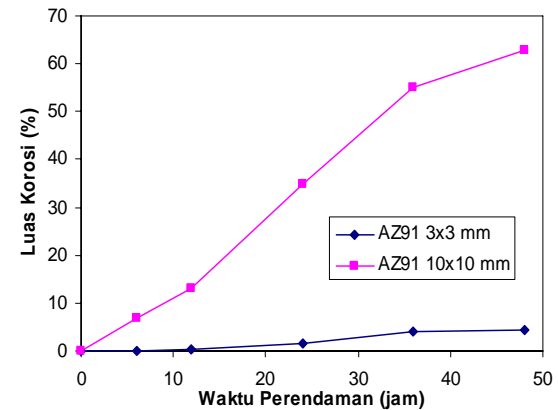
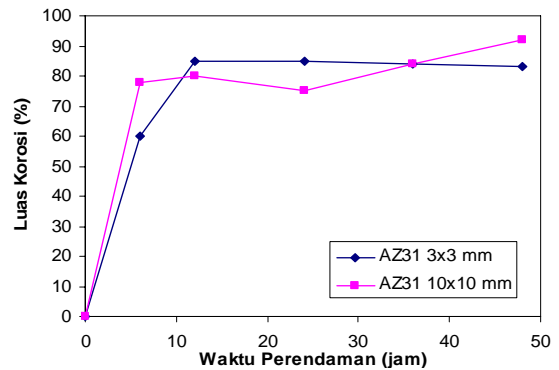
Sedangkan permukaan terkorosi pada spesimen AZ31 tak terlapsi hampir sama antara ukuran 3x3 mm dengan 10x10 mm, yakni sekitar 80% setelah 36 jam perendaman.

Ukuran spesimen relatif tidak berpengaruh terhadap persentase luas korosi pada AZ31, sedangkan pengaruh sangat jelas terlihat pada AZ91 yaitu persentase korosi meningkat drastis dengan peningkatan ukuran spesimen.

Secara parsial perkembangan korosi bisa dibatasi oleh ukuran permukaan uji spesimen. Dalam hal ini, ukuran spesimen sebesar 10x10 mm cukup memperlihatkan jenis korosi yang terjadi secara lebih sempurna dan detail. Sehingga spesimen dengan penampang uji 10x10 mm lebih disukai untuk eksperimen berikutnya.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa korosi yang terjadi pada AZ31 lebih menyeluruh dibandingkan pada AZ91, lebih dari 66% permukaan spesimen tak terlapsi AZ31 mengalami korosi setelah 6 jam perendaman. Ini mengindikasikan secara jelas bahwa korosi pada AZ31 berkembang secara cepat dipermukaan pada luas daerah. Pola ini berakhir menjadi korosi general/seragam setelah 36 jam perendaman.

Pola penjaralan korosi bisa digambarkan seperti penjaralan akar pohon yang menjari dalam tanah atau seperti air mengalir dalam sebuah sistem saluran yang bercabang-cabang; berawal dari satu titik terus berekspansi ke daerah sekitarnya secara tak beraturan. Tipe ini bisa dikatakan sebagai korosi filiform.



Gambar. 2. Persentase luas korosi (atas) AZ31 dan (bawah) AZ91 selama uji korosi dalam larutan 3%NaCl.

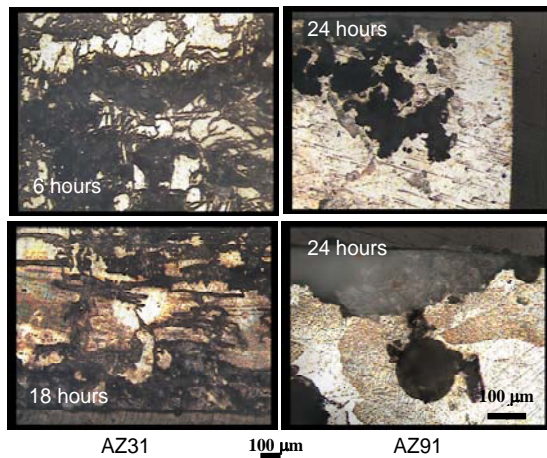
Keseragaman penyebaran unsur paduan dipermukaan AZ31 mungkin berkontribusi terhadap fenomena perkembangan korosi ini. Keseragaman distribusi dari unsur paduan membuat probability korosi terjadi dipermukaan relatif sama [1].

