

---

**PREDIKSI TEBAL LAPISAN KOROSI PELAT ELEMEN BAKAR  
REAKTOR SERBA-GUNA G.A. SIWABESSY**

Suwardi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

**ABSTRAK**

**PREDIKSI TEBAL LAPISAN KOROSI PELAT ELEMEN BAKAR PADA REAKTOR SERBA-GUNA G.A. SIWABESSY.** Prediksi tebal lapisan korosi melengkapi analisis kinerja dan keselamatan reaktor karena lapisan tersebut menurunkan nilai hantaran panas kelongsong. Prediksi ini dilakukan untuk kondisi rerata dan kondisi realistik menggunakan model kinetika korosi homogen berdasar pendekatan empirik dengan memperhitungkan waktu operasi ( $t$ ), derajat keasaman air ( $\text{pH}$ ), kecepatan alir air ( $v$ ), temperatur dinding ( $T$ ), dan fluks termal ( $q$ ) dengan model korosi Y.S.-KIM. Untuk itu telah dilakukan perhitungan simulasi reaktor dengan pendingin air bebas mineral dan  $\text{pH}$  5, dengan beberapa variasi pengoperasian. Simulasi dilakukan selama 100 hari terbagi dalam 4 siklus dengan suhu dan fluks tetap setiap langkah waktu sebesar 100 jam. Data pengoperasian dan sifat fisis adalah fluks  $q = 3,8 \text{ MW/m}^2$ , kecepatan pendingin  $v = 7,6 \text{ m/det}$ , dan konduktivitas termal  $k(T) = 1,2538 \times 10^5 \exp(-5913/T)$ . Prediksi mendapatkan tebal lapisan korosi yang naik seiring dengan waktu operasi walaupun pada operasi dengan suhu dan fluks menurun. Pengaruh fluktuasi suhu dan fluks sebesar 5% dari nilai rerata tidak banyak berpengaruh pada ketebalan lapisan, sementara kenaikan temperatur  $25^\circ\text{C}$  cukup meningkatkan ketebalan lapisan korosi.

**KATA KUNCI:** Korosi homogen, Tebal lapisan, Model, Komponen Aluminium, Air bebas mineral

**ABSTRACT**

**PREDICTION OF LAYER THICKNESS OF CORROSION PRODUCT ON FUEL PLATE OF RS-GAS REACTOR.** The prediction of layer thickness completes the analyses of reactor's performance and safety as the layer decreases the heat transfer across the tube wall. The prediction has been executed for average and realistic conditions using Y.S.-KIM corrosion model that takes into account the operation time ( $t$ ),  $\text{pH}$ , coolant velocity ( $v$ ), temperature ( $T$ ) and heat flux ( $q$ ). Corrosion layer computation has been performed for reactor cooled by demineralized water at  $\text{pH}$  5, with a few operating variations. The simulation was conducted for 100 days divided into 4 cycles at constant temperature and flux, with each period of 100 h. Operation data and physical properties are flux  $q = 3.8 \text{ MW/m}^2$ , coolant velocity  $v = 7.6 \text{ m/s}$ , and thermal conductivity  $k(T) = 1.2538 \times 10^5 \cdot \exp(-5913/T)$ . The prediction shows that the layer thickness increases with operation time, although the temperature and flux decrease with time. A fluctuation of about 10 K and 5% of the average flux does not have significant effect on the corrosion layer, while the increase of temperature of  $25^\circ\text{C}$  increases the layer thickness.

**FREE TERMS:** General corrosion, Model, Aluminium, Demineralized water, Layer thickness.

## I. PENDAHULUAN

Dalam industri nuklir, sering dilibatkan komponen atau komponen reaktor yang dilapis Al sebagai pelindung terhadap korosi dengan konduktivitas termal yang tinggi. Dalam reaktor nuklir Serba-Guna GA Siwabessy (RSG-GAS), serbuk bahan bakar nuklir dispersi bermatrik Al juga dilapis dengan kelongsong Al. Selain persyaratan disain dan fabrikasi bahan bakar, kelongsong bahan bakar nuklir dalam RSG-GAS didinginkan dengan air bebas mineral yang selalu diperbarui, sehingga konduktansinya jauh dibawah akuades. Berbagai teknik telah dikaji untuk penanggulangan korosi pada komponen reaktor, khususnya korosi lokal yang berdampak cepat pada integritas mekanik. Optimasi pada umumnya akan memilih salah satu atau kombinasi teknik penanggulangan. Walaupun demikian oleh karena persyaratan keselamatan fasilitas nuklir amat tinggi hasil optimasi pada umumnya tidak menghapus total adanya korosi dalam reaktor.

