
MEKANISME KOROSI PADUAN AlMg₂ DAN AlMgSi: PENDEKATAN TERMODINAMIKA DAN KINETIKA HETEROGEN

Muchlis Badruzzaman¹, Sigit², Eric Johneri²

¹Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Garut
Pusbangtek Bahan Bakar Nuklir dan Daur Ulang – BATAN, Serpong

ABSTRAK

MEKANISME KOROSI PADUAN AlMg₂ DAN AlMgSi: PENDEKATAN TERMODINAMIKA DAN KINETIKA HETEROGEN. Telah dilakukan percobaan korosi terhadap paduan logam AlMg₂ dan AlMgSi yang dipakai sebagai bahan struktur elemen bakar RSG-GAS di Serpong, dengan tujuan untuk mengetahui mekanisme korosinya yang ditinjau melalui pendekatan termodinamika dan kinetika heterogen. Percobaan korosi dilakukan pada temperatur antara 50-90°C atau 323-363 K dan waktu berkisar 100-350 jam dalam sistem statik dengan menggunakan metode kehilangan berat secara diskontinyu. Sampel yang telah terkorosi dalam media air ditimbang untuk menentukan banyaknya logam yang terlarut, kemudian dibuat kurva korosi dan kinetiknya. Gambaran tentang laju korosi dapat diungkapkan dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut: untuk AlMg₂, $\ln k = 13,56 - 6058 (1/T)$, dan untuk AlMgSi, $\ln k = 11,23 - 5486 (1/T)$. Dari hasil percobaan yang diperoleh baik yang berupa kurva korosi, kinetika maupun harga energi aktivasi, dapat diajukan mekanisme korosi paduan logam aluminium yang ditinjau melalui pendekatan termodinamika dan kinetika heterogen.

KATA KUNCI: AlMg₂, AlMgSi, Mekanisme korosi, Termodinamika, Kinetika heterogen

ABSTRACT

CORROSION MECHANISM OF AlMg₂ AND AlMgSi ALLOYS: THERMODYNAMICS AND HETEROGENEOUS KINETICS APPROACHES. The experiments on corrosion of AlMg₂ and AlMgSi metal alloys which are used as structural materials of RSG-GAS fuel elements at Serpong, have been carried out at temperatures of 50-90°C or 323-363 K for 100-350 hours in a static system by using discontinue weight loss method in order to establish the corrosion mechanism of AlMg₂ and AlMgSi through thermodynamics and heterogeneous kinetics approaches. The samples corroded in water media were weighed to determine the dissolved metal, and then the corrosion and kinetics curves were constructed. Rate of corrosion is expressed by Arrhenius equation: for AlMg₂, $\ln k = 13,56 - 6058 (1/T)$, and for AlMgSi, $\ln k = 11,23 - 5486 (1/T)$. From the experiment results obtained, i.e. the corrosion curves, the kinetics as well as the activation values, a corrosion mechanism of aluminum alloys is proposed using thermodynamics and heterogeneous kinetics approaches.

FREE TERMS: AlMg₂, AlMgSi, Corrosion mechanism, Thermodynamics, Heterogeneous kinetics

I. PENDAHULUAN

Bahan struktur atau kelongsong yang digunakan untuk elemen bakar nuklir memerlukan persyaratan khusus seperti sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap radiasi, ketahanan terhadap korosi, sifat fisis dan kimia yang memadai, dan penyerapan neutron termal yang rendah. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan struktur reaktor nuklir adalah berilium, magnesium, aluminium, zirkonium dan paduannya^[1]. Kelongsong elemen bakar nuklir berfungsi untuk mengungkung keluarnya hasil fisi ke pendingin primer yang timbul akibat reaksi nuklir dari bahan bakar berbasis uranium yang digunakan. Pada reaktor riset, paduan aluminium dipakai sebagai bahan struktur dan dukung elemen bakarnya.

Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong menggunakan paduan logam aluminium AlMg-2 dan AlMgSi sebagai bahan struktur (kelongsong) pada elemen bakar nuklir. Posisi bahan bakar berada di teras reaktor pada kedalaman tertentu dari kolam yang berisi air pendingin. Bahan tersebut dipakai karena sifat-sifatnya memenuhi syarat sepertiampang serapan neutron rendah, daya tahan korosi tinggi, mudah dibentuk, dan kekuatan mekanik yang memadai^[1].