Sebaliknya, Gambar 3 juga memperlihatkan korosi yang terjadi pada AZ91 terlihat lebih kecil magnitud luas korosinya meski direndam lebih lama (24 jam). Setelah terkorosi sebagai sebuah titik hitam dipermukaan, korosi terlihat berkembang secara lambat pada luas permukaannya dengan fungsi waktu. Fenomena ini termasuk jenis korosi lokal, sesuai dengan Gambar 2 dimana hanya sekitar 1.5% permukaan terkorosi setelah 24 jam perendaman. Secara tegas korosi ini termasuk jenis korosi pitting.

Bintik-bintik hitam korosi sumuran ukuran kecil dan besar dijumpai tersebar dan berkelompok pada beberapa tempat tertentu di permukaan spesimen, membentuk koloni-koloni korosi.

AZ91 telah dikenal kurang seragam dibandingkan AZ31 [6]. Daerah koloni korosi memiliki konsentrasi elemen yang mudah terkorosi (seperti Fe) lebih tinggi pada daerah tersebut dibandingkan pada daerah tak terkorosi.





Gambar 3. Tampilan korsi AZ31 dan AZ91 selama uji korsi dalam larutan 3% NaCl; (atas) spesimen tak terlapsi (bawah) spesimen terlapsi.

Gambar 3 juga memperlihatkan fenomena korsi yang sama antara spesimen tak terlapsi dengan spesimen tak terlapsi dalam pola korsi yang terjadi. Pelapsian korsi terlihat tidak mempengaruhi jenis korsi pada spesimen, tetapi mampu menekan tingkat kerusakan korsi berupa mengurangi wilayah korsi.

3.3. Perilaku korsi AZ31

Pengamatan langsung proses korsi dan fotografi spesimen pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa setelah lapisan permukaan paling spesimen terkorosi ringan dan menyeluruh, korsi kemudian terkonsentrasi pada beberapa area tertentu dan berkembang pada luas permukaan dengan fungsi waktu. Perkembangan korsi yang kedua ini memberikan warna yang lebih gelap dibandingkan warna serangan pertama.

Peningkatan luas korsi pada permukaan AZ31 secara signifikan terlihat pada 6 jam pertama perendaman, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 5; lebih dari 60% permukaan terkorosi. Akan tetapi setelah waktu ini, kurva perkembangan luas korsi terlihat berubah secara perlahan menjadi lebih horizontal.

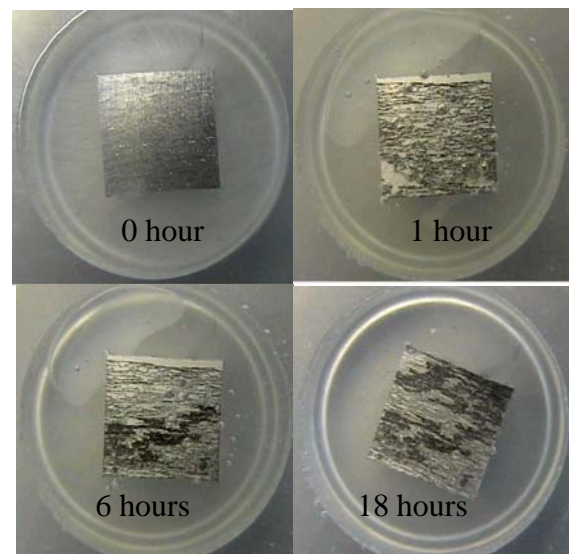
Penambahan waktu perendaman setelah 6 jam ini tidak terlalu banyak berpengaruh terhadap penambahan luas area korsi, sampai mencapai titik jenuh sekitar 80%. Dipertimbangkan bahwa korsi berkembang lebih dominan pada arah selain luas permukaan setelah waktu ini.

Bagaimanapun, secara fisik persentase luas korsi cukup bisa mewakili keadaan korsi pada AZ31 terutama pada beberapa jam awal proses korsi. Parameter

persentase luas korsi ini bahkan terlihat lebih dominan dibandingkan terhadap perubahan massa (JIS H0541) seperti pada Gambar 6. Garis oval pada gambar tersebut memperlihatkan secara jelas bahwa persentase luas korsi lebih mampu menerangkan perkembangan korsi dibandingkan perubahan massa.

