

AKOMODASI ION KLORIDA DALAM PERSYARATAN KUALITAS AIR PENDINGIN PRIMER UNTUK MEMPERTAHANKAN INTEGRITAS TANGKI REAKTOR TRIGA 2000

Nurul Huda, Sumijanto, Muhammad Ihsan
Pusbang Teknologi Keselamatan Nuklir - BATAN

ABSTRAK

AKOMODASI ION KLORIDA DALAM PERSYARATAN KUALITAS AIR PENDINGIN PRIMER UNTUK MEMPERTAHANKAN INTEGRITAS TANGKI REAKTOR TRIGA 2000. Reaktor Triga 2000 Bandung telah berhasil ditingkatkan kapasitas dayanya untuk keperluan pelatihan, sumber neutron dan penelitian ilmu dasar maupun terapan, sekaligus untuk menopang kebutuhan produksi radioisotop Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy Serpong. Dari pengalaman operasi sebelumnya terlihat bahwa tangki Reaktor Triga 2000 mengalami degradasi yang dapat mempengaruhi kelangsungan operasinya. Munculnya bercak putih pada awal operasi juga menjadi perhatian dalam pengelolaan air pendingin primer. Berangkat dari pengalaman tersebut dan dalam rangka mendukung kelangsungan operasi reaktor maka dilakukan studi untuk memperoleh kondisi kualitas air yang menjamin integritas, keandalan dan keselamatan operasi reaktor. Untuk operasi rutin, di dalam buku Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Triga 2000 telah ditentukan persyaratan air pendingin primer yaitu kandungan unsur kelumit Na, Si, Ca, dan Mg masing-masing tidak lebih dari 1,0 ppm, pH pada interval 5,5 – 6,5 dan konduktivitas listrik tidak lebih dari 3,5 iS/cm. Sedangkan ion-ion agresif lain seperti klorida, sulfat dan tembaga belum diakomodasi. Dalam studi ini dilakukan uji korosi terhadap paduan aluminium Al 6061 T6 dalam lingkungan air yang mengandung ion klorida dengan konsentrasi yang bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lingkungan air yang mengandung ion klorida sangat berpengaruh terhadap proses korosi tipe sumuran pada logam aluminium yang merupakan bahan tangki reaktor. Dari tinjauan lain, ukuran anion klorida yang relatif kecil membuatnya memiliki densitas muatan yang relatif besar sehingga dibanding anion-anion lain ion klorida memiliki selektivitas yang tinggi dan akan lebih dulu diserap oleh resin penukar anion. Jika konsentrasi ion klorida cukup besar, dapat diduga bahwa anion lain masih belum terbersihkan. Dengan demikian, konsentrasi ion klorida dapat menjadi indikator bagi keberadaan anion-anion lainnya. Berangkat dari keadaan ini maka untuk menekan laju korosi, mempertahankan integritas tangki reaktor dan sekaligus menjaga agar konsentrasi pengotor masih berada dalam batas yang dipersyaratkan disarankan agar batasan konsentrasi ion klorida dalam air pendingin primer reaktor diakomodasi dalam persyaratan kualitas air pendingin primer Reaktor Triga 2000 bersama dengan persyaratan lain yang telah tercantum sebelumnya.

Kata Kunci : Kimia Air, Korosi, Pendingin Primer Reaktor

ABSTRACT

ACCOMODATION OF CHLORIDE ION FOR PRIMARY COOLING WATER QUALITY REQUIREMENT TO KEEP THE TANK INTEGRITY OF REACTOR TRIGA 2000. The power capacity of Reactor Triga 2000 Bandung was upgraded for the need of training, neutron source and research in basic sciences and applied technology altogether to sustain the need of radioisotope production at Multi Purpose Reactor G.A. Siwabessy Serpong. It could be seen in the previous operation that the tank of Reactor Triga 2000 had a degradation which may affect its operation continuity. The appearance of white spotted at its early operation also need an attention in primary cooling water management. Based on those experinces and to suppose the operation continuity of the reactor, a study has been done to get a water quality condition that guarantee the integrity, reliability and safety for the reactor operation. For the need of routine operation, the Safety Analysis Report Book of Reactor Triga 2000 has decided the requirements for the primary water i.e. concentration of trace element Na, Si, Ca, and Mg not more than 1,0 ppm respectively, pH in the interval of 5,5 – 6,5 and electric konduktivitas less than 3,5 iS/cm. While the other agresif ions such as chloride, sulphate and cuprum were not accomodated yet. In this study, a corrosion measurement for aluminium alloy Al 6061 T6 in water environment which contained chloride ion with various concentration was done. The measurement results showed that water environment wich contains chloride ion has a high influence in the pitting type corrosion process of aluminium metal which arranged the reactor tank. On the ather hand, the size of chloride ion which is relatively small made its electric density higher than other anions. This procurement caused a high selectivity of chloride ion and comparing to other anions it should be firstly exchanged by the anion exchanger resin. When the concentration of