Selama reaktor beroperasi, elemen bakar nuklir mengalami bermacam-macam fenomena fisis, kimia, nuklir dan metalurgi sedemikian sehingga pada suatu saat mungkin tidak lagi memberikan unjuk kerja yang memadai sebagai bahan bakar. Salah satu fenomena penting sehubungan dengan adanya interaksi AlMg-2 sebagai kelongsong bahan bakar dan AlMgSi sebagai pemegang perangkat elemen bakar dengan air pendingin adalah fenomena korosi yang mengakibatkan terjadinya pengikisan permukaan kelongsong karena bersinggungan langsung dengan aliran air^[2]. Hal ini akan menyebabkan penipisan kelongsong sehingga memungkinkan terjadinya kebocoran pada bahan bakar jenis pelat dan dispersi. Dengan demikian, sangat besar artinya penelaahan tentang korosi untuk keperluan keselamatan.

Dalam tulisan ini akan dibahas mengenai kinetika korosi dan mekanisme korosi dalam air dari paduan logam aluminium AlMg-2 dan AlMgSi yang ditinjau melalui pendekatan termodinamika dan kinetika heterogen.

II. TATA KERJA

Bahan yang dipakai adalah paduan logam aluminium AlMg-2 dan AlMgSi yang sudah mengalami pengerolan dan merupakan bahan yang dipakai untuk kelongsong bahan bakar RSG-GAS. AlMg-2 mengandung 1,7-2,4%Mg, 0,3%Si, 0,4%Fe, 0,2%Zn dan 0,2%Ti sedangkan AlMgSi mengandung 0,6-1,2%Mg, 0,75-1,3%Si, 0,5%Fe, 0,1%Cu, 0,4-1,0%Mn dan 0,2%Zn. Bahan tersebut dipotong dengan ukuran 2×1,5×0,6 cm, dihaluskan dengan gerinda lalu dicuci dan dikeringkan. Setelah itu sampel dimasukkan ke dalam gelas berisi air bebas mineral sebanyak 250 ml, dan temperaturnya diatur dari 50-90°C dengan waktu berkisar antara 100-350 jam. Sampel yang telah selesai diuji diambil, dibersihkan dari kotoran yang menempel, dikeringkan lalu ditimbang. Perbedaan berat sebelum dan sesudah percobaan dicatat. Data yang diperoleh kemudian dievaluasi untuk menentukan kurva korosi dan kinetika.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Korosi AlMg-2 dan AlMgSi dalam Air

Data percobaan korosi AlMg-2 dan AlMgSi dalam air dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Tampak bahwa baik untuk AlMg-2 maupun AlMgSi, semakin tinggi temperatur pelarutan semakin besar pula korosi yang terjadi. Untuk AlMg-2, korosi ini menjadi lebih besar

setelah temperatur mencapai 353 K (Gambar 1), sedangkan untuk AlMgSi kondisi tersebut terjadi setelah temperatur 343 K (Gambar 2). Hal ini diduga disebabkan oleh salah satu tahapan proses yang mengontrol reaksi secara keseluruhan seperti adsorpsi, reaksi eksternal dan internal. Setelah temperatur tersebut, pembelokan kurva linier dimungkinkan oleh pengontrolan lebih dari satu tahapan proses campuran antara difusi-adsorpsi atau difusi-reaksi internal.

Data percobaan korosi AlMg-2 dan AlMgSi dalam air pada sistem statik dengan menggunakan metode kehilangan berat tersebut memberikan kurva yang dapat diungkapkan secara umum melalui persamaan:

$$\Delta m = k t^n \quad (1)$$

dimana Δm = logam terlarut (terkorosi) per satuan luas
 t = waktu
 k, n = konstanta percobaan

Secara logaritmik persamaan (1) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\log \Delta m = \log k + n \log t \quad (2)$$

Hasil percobaan berupa kurva Δm versus t dan kurva $\log \Delta m$ versus $\log t$ telah dilaporkan^[3]. Dari kurva tersebut dapat dihitung harga k dan n untuk setiap percobaan yang dapat disimpulkan bahwa harga konstanta k semakin besar dengan naiknya temperatur, sebaliknya harga konstanta n semakin menurun^[3].