Gambar 5 juga memperlihatkan pengurangan gap antara kurva AZ31 tak terlapsi dengan AZ31 terlapsi sesuai dengan peningkatan waktu perendaman. Kedua kurva terlihat akan berhimpit pada 48 jam perendaman. Hal ini juga mengindikasikan bahwa teknik pelapsian konversi memberikan perlindungan yang bagus terhadap serangan korsi pada AZ31 di awal masa perendaman, namun perlindungan melemah dengan waktu uji korsi. Dan spesimen terkorosi secara berat dalam waktu 48 jam.

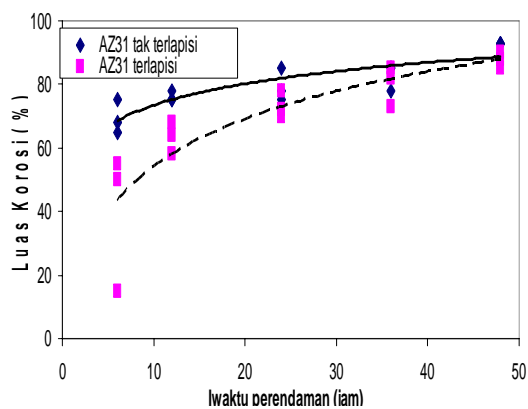
Selain itu, saat perendaman selama 10 jam, lebih dari 50% permukaan spesimen AZ31 terlapsi dan lebih dari 70% permukaan AZ31 tak terlapsi telah terkorosi. Dipertimbangkan pada saat ini dan seterusnya pelapsian konversi sudah menjadi meaning less (tanpa arti).



Gambar 4. Fotografi spesimen AZ31 selama proses korsi dalam larutan 3% NaCl.

Namun demikian, tingkat kerusakan korsi pada spesimen AZ31 terlapsi terlihat masih lebih rendah sampai mencapai 24 jam perendaman, seperti yang terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6). Tetapi setelah mencapai 36 dan 48 jam, tingkat kerusakan sudah mencapai magnitudo yang sama. Pada saat ini, parameter perubahan massa lebih disukai karena lebih mudah diamati dan diukur dibandingkan persentase luas korsi.





Gambar. 5. Persentase luas korosi AZ31 selama uji korosi dalam larutan 3% NaCl.

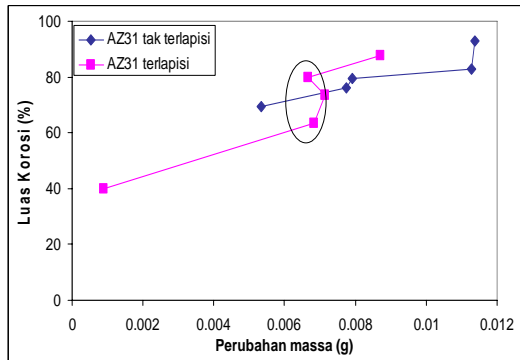


Fig. 6. Corrosion area vs weight loss of AZ31 during corrosion test in 3% NaCl. (titik pada kurva mengindikasikan waktu perendaman secara berurutan dari kiri ke kanan 6, 12, 24, 24 dan 48 jam).

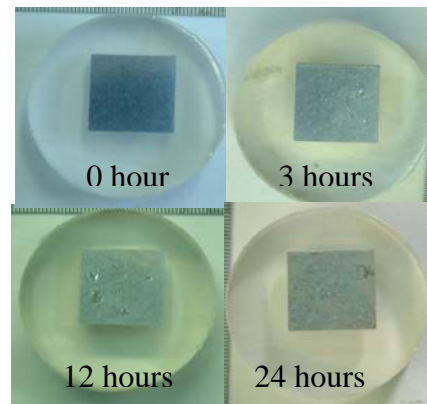
3.4. Perilaku korosi AZ91

Pengamatan langsung dan fotografi spesimen selama proses korosi dalam larutan 3% NaCl memperlihatkan bahwa setelah kemunculan bintik hitam korosi di permukaan spesimen tak terlapi AZ91 pada area tertentu, perkembangan korosi hanya berlanjut pada daerah tersebut dan sekitarnya. Korosi ini akan berkembang menjadi kumpulan korosi (koloni), seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.

Perkembangan korosi seperti koloni ini berkorelasi positif dengan perkembangan persentase luas korosi pada Gambar 8; dimana hanya sekitar 5% permukaan spesimen tak terlapi yang terkorosi selama perendaman 48 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa persentase luas korosi belum cukup mewakili keadaan korosi pada AZ91. Dipertimbangkan bahwa korosi pada

magnesium paduan AZ91 berkembang lebih jelas dan signifikan pada arah selain luas korosi.