Pada reaktor nuklir uji bahan, komponen dipilih atau dilapis dengan bahan Al dengan sedikit atau sekelumit unsur paduan dengan persyaratan produksi yang ketat untuk menekan korosi, sedangkan media pendingin adalah air bebas mineral yang dijaga resistensi spesifiknya  $> 1 \text{ M Ohm/cm}$ , dan selain batasan sifat fisis itu juga batasan kimiawi yang ketat seperti konsentrasi ion Cl<sup>-</sup>. Walaupun Al dikategorikan sebagai bahan dengan ketahanan korosi yang baik, namun demikian korosi homogen tidak dicegah secara total. Dampak utama dari korosi homogen elemen bakar adalah penurunan konduktivitas oleh karena lapisan hasil korosi pada permukaan elemen bakar memiliki konduktivitas termal jauh lebih rendah daripada aluminium. Al dipilih sebagai pembungkus atau kelongsong elemen bakar nuklir reaktor uji material oleh karena gabungan sifat-sifatnya dipandang paling baik, yaitu serapan neutron sangat rendah, konduktivitas termal tinggi, mudah dibentuk atau difabrikasi, ketahanan korosi tinggi seperti telah disebut, dan harga murah. Tebal lapisan oksida oleh korosi homogen pada elemen bakar bervariasi antara 10-40  $\mu\text{m}$ , lapisan ini menurunkan konduktan termal kelongsong<sup>[1]</sup>. Selain oksida atau oksida hidrat hasil korosi yang tetap menutup permukaan, sebagian hasil korosi larut dalam media pendingin<sup>[2]</sup>.

Prediksi tebal lapisan korosi merupakan asupan dalam prediksi kinerja bahan bakar dan bermanfaat dalam pengendalian reaktor. Pada pustaka<sup>[8]</sup> penulis membandingkan hasil pengukuran tebal korosi elemen bakar eksperimental HANARO dengan persamaan yang diturunkan dari tabel eksperimen dalam *autoclave* mengenai hubungan berat lapisan korosi 400 jam dengan kecepatan alir, laju akumulasi tunak sebagai fungsi kecepatan alir. Persamaan yang diperoleh lalu digunakan tidak memperhitungkan variasi suhu, pH, fluks termal, tebal lapisan korosi, dan iradiasi nuklir, ternyata hasilnya lebih rendah dari data eksperimen. Dalam makalah ini prediksi memperhitungkan waktu operasi, parameter operasi seperti daya reaktor, suhu pendingin, derajat keasaman dan sifat kimia kelarutan oksida Al dalam air. Prediksi ketebalan lapisan korosi dilakukan dengan menggunakan model YS-KIM<sup>[1,9]</sup>. Model itu dikembangkan berdasarkan pada berbagai eksperimen dengan bermacam variabel dan rentang variasi yang beragam, termasuk waktu iradiasi cukup panjang  $> 1200$  jam.

## II. Teori

Permukaan aluminium akan teroksidasi apabila berinteraksi dengan oksigen menghasilkan lapisan oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) walaupun pada suhu kamar. Lapisan ini akan

menghalangi permukaan dari kontak dengan oksigen, sehingga bersifat sebagai pelindung. Maka pertumbuhan oksida akan segera berhenti. Laju reaksi oksidasi ini berkembang dari tipe parabolik hingga kubik (persamaan (1), nilai  $p : 1 - 2$ ). Apabila dalam lingkungan air atau berair, lapisan oksida pelindung terdegradasi karena bagian luar oksida bereaksi dengan air membentuk hidrat oksida, menyisakan lapisan tipis oksida Al pada permukaan. Hidrat yang terbentuk dimulai dari boehmite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) kemudian bayerite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ).

Dua macam hidrat oksida ini mempunyai kelarutan dalam air yang berbeda. Kelarutan boehmite dalam air lebih besar daripada bayerite. Perbedaan ini mengakibatkan pelarutan bersifat selektif<sup>[2,3]</sup>. Pelarutan pada permukaan luar (bayerite lebih lambat, pelarutan pada kristal boehmite pada bagian dalam lapisan oleh air melalui pori dan retakan lebih cepat. Pelarutan memperbesar pori kemudian memperbesar kontak air dan oksigen yang larut dengan oksida dan permukaan aluminum bila lapisan proteksi rusak. Aliran atau air akan memperbesar transport oksida terlarut secara konveksi, memperbesar atau melestarikan pelarutan selektif. Dillon menurut Pawel<sup>[3]</sup> dan Godart<sup>[4]</sup> menemukan bahwa lapisan oksida pada air mengalir lebih cepat mempunyai pori yang lebih besar daripada yang diamati pada kecepatan alir lebih rendah.