Selanjutnya Gambaran mengenai laju korosi atau laju pelarutan AlMg-2 dan AlMgSi dinyatakan melalui persamaan Arrhenius:

$$k = A e^{-(Q/RT)} \quad (3)$$

$$\text{atau} \quad \ln k = \ln A - \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (4)$$

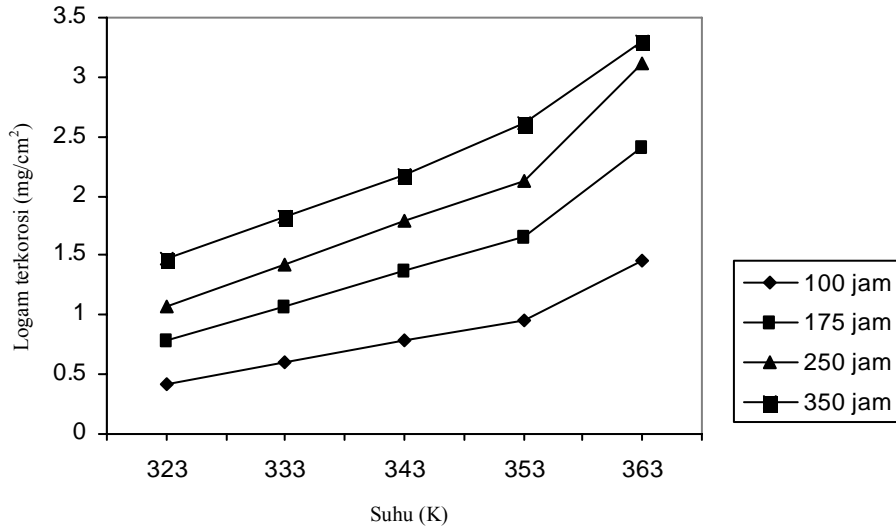
dimana Q = energi aktivasi
 R = konstanta gas umum
 T = temperatur mutlak
 A = konstanta

Plot $\ln k$ versus $(1/T)$ memberikan kurva garis lurus yang mengambarkan pelarutan AlMg-2 dan AlMgSi dalam air pada kisaran temperatur 50-90°C atau 323-363 K dengan waktu percobaan 100-350 jam (Gambar 3).

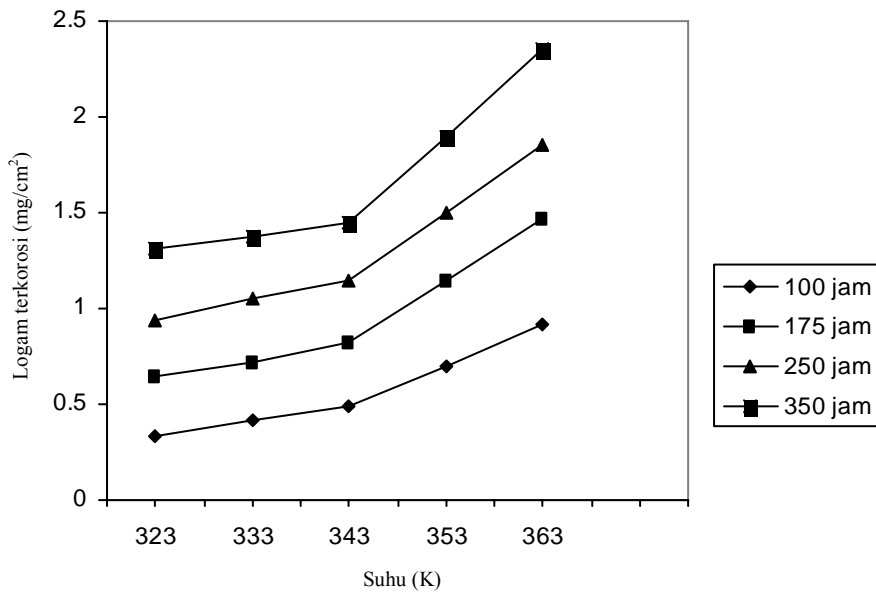
Dari data di atas, dapat dihitung kemiringan (Q/R) dan intersep $(\ln A)$ sehingga diperoleh persamaan :