chloride ion is high, it can be estimated that the other anions not be changed yet. Thus, the concentration of chloride ion can be used as an indicator for the existence of other anions. Based on these phenomenas, to depress the corrosion rate, keep the reactor tank integrity and altogether to keep the concentration of impurities below the maximum limit as required it is suggested to accomodate the maximum limit of chloride ion concentration in the water quality requirements for the primary cooling water of Reactor Triga 2000 simultaneously with the other requirements which had been included previously.

Key Words : Water Chemistry, Corrosion, Reactor Primary Coolant.

PENDAHULUAN

Air pendingin primer yang mengisi tangki reaktor mempunyai tingkat kemurnian sangat tinggi dan disuplai dari instalasi pembuat air bebas mineral (*water demineralization plant*). Selanjutnya kualitas air pendingin primer ini dijaga dengan suatu sistem purifikasi air primer. Baik instalasi pembuat air bebas mineral maupun sistem purifikasi air primer bekerja terutama berdasarkan pada proses penukaran ion dengan menggunakan resin.

Pengendalian tingkat kemurnian air terutama ditujukan untuk : Menekan laju paparan radiasi akibat teraktivasinya pengotor (impuritas) di dalam air tersebut; Mencegah terjadinya korosi terhadap logam atau paduan logam pada komponen reaktor; Menjaga efisiensi pertukaran panas dengan mencegah terjadinya pengerakan pada permukaan penukar panas yang diakibatkan oleh pengotor yang mengendap.

Besaran yang umum digunakan sebagai indikator konsentrasi pengotor di dalam air adalah pH (derajat keasaman) dan κ (konduktivitas listrik) karena nilai keduanya dipengaruhi oleh spesi kimia yang terlarut di dalam air. Namun di samping mengontrol nilai pH dan κ , perlu juga dilakukan analisis terhadap spesi kimia pengotor. Hal ini karena nilai keduanya tidak dapat menunjukkan jenis spesi kimia yang ada dan karena tidak semua spesi kimia pengotor berpengaruh terhadap nilai pH dan κ . Spesi kimia dimaksud dapat berupa unsur, ion ataupun senyawa netral baik organik maupun anorganik yang mempengaruhi sifat air, terutama yang berpengaruh secara signifikan terhadap kualitas air ditinjau dari sudut penggunaannya bagi pendingin primer reaktor riset.

Studi literatur menunjukkan bahwa lingkungan air yang mengandung ion klorida berpengaruh terhadap proses korosi tipe sumuran pada logam aluminium termasuk paduan aluminium Al 6061 T6 yang merupakan bahan tangki Reaktor Triga 2000. Di samping itu, ukuran ion klorida yang relatif kecil membuatnya memiliki densitas muatan yang relatif besar sehingga ion klorida akan lebih dulu diserap oleh resin penukar anion dibanding anion-anion lain.

Jika konsentrasi ion klorida masih tinggi dapat diduga bahwa anion lain belum terbersihkan oleh resin. Dengan demikian, konsentrasi ion klorida dapat dijadikan indikator bagi keberadaan anion-anion lainnya dalam air yang telah melewati resin penukar anion.

Berangkat dari pemikiran tersebut, makalah ini membahas perlunya akomodasi konsentrasi ion klorida dalam persyaratan kualitas air pendingin primer Reaktor Triga 2000 Bandung bersama dengan persyaratan lain yang sudah tercantum dalam buku LAK (Laporan Analisis Keselamatan). Sebagai perbandingan disitir juga batasan kualitas air pendingin primer Reaktor G.A. Siwabessy Serpong dan Reaktor Kartini Yogyakarta beserta beberapa hasil pengujian terhadap sampel air dari reaktor-reaktor tersebut.