Oksidasi pada lapisan terdegradasi ini laju pertumbuhan lapisan bervariasi dengan rentang tipe linier hingga parabolik, tergantung dari tingkat degradasi lapisan oksida. Degradasi lapisan oksida dan lapisan oksida hidrat tergantung pada temperatur, derajat keasaman, kecepatan aliran air, dan mungkin oleh iradiasi.

Tebal lapisan korosi diartikan sebagai tebal lapisan oksida dan oksida hidrat boehmite dan bayerite. Tebal lapisan mempengaruhi panjang lintasan transport difusi oksigen, dan oksida hidrat terlarut, dari lokasi reaksi permukaan hingga air mengalir. Pengaruh ketebalan pada laju penambahan tebal diperhitungkan sebagai variabel berpangkat dengan notasi  $x$  tebal lapisan ( $\mu\text{m}$ ),  $t$  waktu (jam),  $k$  konstanta laju reaksi dan  $p$  konstanta pangkat dari laju korosi.

(1)

$$\frac{d}{dt}x = k \cdot x^{-p}$$

Pengintegralan persamaan (1) menghasilkan persamaan umum kinetika pertumbuhan lapisan korosi. Dalam persamaan (2) ini  $x_0$  adalah tebal lapisan korosi pada saat 0.

$$x(p, k, t) = \left[ (x_0)^{p+1} + (p+1) \cdot k \cdot t \right]^{\frac{1}{p+1}}$$

(2)

Pada penelitian Dillon menurut Pawel<sup>[3]</sup>, pertumbuhan oksida meningkat dengan kenaikan kelarutan oksida. Penelitian Dickinson dan Lobsinger menurut Howell<sup>[4]</sup> menyimpulkan bahwa kelarutan oksida dan kelarutan oksida hidrat sebagai fungsi suhu ( $T$ ) dan pH air, notasi  $C(T, \text{pH})$ , naik sejalan dengan kenaikan keduanya yaitu  $T$  ataupun

pH. Korelasi yang diperoleh dari beberapa data eksperimen adalah bahwa kelarutan konsentrasi oksida hidrat boehmite dan bayerite dalam air ( $C(T, pH)$ ) berpengaruh pada laju pembentukan oksida dari substrat Al atau laju korosi dan konstanta eksponensial laju korosi  $p$  persamaan (1) dengan ketergantungan pada  $C(T, pH)$  dinyatakan sebagai  $p(T, pH)$  seperti pada persamaan (3).

$$p(T, pH) := 0.119 + 9.223 \exp \left[ (-1.467) \cdot 10^8 \cdot C(T, pH) \right] \quad (3)$$

dan pada kesetimbangan pelarutan-presipitasi, konsentrasi jenuh, korosi berhenti,  $C_s(T, pH)$  ditulis sederhana  $C_s$ , lebih tepat dinyatakan dengan suhu lapisan korosi ( $T_{xc}$ ) dan pH.

$$\ln(C_s) = - \left( \frac{1211.16}{T_{xc}} + 13.79 \right) \cdot (1.81 - 0.14 \text{ pH}) \quad (4)$$

Para peneliti juga menunjukkan bahwa laju pelarutan oksida naik dengan kecepatan aliran air ( $v$ ) sebagaimana kecepatan alir meningkatkan transport oksida terlarut dari lapisan laminar ke daerah turbulen karena tebal lapisan laminar menurun sebagai fungsi kecepatan alir atau bilangan Reynold, meningkatkan transport dari air pori ke lapisan laminar, dan dari antarfasa padat-cair ke air pori serta pelarutan oksida maupun peningkatan pelarutan dari permukaan pori, sebagaimana terbukti aliran air memperlebar pori. Dengan kata lain aliran mengalihkan penumpukan konsentrasi larutan dari sekitar lapisan laminar hingga penumpukan antarfasa padat cair ke daerah transport konvektif meningkatkan pori atau porositas. Pengaruh laju alir ini diperhitungkan sebagai variabel dari faktor B, penumpukan (*buid-up*) atau konsentrasi hasil disolusi padatan dalam air sekitar antarmuka, dengan persamaan (5).  $B(v)$  ditulis sederhana B adalah faktor koreksi penebalan, B naik bila  $v$  naik setelah melebihi kecepatan kritis 13,1905 m/det dan sebaliknya.