$$\ln k = 13,56 - 6058 (1/T) \dots \text{(untuk AlMg-2)} \quad (5)$$

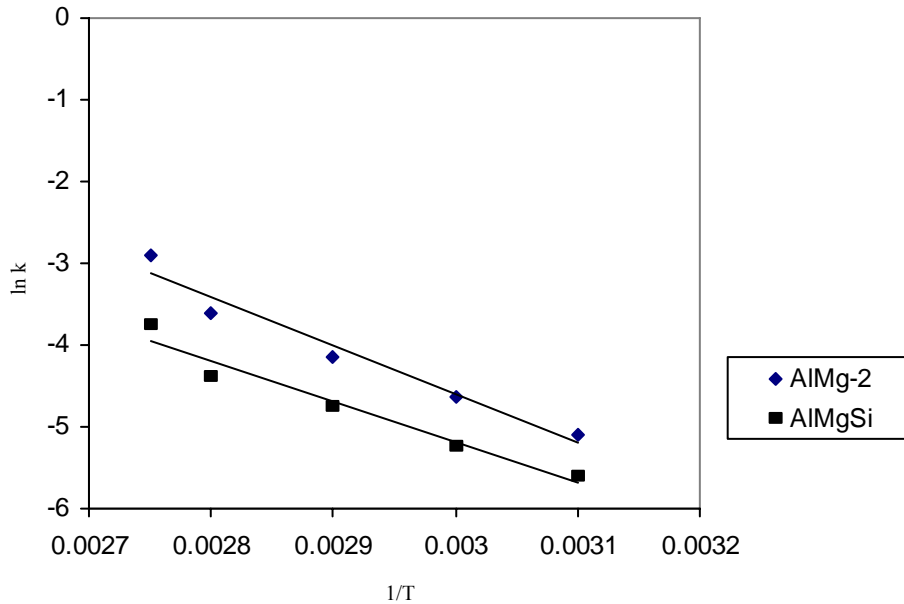
$$\ln k = 11,23 - 5486 (1/T) \dots \text{(untuk AlMgSi)} \quad (6)$$



Gambar 1. Kurva korosi AlMg-2 dalam air sebagai fungsi temperatur dan waktu



Gambar 2. Kurva korosi AlMgSi dalam air sebagai fungsi temperatur dan waktu



Gambar 3. Kurva Arrhenius $\ln k$ versus $(1/T)$ untuk AlMg-2 dan AlMgSi

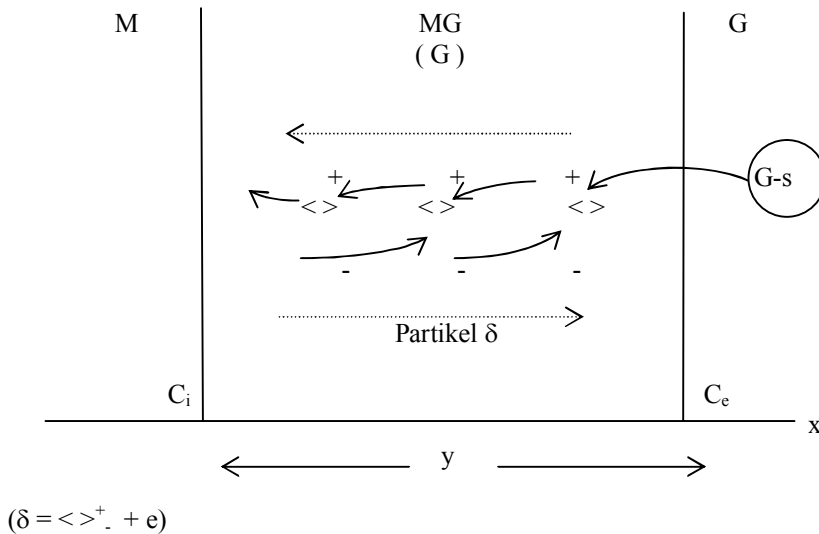
3.2 Mekanisme Korosi

Dengan memperhatikan hasil penelitian yang berupa kurva korosi (Gambar 1–3), kinetika, harga energi aktivasi, jenis senyawa yang terbentuk selama terjadinya proses korosi dan informasi dari berbagai pustaka, maka suatu mekanisme korosi melalui pendekatan termodinamika dan kinetika heterogen dapat diajukan seperti yang akan dibahas berikut ini (lihat juga Gambar 4).