TINJAUAN LITERATUR

Korosi Pada Logam Aluminium

Korosi adalah penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Jika logam terkorosi maka logam akan melepaskan elektron-elektron dari atom logam netral untuk membentuk kation-kation logam. Kation-kation ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk produk korosi yang tidak larut. Produk korosi yang tidak larut dapat menghalangi pelarutan logam lebih lanjut sehingga reaksi korosi terhenti. Dalam hal ini logam disebut mengalami pasifasi. Jika karena suatu hal lapisan pelindung tersebut rusak maka reaksi korosi akan berlangsung kembali.

Meskipun logam aluminium adalah logam yang reaktif, tetapi aluminium mempunyai ketahanan korosi yang baik sekali. Ketahanan korosi ini terjadi karena pada permukaan logam terbentuk lapisan oksida (Al_2O_3) yang mampu melindungi logam dari korosi lebih lanjut. Jika lapisan oksida ini rusak, maka lapisan oksida baru akan terbentuk seketika. Pada permukaan aluminium yang baru saja diampelas, di mana tebal lapisan oksida hanya tinggal 1 nm pun, lapisan ini masih efektif sekali melindungi logam dari korosi.⁽¹⁾

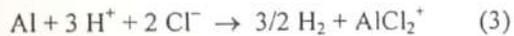
Lapisan oksida pada logam aluminium terdiri dari dua bagian yaitu lapisan dalam dan lapisan luar. Lapisan dalam yang tipis mempunyai struktur padat dan amorf, sedangkan lapisan luar tebal dan kurang padat dibandingkan dengan lapisan dalam. Tebal lapisan oksida ini tergantung pada temperatur lingkungan, konsentrasi oksigen dan kelembaban udara. Pada lingkungan yang tidak korosif seperti pada udara kering, lapisan oksida mempunyai tebal sekitar 200 nm, sedangkan pada lingkungan korosif lapisan oksida akan menipis menjadi 20 nm.⁽¹⁾

Karakteristik Ion Klorida dan Pengaruhnya Terhadap Proses Korosi Pada Logam Aluminium

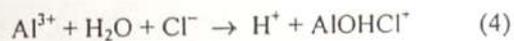
Mekanisme reaksi pembentukan *pit* pada logam aluminium diawali oleh adanya cacat pada lapisan oksida pelindung Al₂O₃. Reaksi korosi berlangsung sebagai berikut :



Reaksi korosi tersebut akan diikuti oleh penetrasi ion Cl⁻ yang membuat reaksi korosi menjadi lebih hebat sesuai reaksi :



Masuknya ion Cl⁻ juga mempercepat pelarutan logam aluminium pada reaksi (3) melalui reaksi dengan ion Al³⁺ sebagai berikut :



Jika dalam larutan terdapat Cu²⁺ maka ion ini akan tereduksi di daerah katoda menjadi endapan logam Cu sesuai reaksi berikut :



Endapan logam Cu yang terbentuk pada daerah katoda akan meningkatkan efektivitas reaksi reduksi sehingga proses korosi akan semakin cepat. Sebagai akibatnya *pit* akan terbentuk lebih dalam.

Pemurnian Air dengan Resin Penukar Ion

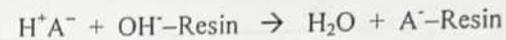
Penukaran ion adalah proses menghilangkan ion-ion pengotor dari air umpan dengan cara memindahkannya ke suatu materi padat yang disebut resin penukar ion. Resin ini menerima ion-ion

tersebut dan menukarnya dengan ion yang dikehendaki yang tersimpan sebelumnya dalam rangkanya dengan jumlah yang ekuivalen. Reaksi penukaran ion oleh resin adalah sebagai berikut,

Reaksi penukaran kation:



Reaksi penukaran anion:

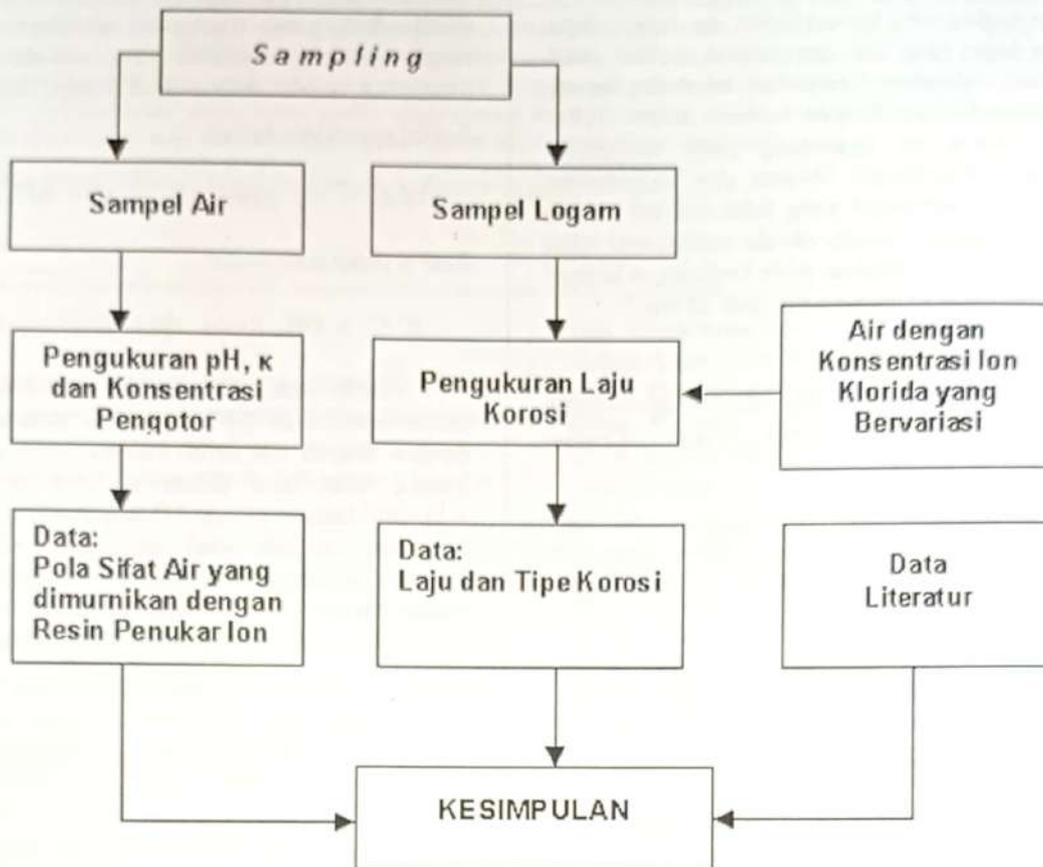


Resin penukar ion yang digunakan dalam proses pemurnian air mempunyai struktur rangka dengan banyak sisi aktif. Rangka tersebut bersifat plastis, tidak larut dalam air dan mengandung sejumlah besar sisi aktif berupa ion yang akan mengikat ion lain yang muatannya berlawanan. Penukar ion dengan sisi penukar bermuatan negatif adalah penukar kation karena sisi tersebut mengikat dan menukar ion positif. Demikian pula sebaliknya.

BAHAN, PERALATAN DAN TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam percobaan ini adalah sampel paduan aluminium Al 6061 T6, larutan standar ion klorida, silikon dan aluminium, kertas pH dan paket-paket reagen produk Merck yang spesifik untuk pengukuran konsentrasi klorida, silikon dan aluminium terlarut.

Uji korosi dilakukan dengan paket alat *Corrosion Measurement System* dari EG & G. Pengujian sifat air dilakukan dengan sampling dari instalasi pembuat air bebas mineral Reaktor Triga 2000 dan R.S.G. G.A. Siwabessy dilanjutkan dengan pengukuran pH, konduktivitas dan konsentrasi beberapa spesi kimia di dalamnya. Nilai pH diukur dengan menggunakan pH meter merek Hanna. Sebelumnya nilai pH diperiksa lebih dulu dengan menggunakan kertas pH (indikator universal) sehingga jika pH meter menunjukkan nilai di luar daerah yang diindikasikan oleh kertas pH maka pH meter akan dikalibrasi kembali. Konduktivitas listrik diukur dengan menggunakan *conductivitymeter* yang telah dikalibrasi lebih dahulu menggunakan larutan standar. Pengukuran konsentrasi spesi kimia dilakukan dengan menggunakan *test kit* yang bekerja berdasarkan prinsip spektrofotometri serapan atom (SSA) dan spektrofotometri sinar tampak. Sedangkan pola kerja dan pengambilan kesimpulan pada percobaan ini secara garis besar ditunjukkan dengan diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir tata kerja untuk mengetahui perlunya pembatasan konsentrasi ion klorida dalam air pendingin primer Reaktor Triga 2000.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Besaran yang umum digunakan sebagai indikator konsentrasi pengotor di dalam air adalah pH (derajat keasaman) dan κ (konduktivitas listrik) karena nilai keduanya dipengaruhi oleh spesi kimia yang terlarut di dalam air. Di samping mengontrol nilai pH dan κ , perlu juga dilakukan analisis terhadap spesi kimia pengotor untuk mengetahui secara kuantitatif kandungan spesi kimia agresif di dalam air. Spesi kimia tersebut dapat berupa unsur, ion ataupun senyawa netral baik organik maupun anorganik yang mempengaruhi sifat air, terutama yang berpengaruh secara signifikan terhadap kualitas air ditinjau dari sudut penggunaannya bagi pendingin primer reaktor riset. Persyaratan kualitas air pendingin primer Reaktor G.A. Siwabessy, Reaktor Triga 2000 dan Reaktor Kartini yang tercantum dalam Buku LAK ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengendalian kualitas air untuk keperluan pendingin primer reaktor terutama ditujukan untuk:

- Menekan laju paparan radiasi akibat teraktivasi-sinya pengotor (impuritas) di dalam air tersebut.
- Mencegah terjadinya korosi terhadap logam atau paduan logam pada komponen reaktor.
- Menjaga efisiensi pertukaran panas dengan mencegah terjadinya pengerakan pada permukaan penukar panas yang diakibatkan oleh pengotor yang mengendap.

Meskipun bersifat agresif dan korosif terhadap logam penyusun tangki reaktor, yaitu paduan aluminium Al 6061 T6, sejauh ini konsentrasi ion klorida belum diakomodasi dalam persyaratan kualitas air pendingin primer Reaktor Triga 2000. Akomodasi ion klorida dan pembatasan konsentrasinya dalam air pendingin primer tersebut dianggap perlu paling tidak untuk dua tujuan, yaitu:

- Menekan laju korosi.
- Menjadi salah satu indikator kinerja resin penukar anion.

Tabel 1. Persyaratan kualitas air untuk keperluan pendingin primer Reaktor G.A. Siwabessy, Reaktor Triga 2000 dan Reaktor Kartini.^(3,4,5)

No.	Besaran	Nilai Yang Diperkirakan dalam Buku LAK		
		RSG G.A. Siwabessy	Triga 2000	Kartini
1.	pH	5,8 - 7,0	5,5 - 6,5	5,5 - 6,5
2.	Konduktivitas	< 0,8 mS/m	< 3,5 μ hos/cm	< 3,5 μ hos/cm
3.	Konsentrasi ion klorida	< 0,0049 ppm ^{*)}	-	-
4.	Konsentrasi ion sulfat	< 0,0528 ppm	-	-
5.	Konsentrasi silikon	-	< 1,00 ppm	< 1,00 ppm
6.	Konsentrasi ion tembaga	< 0,0232 ppm	-	-
7.	Konsentrasi ion aluminium	Nilainya belum dicantumkan ^{**)}	-	-
8.	Konsentrasi ion natrium	< 0,0115 ppm	< 1,00 ppm	< 1,00 ppm
9.	Konsentrasi ion magnesium	-	< 1,00 ppm	< 1,00 ppm
10.	Konsentrasi ion kalsium	-	< 1,00 ppm	< 1,00 ppm

*) Seharusnya adalah 0,0490 ppm.

**) Di dalam LAK, aluminium disebut sebagai pengotor yang konsentrasinya perlu dibatasi tetapi nilai batasannya belum dicantumkan.

Pembatasan Konsentrasi Ion Klorida untuk Menekan Laju Korosi Aluminium Al 6061 T6