$$B(v) := 0.4264 + \frac{3.2134}{1 + \exp \left[ \frac{(-v + 13.3905)}{3.5994} \right]} \quad (5)$$

Fluks termal ( $q$ ) dari padatan ke fluida berpengaruh pada laju korosi berhubung suhu padatan lebih tinggi, dengan kata lain pembentukan oksida, boehmite, bayerite maupun pelarutannya lebih cepat, daripada dalam kondisi isoterak. Bagian sirkuit pendingin yang baru melewati pemindah panas juga jauh lebih dingin gradien suhu yang bersifat positif terhadap laju korosi total (bukan saja hasil korosi yang terendapkan pada permukaan), kelarutan naik dengan suhu yang lebih besar, pengendapan di luar zona lapisan korosi lebih besar karena suhu lebih rendah, pelarutan pada zona bersuhu lebih tinggi. Degradasi kristal hidrat oksida lebih besar oleh gradien suhu lebih besar. Pengaruh tersebut  $q$  dan juga  $T_{xc}$  diperhitungkan melalui konstanta  $k$  sebagai fungsi  $q$  dan  $T_{xc}$ <sup>[7]</sup>,

$$k = 6.388 \cdot 10^7 \cdot \exp\left(\frac{-9154}{T_{xc} + 1.065q}\right) \quad (6)$$

Selain suhu dan fluks termal itu, Y-S. KIM memperhitungkan pula pengaruh konduktansi termal lapisan korosi  $kt$  sebagai fungsi ketebalan lapisan ( $x$ ) melalui  $k$  persamaan (1) dengan notasi  $k_N$  menurut persamaan (7):

$$k_N(T, ad, q, x, kt) := 1.95 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(\frac{-6071}{T + ad \cdot \frac{q \cdot x}{kt(x)}}\right) \quad (7)$$

Konduktivitas termal lapisan korosi dimodelkan sebagai fungsi ketebalan lapisan dengan 2 zona.

$$kt(x) := \begin{cases} 2.25 & \text{if } x \leq 25 \\ [2.25 - 0.016(x - 25)] & \end{cases} \quad (8)$$

Konduktivitas termal lapisan korosi tergantung dari struktur kristal, dan perbandingan jenis kristal yang terbentuk, dan tebal lapisan kristal itu sendiri. Berdasarkan data yang diperoleh, model memperhitungkan tebal lapisan kristal, seperti persamaan (8).

Dalam analisis ini digunakan pendekatan empirik dari YSKim. Analisis pertama memperhitungkan waktu iradiasi, suhu permukaan kelongsong, dan fluks termal melalui permukaan kelongsong. Pada analisis kedua selain yang tersebut pertama (memperhitungkan suhu permukaan kelongsong, daya yang dibangkitkan oleh bahan bakar) juga memperhitungkan keasaman air pendingin, kecepatan aliran pendingin, serta pengaruh iradiasi pada pembentukan oksida. Model YSKim telah teruji dengan beberapa eksperimen iradiasi<sup>[3]</sup>.

Dalam makalah ini pengertian reaktor meliputi reaktor kimia dan teras reaktor nuklir. Reaktor menghasilkan panas reaksi. Panas ini dibuang oleh sistem pendingin primer dengan pendingin air bebas mineral disirkulasikan dengan laju kecepatan alir dan suhu tertentu. Air pendingin primer didinginkan dengan penukar panas dan kandungan mineral dijaga dengan suatu sistem demineralisasi.

Penurunan suhu melintasi lapisan oksida dapat dihitung dari persamaan :

$$\Delta T = \frac{q \cdot x}{k_T} \quad (9)$$

dimana  $T$  = suhu (K)  
 $q$  = fluks termal ( $W/m^2$ )  
 $x$  = tebal lapisan ( $\mu m$ )  
 $T$  = notasi konduktivitas termal efektif dari oksida ( $W/mK$ )

Temperatur efektif yang mempengaruhi pembentukan tebal korosi menurut Y-S KIM adalah temperatur pada lapisan korosi, dari temperatur antarmuka lapisan korosi-Al

hingga antarmuka lapisan korosi - air pendingin, dengan rerata suhu antarmuka air - lapisan korosi ditambah setengah  $\Delta T$ .