Beberapa peristiwa yang mungkin terjadi dalam proses korosi paduan aluminium adalah:

- Pembentukan oksida Al_2O_3
- Pelarutan oksigen dalam logam paduan AlMg-2 dan AlMgSi
- Pelarutan senyawa yang terbentuk pada permukaan logam ke dalam air

Tahapan proses keseluruhan yang menentukan bentuk kurva kinetika laju korosi secara teoritis dapat dituliskan sesuai urutan berikut ini.



Gambar 4. Model fisik dari mekanisme korosi paduan logam aluminium

3.3 Adsorpsi Oksigen pada Permukaan Oksida

Proses adsorpsi oksigen terjadi segera setelah lapisan Al_2O_3 terbentuk dengan reaksi:



dimana $s = \text{site}$ (tempat) untuk adsorpsi

Adanya kesulitan yang cukup besar dalam aplikasi hubungan kinetika dan termodinamika pada fasa teradsorpsi memberikan peluang untuk memilih model yang akan digunakan:

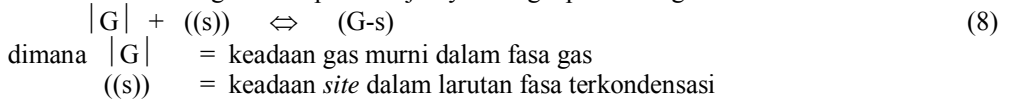
- Apabila lapisan teradsorpsi dianggap sebagai suatu fasa terkondensasi dari gas oksigen, maka karakteristik fasa tersebut dapat dikaitkan melalui persamaan sebagaimana diterangkan oleh HILL^[4].
- Pendapat lain yang dikemukakan oleh COOLIDGE^[5] dan dikembangkan oleh HILL^[4] dan BESSON^[6] adalah bahwa fasa teradsorpsi dapat dianggap sebagai suatu larutan dari spesi teradsorpsi G dalam adsorben M, kemudian dalam fasa terkondensasi yang terjadi digunakan hubungan dasar termodinamika larutan.

Model pertama memberikan pengertian bahwa molekul-molekul gas dalam fasa teradsorpsi tidak dapat dianggap sebagai sistem ideal karena adanya interaksi cukup kuat di antara komponen-komponen fasa teradsorpsi. Oleh karena itu, akan terdapat kesalahan cukup besar dalam mengungkapkan laju proses yang dominan secara sederhana.

Namun tidaklah demikian halnya dengan model kedua, dimana adaptasi ke arah bentuk lebih sederhana dapat dilakukan sebagai berikut^[7].

Fasa teradsorpsi dapat dianggap sebagai larutan yang terdiri dari *site* (tempat) adsorpsi s non volatil dan senyawa teradsorpsi biner G-s. Larutan tersebut dapat dianggap ideal jika interaksi antara *site* bebas dan *site* tertutup diabaikan.

Kesetimbangan adsorpsi selanjutnya diungkapkan sebagai berikut:



Persamaan (8) dapat disederhanakan menjadi:



Aplikasi hukum aksi-massa pada kesetimbangan di atas adalah :

$$\frac{a_{G-s}}{a_s} \cdot \frac{1}{P} = K \quad (10)$$

dimana a_{G-s} , a_s = keaktifan *site* s dan senyawa G-s dalam fasa teradsorpsi dalam keadaan kesetimbangan dengan gas G.

P = tekanan gas dalam keadaan kesetimbangan dengan fasa teradsorpsi

Apabila S_0 adalah jumlah total *site* per satuan luas permukaan bahan sebelum adsorpsi dan S adalah jumlah total *site* bebas pada saat t, maka (S_0-S) merupakan jumlah *site* yang telah tertutup (partikel yang terbentuk G-s) pada waktu yang sama.

Frakasi penutupan θ didefinisikan sebagai:

$$\theta = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad (11)$$

sedangkan fraksi molarnya adalah:

$$X_s = \left(\frac{S}{S_0} \right) = 1 - \theta \quad (12)$$

$$X_{G-s} = \frac{S_0 - S}{S_0} = \theta \quad (13)$$

Selanjutnya untuk mendapatkan ungkapan kinetika secara teoritis, peristiwa adsorpsi dan desorpsi dapat ditulis kembali seperti persamaan (9).