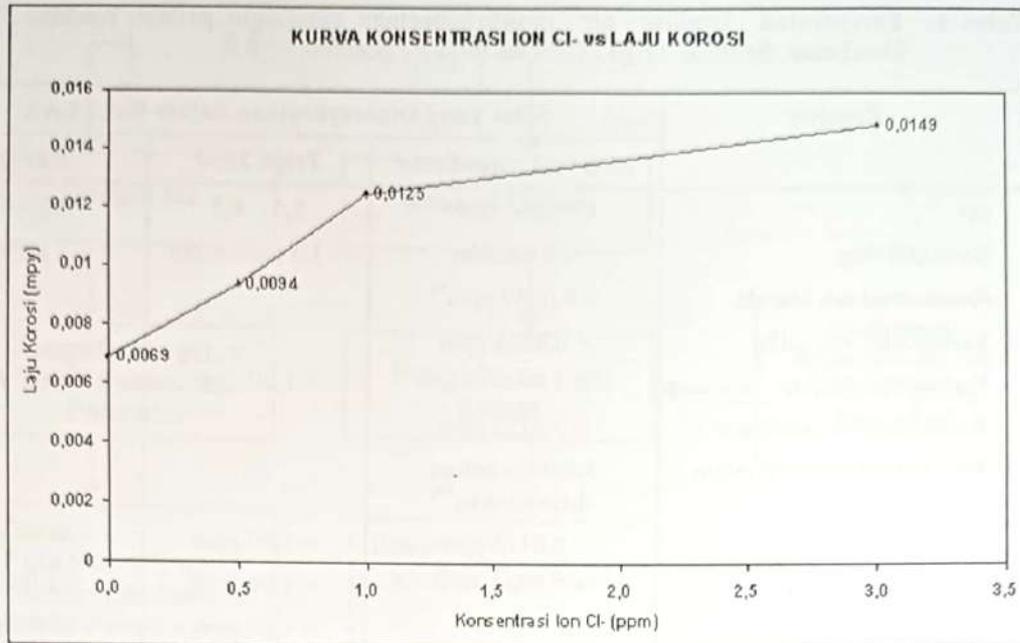
Aluminium adalah logam yang reaktif sehingga sebenarnya mudah sekali mengalami korosi. Namun pada kenyataannya logam aluminium mempunyai ketahanan korosi yang cukup baik. Ketahanan korosi aluminium terjadi karena terbentuknya lapisan pasif produk korosi, Al_2O_3 , yang melapisi permukaan aluminium dan menghentikan proses korosi lebih lanjut. Jika perlindungan oleh lapisan pasif ini hilang maka dengan segera aluminium akan mengalami korosi. Agresivitas ion klorida terhadap aluminium terjadi karena ion klorida dapat berreaksi dengan logam aluminium pada daerah lapisan pasif yang cacat dan berakibat terbukanya lapisan pelindung tersebut sehingga proses korosi kembali terjadi. Tipe korosi yang terjadi dalam kasus ini adalah korosi sumuran (*pitting corrosion*).

- Korosi sumuran bersifat lokal dan secara selektif menyerang bagian permukaan logam yang mengalami salah satu hal berikut ini⁽¹⁾:
- Selaput pelindungnya tergores atau retak akibat perlakuan mekanik.
- Mempunyai tonjolan karena adanya dislokasi akibat tegangan tarik atau tegangan sisa.

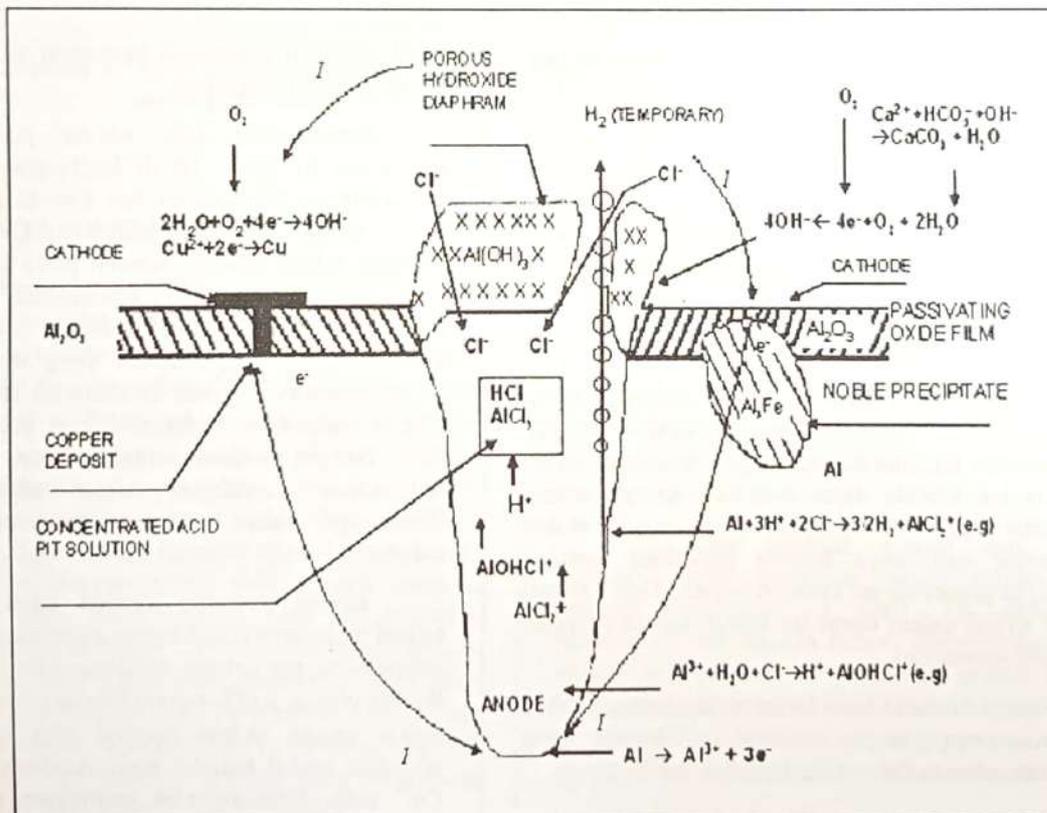
- Mempunyai komposisi heterogen akibat adanya inklusi atau presipitasi.