Pada persamaan komponen kontribusi iradiasi  $A_e = 0,05$  untuk lingkungan luar reaktor dan  $A_e = 0,37$  untuk lingkungan reaktor<sup>[3]</sup>.

Dengan substitusi konstanta  $k$  dan  $p$  persamaan (2) dengan yang lebih realistis yaitu  $k_N$  persamaan (7) dan  $p$  persamaan (4) yang terkait persamaan (4) dan (5) serta koreksi laju alir  $B$  persamaan (5) maupun koreksi radiasi reaktor  $A_e$  dan juga mengganti  $p(T,pH) + 1$  dengan  $p_1(T,pH)$ , maka diperoleh riwayat tebal lapisan korosi  $x_N$  model YS-KIM berikut:

$$x_N(A_e, v, T, pH, q, kt, x, t) := A_e \cdot B(v) \cdot \left[ \left( \frac{x_0}{A_e \cdot B(v)} \right)^{p_1(T, pH)} + p_1(T, pH) \cdot k_N(T, ad, q, x, kt) \cdot t \right]^{\frac{1}{p_1(T, pH)}} \quad (10)$$

### III. TATA KERJA

Perhitungan dilakukan dalam platform MathCAD 2001i Pro. Mendefinisikan data masukan berupa data disain dan operasi reaktor dan batang bahan bakar serta sifat termal, seperti Tabel 1 dan Tabel 2 kolom 1-3. Menetapkan fungsi konsentrasi atas variabel temperatur dan pH, fungsi tetapan order reaksi  $p$  dengan variabel temperatur dan pH, fungsi kontribusi kecepatan aliran pendingin dengan variabel kecepatan aliran pendingin, fungsi konduksi termal lapisan korosi, kemudian menghitung tebal lapisan korosi sepanjang pengoperasian reaktor menurut persamaan (10).

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi model pada komponen reaktor dengan satu data terkait disain dan sifat bahan yang tetap seperti disajikan Tabel 1 dan data operasi yang berbeda-beda. Data operasi (Riwayat Operasi, RO) mensimulasi kondisi reaktor uji material sekelas RSG-G.A.Siwabessy di Serpong, dan disajikan pada pada Tabel 2, yaitu RO1 pada kolom (1) – (3), RO2, RO3, dan RO4 merupakan variasi dari RO1 tertulis pada baris 1 dan 2 kolom (5) – (7). Temperatur dan Daya pada RO2 merupakan rerata dari RO1. RO3 seperti RO1 kecuali temperatur lebih tinggi 25 K. Temperatur dan daya RO4 seperti pada RO3 tetapi kecepatan alir adalah separuhnya sementara pH = 7. Hasil riwayat tebal lapisan korosi disajikan pada Tabel 2 kolom (1), (4) – (7).

Tabel 1. Data disain reaktor sifat-sifat bahan

Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
$X_0$	0	$\mu\text{m}$	Tebal awal	$v$	7,6	m/det	Kecepatan alir
$q$	3,8	$\text{MW/m}^2$	Fluks termal	$A_e$	2	-	Konstanta
$T$	340	K	Suhu kelongsong	pH	5,4	-	Derajat keasaman
$x$	-	$\mu\text{m}$	tebal oksida awal	$ad$	0,37 0,5	-	Koreksi terkait iradiasi

Pada pengoperasian dengan langkah waktu kondisi stabil setiap 100 jam seperti Tabel 2, diperoleh ketebalan yang meningkat sesuai dengan waktu operasi, dan pada

akhir operasi ketebalan mencapai ~40 µm. Penurunan dan kenaikan suhu maupun fluks termal setiap melangkah khususnya mulai langkah 18 tidak cukup nampak secara visual dari grafik (Gambar 1). Secara numerik data riwayat ketebalan lapisan korosi ini disajikan pada Tabel 2. Untuk mempermudah pengamatan visual perlu dibuat riwayat kurva arah dari kurva ketebalan.

Pada pengoperasian kedua, suhu dan fluks termal dibuat konstan, yaitu sebesar rerata dari nilai pada Tabel 2, suhu 60 °C dan fluks 6 MW/m<sup>2</sup>. Hal ini agar dapat mengevaluasi efek variasi suhu dan fluks sepanjang siklus, dengan membandingkan hasil pertama dan kedua. Ketebalan lapisan korosi untuk 4 skenario pengoperasian dalam angka ditampilkan pula pada Tabel 2 kolom (4) – (7), data diplotkan pada Gambar 1. Tidak mudah melihat perbedaan hasil dari dua kurva, karena beda pada akhir operasi hanya sekitar 1 µm atau sebesar 2,5%. Untuk mempermudah pada Tabel 2 kolom (8) – (11) disajikan nilai angka perbedaan dari dua ketebalan. Simulasi kedua memperkuat bahasan hasil pertama, bahwa fluktuasi fluks dan suhu, hingga sebesar 10 %, tidak terlalu banyak berpengaruh.