Parameter lain yang teramati selama proses korosi adalah jumlah pit (korosi sumuran). Jumlah pit ini dihitung berdasarkan jumlah titik hitam korosi yang tersebar di permukaan selama proses korosi. Tren kurva jumlah pit cenderung meningkat dengan waktu perendaman. Namun jumlah pit sebenarnya terlihat variatif, seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 7. Fotografi AZ91 selama proses korosi dalam larutan 3% NaCl.

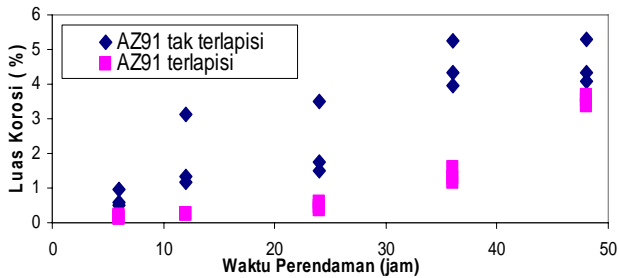
Fenomena ini bisa dijelaskan dengan proses perkembangan pit. Pit diinisiasi sebagai titik/bintik hitam di permukaan spesimen AZ91, kemudian berkembang dengan cara menjadi lebih besar dari segi ukuran dan pemunculan pit-pit baru. Perbesaran ukuran pit terjadi dengan cara perkembangan pit tunggal dan/atau melalui penggabungan (unifikasi) beberapa pit [7].

Hal tersebut hanya bisa meningkatkan persentase luas korosi dalam skala yang relatif kecil. Ini menjadi beralasan karena ukuran pit-pit yang relatif kecil, sedangkan ukuran pit unifikasi yang tidak terlalu besar. Secara tidak langsung, jumlah pit kurang bisa menggambarkan kondisi korosi secara jelas dan detail. Dan parameter ini kurang disukai karena sedikit rumit dalam penghitungannya.

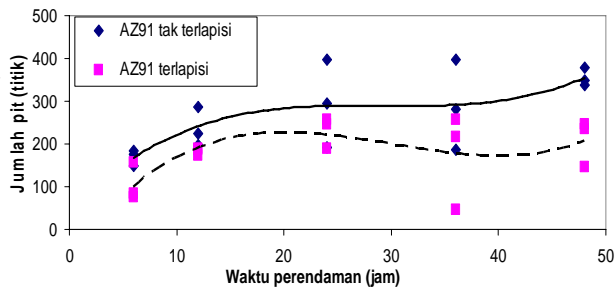
Kurva perubahan massa spesimen tak terlapi AZ91 terhadap persentase luas korosi selama proses korosi cukup jelas secara grafis. Namun dengan magnitudo yang relatif sangat kecil (0.006 – 0.008 g), membuat parameter ini terkadang sukar dideteksi dan sangat tergantung dengan kehandalan alat ukur. Mungkin setelah 48 jam, perubahan massa bisa dilakukan lebih mudah pada spesimen tak terlapi AZ91. Secara keseluruhan belum ada faktor yang betul-betul dominan pada korosi AZ91.



Pelapisan konversi terlihat memberikan perlindungan yang sangat bagus di awal masa perendaman uji korosi kepada spesimen AZ91. Seperti fenomena pada AZ31, perlindungan oleh pelapisan konversi pada AZ91 ini melemah dengan waktu perendaman uji korosi.

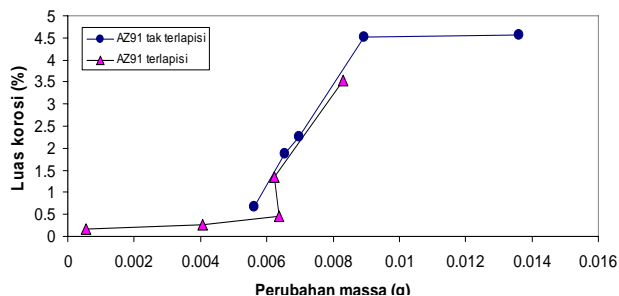


Gambar 8. Persentase luas korosi AZ91 selama proses korosi dalam larutan 3% NaCl



Gambar 9. Jumlah pit AZ91 selama proses korosi dalam 3% NaCl.