Pertambahan laju korosi pada paduan aluminium Al 6061 T6 di lingkungan air akibat bertambahnya konsentrasi ion klorida ditunjukkan pada Gambar 2. Laju korosi dalam kurva tersebut memang relatif rendah. Namun perlu diperhatikan bahwa alat uji korosi mengkalkulasi laju korosi berdasarkan luas permukaan sampel uji sedangkan dalam kasus ini tipe korosi yang terjadi adalah korosi sumuran di mana korosi tidak terjadi secara merata melainkan terfokus hanya pada titik-titik kecil. Dengan demikian, meskipun laju korosi rata-rata untuk seluruh permukaan adalah rendah, sebenarnya reaksi korosi sudah menusuk cukup dalam.

Korosi sumuran bersifat lokal dan dapat terjadi pada permukaan logam aluminium. Meskipun sebelumnya permukaan aluminium terlindungi oleh lapisan oksida Al_2O_3 namun karena adanya stimulasi reaksi anodik akibat aktivasi oleh ion Cl^- dan stimulasi reaksi katodik oleh oksidator seperti ion Cu^{2+} serta didukung oleh permukaan katoda yang berpolarisasi rendah maka reaksi korosi dapat berlangsung. Ilustrasi mekanisme serangan *pitting* pada logam aluminium ditunjukkan pada Gambar 3.⁽⁶⁾



Gambar 2. Kurva laju korosi paduan aluminium Al 6061 T6 dalam lingkungan air dengan variasi konsentrasi ion klorida.



Gambar 3. Ilustrasi korosi sumuran pada logam aluminium akibat rusaknya lapisan pasif aluminium oksida yang melindungi logam tersebut.⁽⁶⁾

Serangan *pitting* dapat terjadi pada logam aluminium jika potensial korosi minimum tertentu (potensial *pitting*) dapat dicapai. Nilai potensial *pitting* ini lebih rendah dari pada potensial transpasif. Pembentukan *pit* diawali oleh adsorpsi ion pengaktif terutama ion klorida (Cl⁻) pada tempat yang cacat film oksidanya. Jika potensial *pitting* tercapai maka kuat medan listrik di atas bagian film oksida yang menipis akan sangat tinggi sehingga ion klorida dapat masuk ke film dengan membentuk oksida klorida dan selanjutnya terjadi pelarutan lokal film oksida. Pada saat inilah *pit* terbentuk dan kemudian terus tumbuh secara otomatis.

Pengendalian korosi pada suatu instalasi dapat dilakukan dengan beberapa cara di antaranya: Pengendalian korosi pada saat perancangan instalasi; Pengendalian korosi dengan cara mengendalikan lingkungan; Pengendalian korosi dengan menggunakan lapisan penghalang; Pengendalian korosi dengan proteksi katodik dan anodik.