Tabel 2. Hasil perhitungan tebal lapisan korosi pada permukaan kelongsong

Waktu, (ratus jam)	Riwayat operasi-1= ROI(T1iQ1i)		Riwayat tebal lapisan korosi, µm				Beda riwayat tebal			
	Suhu, T1 (°C)	Fluks, q1 (MW/m <sup>2</sup> )	ROI (T1i, q1i)	RO2 (T2i=60°C, q2i=6 Mw/m <sup>2</sup> )	RO3 (T3i=T1i+ 25,q1i)	RO4 (RO3; v2; pH=7)	ROI- RO2	RO3- RO2	RO3- RO4	ROI- RO4
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	7	70	1,996	1,718	2,533	1,165	0,278	0,816	1,369	0,831
2	6	65	3,888	3,441	5,079	2,335	0,418	1,639	2,744	1,523
3	8	75	6,038	5,168	7,638	3,512	0,809	2,470	4,127	2,526
4	6	60	7,792	6,901	10,209	4,693	0,890	3,308	5,516	3,098
5	6,5	62	9,600	8,639	12,794	5,881	0,960	4,154	6,913	3,719
6	7	70	11,637	10,383	15,391	7,074	1,254	5,008	8,316	4,563
7	6	65	13,532	12,131	18,001	8,273	1,401	5,870	9,727	5,259
8	4	55	15,188	13,885	20,624	9,479	1,304	6,740	11,146	5,710
9	8	75	17,431	15,644	23,261	10,690	1,787	7,618	12,571	6,741
10	7	70	19,502	17,408	25,911	11,907	2,095	8,504	14,005	7,596
11	7,5	72	21,655	19,177	28,576	13,130	2,478	9,399	15,446	8,525
12	5	62	23,494	20,952	31,257	14,359	2,543	10,305	16,898	9,135
13	7	72	25,659	22,732	33,956	15,595	2,928	11,224	18,361	10,065
14	8	75	27,962	24,517	36,673	16,836	3,445	12,156	19,836	11,125
15	8	65	29,948	26,308	39,409	18,084	3,640	13,101	21,325	11,863
16	7	60	31,796	28,105	42,166	19,339	3,691	14,062	22,827	12,457
17	7	63	33,729	29,908	44,945	20,599	3,821	15,037	24,345	13,130
18	4	52	35,369	31,718	47,746	21,867	3,650	16,028	25,880	13,502
19	5	55	37,090	33,536	50,572	23,141	3,554	17,036	27,431	13,949
20	3	42	38,554	35,360	53,424	24,421	3,194	18,064	29,003	14,133
21	4	42	40,037	37,193	56,304	25,708	2,844	19,111	30,596	14,329
22	2	26	41,296	39,033	59,214	27,003	2,263	20,181	32,211	14,293
23	3	20	42,514	40,881	62,155	28,305	1,633	21,274	33,85	14,209
24	5	50	44,160	42,737	65,131	29,616	1,423	22,394	35,515	14,544

Catatan:

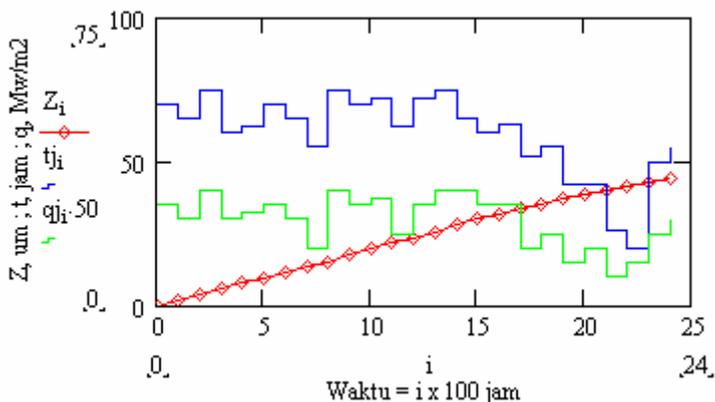
- RO(T,q), riwayat suhu permukaan kelongsong dan fluks pengoperasian.