Laju sesaat proses didefinisikan dengan (dn_a/dt) di mana dn_a adalah jumlah molekul gas G yang teradsorpsi per satuan luas permukaan MG selama waktu dt.

Apabila konstanta laju adsorpsi dan desorpsi masing-masing adalah k_a' dan k_a'' maka ungkapan di atas dapat ditulis:

$$\frac{dn_a}{dt} = (k_a' \cdot C_G \cdot C_s) - (k_a'' \cdot C_{G-s}) \quad (14)$$

dimana C_G = konsentrasi volumik gas dalam fasa gas = $(P / R T)$

C_s = konsentrasi superfisial *site* bebas = $(1 - \theta) S_0$

C_{G-s} = konsentrasi superfisial *site* yang sudah tertutup oleh G = θS_0

maka persamaan (14) menjadi:

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{k'_a S_0}{RT} P (1 - \theta) - k''_a S_0 \theta \quad (15)$$

Jika $(k'_a S_0 / RT) = k'$ dan $k''_a S_0 = k''$, maka :

$$\frac{dn_a}{dt} = k' P (1 - \theta) - k'' \theta \quad (16)$$

Apabila ditinjau kembali peristiwa adsorpsi oksigen seperti pada persamaan (7), maka pada kondisi setimbang ($t = \infty$) $dn_a/dt = 0$, dan secara empiris diperoleh:

$$k' P^{1/2} (1 - \theta_\infty) = k'' \theta_\infty$$

atau

$$k'' = \frac{1 - \theta_\infty}{\theta_\infty} k' P^{1/2} \quad (17)$$

Setelah diadakan substitusi harga k'' ke persamaan (16), maka laju adsorpsi (v_a) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$v_a = \frac{dn_a}{dt} = k' P^{1/2} (1 - \theta / \theta_\infty) \quad (18)$$

Dengan menggunakan hukum aksi massa diperoleh :

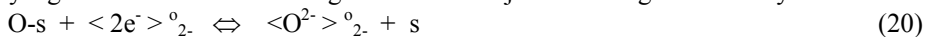
$$\theta = \frac{KP^{1/2}}{1 + KP^{1/2}} \quad (19)$$

dimana $K = (k' / k'')$

3.4 Reaksi Antar Muka Eksternal (*External Interface*)

Fenomena adsorpsi pada permukaan oksida yang terbentuk kemudian diikuti oleh reaksi pada antar muka eksternal yaitu reaksi pada daerah antar muka di antara oksigen dan oksida (G/MG). Gambaran mengenai fenomena ini akan lebih jelas lagi setelah dibahas tahapan proses korosi berikutnya.

Pada fenomena reaksi antar muka eksternal terjadi transfer oksigen ke dalam lapisan oksida yang terbentuk melalui lowongan anionik menjadi ion oksigen. Reaksinya adalah:



Apabila $k'_e, k_e'' =$ konstanta laju reaksi pembentukan ion oksigen dan pembentukan lowongan anionik; $K_e = (k'_e / k_e'')$ = konstanta aksi massa pada kesetimbangan; $C_e =$ konsentrasi lowongan oksigen pada antar muka eksternal dan dengan anggapan bahwa lowongan tersebut berada dalam larutan ideal di dalam kisi kristal, maka laju reaksi v_e dapat ditulis sebagai berikut:

$$v_e = k'_e \theta C_e - k_e'' (1 - \theta) \quad (21)$$

Pada kondisi kesetimbangan untuk harga θ tertentu didapatkan harga C_e konstan sebagai berikut:

$$C_e = C_e^0 = \frac{1}{K_e} \cdot \frac{1 - \theta}{\theta} \quad (22)$$

Sedangkan laju reaksi sebagai fungsi waktu pada kondisi kesetimbangan adalah:

$$v_e = \frac{dC_e}{dt} = k_e' \theta (C_e - C_e^o) \quad (23)$$

3.5 Difusi Oksigen dengan Perantaraan Lowongan Anionik

Dengan asumsi bahwa lowongan anionik bersifat netral, maka fluks dari lowongan dalam lapisan oksida dapat dinyatakan oleh Hukum Fick:

$$J_1 = -D_1 \left(\frac{\delta C}{\delta x} \right) \quad (24)$$

dimana D_1 = koefisien difusi (dianggap konstan)