Kerusakan persentase luas korosi pada spesimen terlapsi AZ91 bisa diminimalisir sampai dengan 36 jam, perlindungan secara prima (persentase luas korosi kurang dari 1%) bisa bertahan sampai 24 jam. Namun setelah 36 jam, perlindungan sudah tidak ada lagi terhadap AZ91, seperti yang pada Gambar 8.



Gambar 10. Persentase luas korosi terhadap perubahan massa AZ91 selama proses korosi dalam 3% NaCl.

Sedangkan pengaruh pelapisan konversi terhadap jumlah pit sukar dilihat pada Gambar 9, meski secara umum jumlah pit spesimen terlapsi AZ91 bisa ditekan di awal masa perendaman. Ini disebabkan oleh beberapa titik deposit pelapisan di permukaan spesimen berperan juga sebagai pemicu beda potensial dua tempat pada internal spesimen.

Hal sebaliknya terlihat perubahan massa spesimen terlapsi cukup sukar dideteksi oleh alat ukur. Harga perubahan massa untuk spesimen terlapsi AZ91 sangat kecil sekali (maksimum 0.08 g setelah 48 jam). Hal ini menegaskan bahwa evaluasi korosi berdasarkan parameter perubahan massa tidak valid untuk magnesium paduan dengan ketahanan korosi tinggi dan di awal masa perendaman.

4. Kesimpulan

Penelitian eksperimental pada magnesium paduan telah dilakukan pada larutan 3% NaCl. Beberapa poin penting yang bisa diambil adalah;

1. Spesimen yang digunakan adalah magnesium paduan tipe AZ31 untuk spesimen silinder, dan AZ91 untuk spesimen batangan.
2. Jenis korosi pada AZ31 adalah tipe filiform, sedangkan lokal (korosi sumuran/pitting) terjadi pada AZ91.
3. Ukuran penampang uji spesimen berpengaruh besar dalam perkembangan korosi AZ91, sedangkan pada AZ31 relatif tidak berpengaruh. Penampang 10x10 mm lebih representatif dibandingkan 3x3 mm.
4. Persentase luas korosi memainkan peranan penting dalam korosi AZ31. Sedangkan parameter penting pada korosi AZ91 belum ditemukan.
5. Pelapisan konversi tidak mempengaruhi jenis korosi yang terjadi, tetapi mampu menurunkan magnitudo kerusakan korosi dalam waktu tertentu.
6. Perubahan massa tidak bisa menggambarkan keadaan korosi magnesium paduan pada awal masa perendaman uji korosi, terutama magnesium paduan dengan ketahanan korosi tinggi.



Acknowledgement

Sebagian dari penelitian ini dilakukan di Toyohashi University of Technology (TUT) Japan. Penulis ucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada T. Takenaka-sensei, Zamzuri dan T. Matsumoto. Penelitian akan dilanjutkan pada pembahasan fenomena fisik lebih detail dengan pengamatan alat optik lebih baik.

Daftar Pustaka

- [1] Ishizaki Takahiro et all, Anticorrosive magnesium phosphate coating on AZ31 magnesium paduan, *Surface and Coatings Tech.* 203 (2009) pp. 2288-2291
- [2] S.V Lamak et all, Novel Hybrid sol-gel coatings for corrosion protection of AZ31B magnesium alloy, *Electrochimica acta* 53 (2008) pp. 4773-4783.
- [3] Takenaka Toshihide et all, Improvement of Corrosion Resistance of Magnesium Metal by Rare Earth Elements, *Electrochimica Acta* 53 (2007) pp. 117-121
- [4] Barchiche C.-E. et all, Corrosion resistance of plasma-anodized AZ91D magnesium paduan by electrochemical methods, *Electrochimica Acta* 53 (2007) pp. 417-425
- [5] A.N. Khramov et all, Sol-gel coating with phosphonate functionalities for surface modification of magnesium alloys, *Thin solid films* 541 (2006), pp. 175-181.
- [6] Chen Jian et all, In situ observation of pit initiation of passivated AZ91 magnesium paduan, *Corr. Sci.* 51 (2009) pp. 477-484.
- [7] Pidaparti R. M. et all, Analysis of Pits Induced Stresses due to Metal Corrosion, *Corr. Sci.* 51 (2008) pp. 1932-1938.
- [8] Narazaki, Effect of formation of oxide coating with rare earth elements on magnesium paduan, Thesis on Master Degree, Toyohashi University of Technology (2006)