- RO1, menggunakan data Tabel 1 tetapi suhu dan fluks fungsi waktu seperti pada Tabel 2 kolom 2 (kolom 2.1 dan kolom 2.2).
- RO2, seperti pada RO1 tetapi suhu dan fluks konstant sebesar rerata pada RO1 ( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan  $5\text{ MW/m}^2$ ).
- RO3, seperti RO1 tetapi suhu tiap langkah ditambah  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- RO4, seperti RO3 tetapi parameter dari Tabel 1 diubah  $v \times 0,5$  dan  $\text{pH} = 7$ .

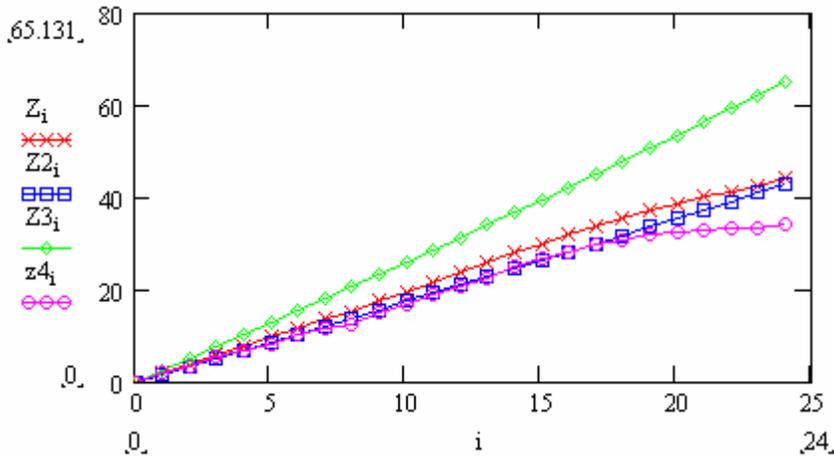
Pada simulasi ketiga, riwayat suhu dan fluks seperti pada Tabel 2 kolom (1) – (3), yaitu untuk simulasi pertama, tetapi data temperatur ( $T_i$ ) dinaikkan sebesar  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hasil yang didapat menunjukkan adanya kenaikan tebal lapisan korosi dibandingkan dengan simulasi pertama. Perbedaan ini dapat dilihat dengan mudah pada Gambar 2. Hal ini sesuai dengan penelitian-penelitian sebelumnya<sup>[2]</sup>, bahwa suhu mempengaruhi kinetika reaksi individual. Sampai dengan 100 FPD (*Full Power Day*) atau 2400 jam operasi daya penuh, kenaikan  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  menaikkan tebal korosi hingga  $\sim 20,9\text{ }\mu\text{m}$  (RO3-RO1), dari  $44,160\text{ }\mu\text{m}$  menjadi  $65,131\text{ }\mu\text{m}$ .

Beberapa hal yang diprediksi dapat menjadi sumber perbedaan adalah kimia air dan kecepatan aliran pendingin. Kimia air terbatas pada pH, walau demikian untuk aplikasi dalam reaktor riset dengan material Al pada umumnya kondisinya tidak terlalu jauh berbeda, maka dalam simulasi pH hanya bergeser dari 5,4 ke 7. Pada simulasi RO4 selain keasaman lebih netral juga ditambah laju alir diturunkan setengahnya. Prediksi menghasilkan lapisan yang lebih tipis  $14\text{ }\mu\text{m}$  (RO1-RO4) selama 2400 jam. Penurunan kecepatan aliran fluida ini belum diperhitungkan dengan keselamatan apakah terpenuhi. Kondisi permukaan dan jenis pepadu (paduan kelumit atau *micro-alloying*) dalam prediksi ini tidak diperhatikan.

Dari perbedaan 3 tipikal pengoperasian dapat diamati perbedaan ketebalan korosi dan pengaruhnya pada konduktivitas termal sebagai berikut.



Gambar-1. Riwayat suhu ( $t_i$ ), fluks termal ( $q_i$ ) dan tebal lapisan korosi ( $Z$ ) selama 2400 jam operasi



Gambar 2. Riwayat tebal lapisan korosi dengan riwayat pengoperasian: Z untuk RO1 operasi tipikal (T dan q fluktuatif), Z2 untuk RO2 tetap pada nilai rerata, Z3 untuk RO3 tipikal tetapi suhu lebih tinggi 25 K, dan z4 untuk seperti RO1 tetapi v setengah dan pH 7.