δC = beda konsentrasi lowongan antara antar muka eksternal dan internal

δx = tebal lapisan oksida sepanjang sumbu x

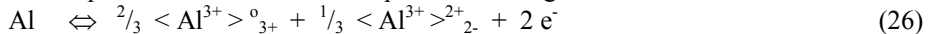
Untuk memberikan Gambaran yang lebih jelas dari uraian di atas, pada Gambar 4 diperlihatkan posisi logam M, lapisan oksida MG, tebal lapisan oksida (y) sepanjang sumbu x, konsentrasi lowongan anionik antar muka eksternal (C_e), internal (C_i) dan kesetimbangan (C_i^o)^[6].

Untuk konsentrasi $C_i > C_e$ maka persamaan (24) dapat ditulis sebagai:

$$J = D \frac{C_i - C_e}{y} \quad (25)$$

3.6 Reaksi pada Antar Muka Internal (*Internal Interface*)

Reaksi pada antar muka internal dapat ditulis sebagai berikut:



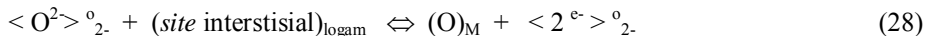
Dengan laju reaksi:

$$v_i = k_i' (1 - C_i / C_i^o) \quad (27)$$

dimana k_i' = konstanta reaksi pada antar muka internal.

3.7 Reaksi Pelarutan Oksigen ke dalam Logam

Apabila larutan pada Al-oksigen dapat dianggap sedemikian rupa dimana atom oksigen larut secara interstisial dalam kristal logam, maka reaksi pelarutan dapat ditulis seperti dibawah ini :



Jika N_o merupakan jumlah total *site* per satuan volume dan N adalah banyaknya *site* yang diduduki oksigen, kemudian interaksi antar *site* diabaikan, maka laju pelarutan dapat ditulis:

$$v_d = k_d' (N_o - N) - k_d'' N C_i \quad (29)$$

dimana k_d', k_d'' = konstanta pelarutan dan pelepasan oksigen.

Pada kesetimbangan antar muka ($v_d=0$), maka untuk harga C_i tertentu dan jika $K_d = k_d' / k_d''$ diperoleh:

$$N = \frac{N_o K_d}{K_d + C_i} \quad (30)$$

$$k_d'' C_i = k'_d (N_o / N) (1 - N / N_o) \quad (31)$$

Selanjutnya laju pelarutan adalah:

$$v_d = k'_d N_o (1 - N / N_o) (1 - 1 / N) \quad (32)$$

3.7 Difusi Oksigen ke dalam Logam

Difusi fluks oksigen J_2 ke dalam logam diberikan oleh Hukum Fick:

$$J_2 = -D_2 (\delta C / \delta x) \quad (33)$$

dimana D_2 = koefisien difusi oksigen ke dalam logam.

Apabila di antara ke enam jenis reaksi yang telah disebutkan diatas hanya ada satu reaksi saja yang mendominasi laju reaksi secara keseluruhan, maka bentuk kurva kinetika akan memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Parabolik, jika reaksi didominasi oleh proses difusi (butir 3 dan 6).
- Linier, jika didominasi oleh reaksi pada tahapan butir 1, 2, 4 dan 5.

Karakteristik dimana laju reaksi secara keseluruhan didominasi oleh hanya satu jenis proses, biasanya berjalan menurut *rejim tunggal*. Di lain pihak, apabila bentuk kurva diantaranya linier dan parabolik, maka reaksi yang mendominasi pada ke enam tahapan tadi berjumlah lebih dari satu jenis.

Pada umumnya, perhitungan untuk mendapatkan persamaan kinetika dilakukan melalui metode *rejim campuran*, dimana dalam keadaan ini persamaan akhir yang diperoleh merupakan suatu gabungan dari ke enam proses yang terjadi secara simultan dan sekaligus memberikan arti bagi laju reaksi secara global sesuai dengan yang diamati pada percobaan.

Kurva kinetika korosi yang diperoleh untuk bahan AlMg-2 antara temperatur 50-80°C (323-353 K) dan AlMgSi antara temperatur 50-70°C (323-343 K) menunjukkan persamaan dengan alur linier, dan setelah itu mulai memperlihatkan penyimpangan dengan laju pasivasi yang berbeda.