Pada model Y-S.KIM fluks maupun suhu mempengaruhi ketebalan secara positif melalui persamaan (4) – (10), yaitu konstanta k sebagai fungsi suhu dan fluks dan lainnya. Perubahan nilai k oleh berubahnya q sebagaimana disajikan pada Tabel 2, k naik dengan kenaikan fluks. Selanjutnya k ini berpengaruh secara positif (nilai tebal bertambah besar bila nilai k bertambah besar, dan sebaliknya) terhadap ketebalan menurut persamaan (5).

Pada kondisi lapangan data yang dipantau adalah temperatur pendingin masuk dan keluar teras, tetapi dalam prediksi ini data masukan yang diberikan adalah data temperatur permukaan kelongsong, semestinya sedikit lebih tinggi dari rerata suhu pendingin masuk dan keluar teras, oleh hambatan film laminar.

Sampai dengan perhitungan ini belum ada data eksperimen penentuan ketebalan korosi bahan bakar RSG-GAS yang dijadikan pembanding.

## V. KESIMPULAN

Mekanisme korosi paduan Al dalam lingkungan air bebas mineral dinamik telah dimodelkan dengan mempertimbangkan parameter dan waktu operasi, variasi suhu permukaan, laju alir, pH air, tebal lapisan korosi dan fluks termal yang melewati, serta parameter iradiasi. Model didasarkan pada bermacam data eksperimen, dan divalidasi dengan eksperimen baru. Model diaplikasikan pada tipe reaktor uji material dengan parameter bahan dan disain dan beberapa set data operasi, yaitu riwayat suhu dan daya.

Prediksi tebal lapisan untuk riwayat pengoperasian selama 2400 jam untuk tipikal temperatur maupun daya yang berfluktuasi 5% adalah 44,2  $\mu\text{m}$ . Bila daya dan temperatur tetap sebesar rerata tipikal, maka tebal turun sedikit menjadi 42,7  $\mu\text{m}$ . Bila nilai fluktuatif tetapi temperatur 25 K lebih tinggi maka tebal mencapai 65,1  $\mu\text{m}$ , suatu

penambahan sebesar 21  $\mu\text{m}$ . Secara lebih logis temperatur yang lebih tinggi 25 K diperoleh antara lain dengan menurunkan laju alir pendinginan, misalnya menjadi setengahnya, dan disertai pH lebih bersifat netral menjadi 7. Untuk ini didapat tebal lapisan korosi hanya mencapai 29,6  $\mu\text{m}$ , yaitu sedikit lebih rendah daripada tebal pada pengoperasian secara umum.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

1. KIM, CH-K., LEE, Y-S., LEE, D-B., OH, S-J., KIM, K-H., CHAE, H-T, PARK, J-M., SOHN, D-S., International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Chicago, Illinois, October 5-10, 2003.
2. KAWASAKI, M., et al., "Corrosion of Aluminum in Water", Metallurgy Lab., JAERI, 1962.
3. KIM, Y-S., HOFMAN, G.L, HANAN, N.A., and SNELGROVE, J.L., "Prediction Model For Oxide Thickness On Aluminum Alloy Cladding During Irradiation", International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Chicago, Illinois, 2003.
4. SUWARDI, "Hubungan Pengukuran dan Perhitungan Teoritik Tebal Lapisan Korosi Elemen Bakar Uji untuk Reaktor HANARO", Seminar Kimia Nasional XV, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2003.
5. PAWEL, R.E., YODER, G.L., FELDE, D.K., MONTGOMERY, B.H., MCFEE, M.T., "Oxidation of Metals", 36(1/2), 1991, p.175.
6. GODDARD, H.P., et. al., "The Corrosion of Light Metals", Wiley & Son, Inc., New York, 1967, p.9.
7. HOWELL, J.P., and ZAPP, P.E., "Effect of Water Conductivity on Corrosion of Aluminum Alloys in Spent Fuel Storage", Paper 118, Corrosion 94, The NACE Annual Conference and Show, 1994.
8. KIM, Ch-K., LEE, Y-S., LEE, D-B., OH, S-J., KIM, K-H., CHAE, H-T., PARK, J-M., and SOHN, D-S., International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Chicago, Illinois, 2003.
9. SUWARDI, dan KIM, Ch-K., "Penentuan Tebal Lapisan Korosi Elemen Bakar Uji untuk Reaktor HANARO", Seminar Kimia Nasional XV, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2003.
10. GRIESS, J.C., SAVAGE, H.C., and ENGLISH, J.L., ORNL-3541, ORNL-3230, Oak Ridge National Laboratory, 1964.