Berdasarkan pembahasan teori semula, alur linier diduga berasal dari dominasi salah satu tahapan proses seperti adsorpsi, reaksi internal atau eksternal. Demikian pula bagi alur non linier mungkin disebabkan oleh beberapa tahapan proses yang mengontrol reaksi secara keseluruhan misalnya campuran antara difusi-adsorpsi, difusi-reaksi eksternal atau jenis campuran lainnya. Kemudian dari perbandingan harga energi aktivasi untuk kedua jenis paduan logam aluminium AlMg-2 dan AlMgSi serta arah plot Arrhenius dapat diduga bahwa secara praktis pada kondisi temperatur reaksi operasi reaktor baik laju maupun mekanisme korosi yang mendominasi reaksi global tidak menunjukkan perbedaan yang berarti.

IV. KESIMPULAN

- Kurva kinetika korosi paduan logam AlMg-2 dan AlMgSi dalam air pada interval temperatur antara 50-80°C (323-353 K) untuk AlMg-2 dan 50-70°C (323-343 K) untuk AlMgSi membentuk alur linier yang disebabkan oleh salah satu tahapan proses yang mengontrol reaksi secara keseluruhan misalnya adsorpsi, reaksi eksternal dan internal. Setelah temperatur tersebut, pembelokan kurva linier dimungkinkan oleh pengontrolan lebih dari satu tahapan proses campuran antara difusi-adsorpsi atau difusi-reaksi internal.
- Mekanisme korosi yang diajukan adalah:

- a. Oksidasi langsung pada permukaan logam sehingga terbentuk oksida Al_2O_3 .
 - b. Adsorpsi oksigen pada *site* oksida.
 - c. Reaksi eksternal (terjadi pada batas oksida–air).
 - d. Difusi oksigen sepanjang lapisan oksida melalui lowongan anionik.
 - e. Reaksi internal (terjadi pada batas oksida–logam).
 - f. Reaksi pelarutan oksigen dalam logam.
 - g. Difusi oksigen dalam logam.
3. Konfirmasi mekanisme korosi yang dikemukakan tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan perhitungan laju reaksi global secara teoritis yang merupakan integrasi dari tahapan masing-masing proses. Selain itu, dalam upaya memperoleh kesimpulan yang mendekati kenyataan pada perhitungan kinetika, maka beberapa eksperimen tambahan perlu dilakukan.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. BENJAMIN, M., “Nuclear Reactor Material and Application”, van Nostrand Reinhold, New York, 1983, pp.294-296.
2. TRETHERWEY, K.R., “Korosi”, Gramedia, Jakarta, 1991, hal.17-18.
3. ERIC J., MUCHLIS B., dan SIGIT, “Kinetika Korosi AlMg-2 dan AlMgSi dalam Sistem Statik”, Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Serpong, 1993, hal.266-272.
4. HILL, T. L., J. Chem. Phys., 17, p.520.
5. COOLIDGE, A.S., J. Amer. Chem. Soc., 48, 1957.
6. BESSON, J., “La mise en Equation d'une Cinétique Gaz Solide. Règles Fondamentales et Exemples d'Applications”, ENSEG, Saint Martin d'Hères.
7. SARRAZIN, P., Thèse de Doctotar, Grenoble, 1968.
8. MUCHLIS B., dan R.A. SURYANA, “Mekanisme Oksidasi Zirkonium dan Zircaloy-4 oleh Uap Air pada Temperatur 700-800°C dan Tekanan 6,1-13,6 Torr”, Teknologi Indonesia, Jilid VI No.1, 1983, hal.61-77.
9. HOLLINGSWORTH, E.H., and HUNSICKER, H.Y., “Corrosion Aluminum and Aluminum Alloys”, Aluminum Company of America.
10. CODDET, C., “La Corrosion Sèche à Haute Température: Processus Diffusionnels et Propriétés Mécaniques”, Thèse de Doctorat, Grenoble, 1977.
11. FONTANA, M.G., “Corrosion Engineering”, McGraw Hill International Edition, 3th ed., Singapore, 1987.
12. BESSON, J., “Précis Thermodynamique et Cinétique Electrochimiques”, Ellipses, Paris, 1984.
13. ANONIM, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02, Philadelphia, 1992.