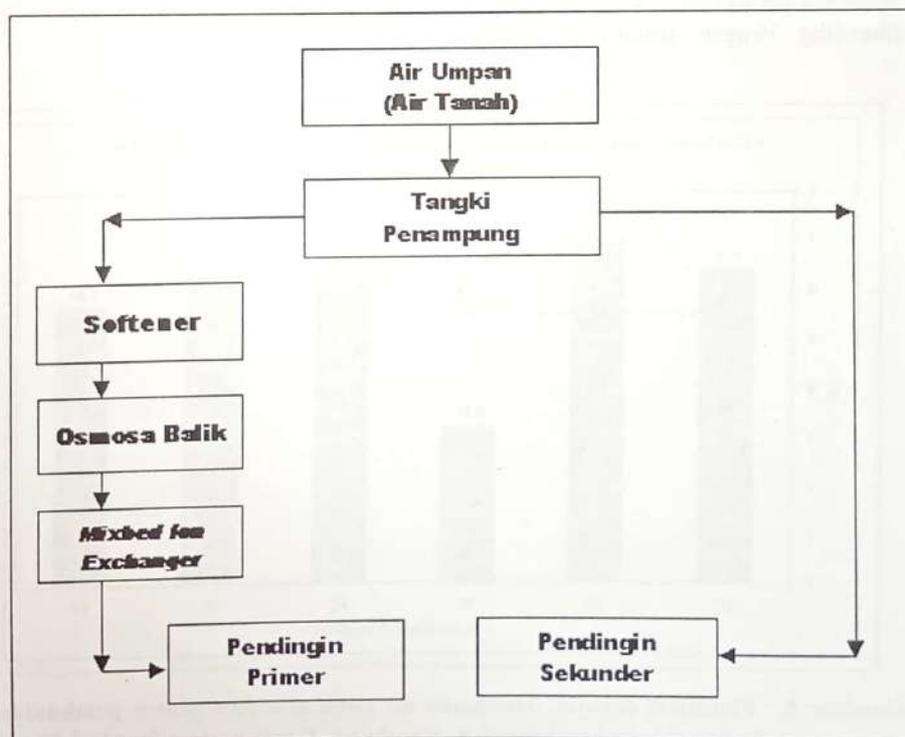
Dalam hal pembatasan konsentrasi klorida, korosi pada logam aluminium dikendalikan dengan cara pengendalian lingkungan.

Konsentrasi Ion Klorida Sebagai Indikator Kinerja Resin Penukar Anion

Ion klorida memiliki ukuran yang relatif kecil. Akibatnya ion ini memiliki densitas muatan yang relatif besar sehingga akan lebih dulu diserap oleh resin penukar anion dibanding anion-anion lain. Jika konsentrasi ion klorida dalam air yang telah melewati resin penukar anion masih tinggi maka dapat diduga bahwa anion lain juga belum terbersihkan oleh resin. Dengan demikian, konsentrasi ion klorida dapat dijadikan indikator bagi keberadaan anion-anion lainnya dalam air yang telah melewati resin penukar anion.

Air yang digunakan sebagai pendingin primer dan mengisi tangki Reaktor Triga 2000 disuplai dari suatu instalasi pembuat air bebas mineral. Pada dasarnya instalasi ini menghasilkan air bebas mineral dengan cara penukaran ion. Selanjutnya kualitas air primer dijaga dengan suatu sistem purifikasi yang juga bekerja atas dasar prinsip penukaran ion dengan menggunakan resin. Secara sederhana, diagram alir proses pembuatan air bebas mineral di reaktor Triga 2000 ditunjukkan pada Gambar 4.

Sampling air dan pengujian telah dilakukan pada air produk instalasi pembuat air bebas mineral Reaktor Triga 2000 tersebut. Hasil pengukuran pH, konduktivitas serta konsentrasi aluminium, silikon dan klorida pada kedua sampel tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 4. Bagan instalasi pembuat air bebas mineral di reaktor Triga 2000 Bandung.

KESIMPULAN

Ion klorida bersifat agresif dan korosif terhadap paduan aluminium yang menyusun tangki Reaktor Triga 2000 karena ion ini dapat membuka lapisan pasif yang melindungi logam aluminium dari korosi. Konsentrasi ion klorida juga dapat menjadi indikator kinerja resin penukar anion yang dapat menunjukkan kemungkinan adanya anion-anion pengotor lain. Karena itu konsentrasi ion klorida dalam air pendingin primer Reaktor Triga 2000 perlu dibatasi dan diakomodasi nilai batasnya bersama dengan persyaratan yang telah tercantum di dalam LAK. Perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk menentukan nilai batas tersebut dengan memperhitungkan beberapa faktor di antaranya kondisi operasi reaktor dan perkiraan umur operasinya.

DAFTAR PUSTAKA

1. K.R. TRETHERWEY and J. CHAMBERLAIN, *Korosi Untuk Mahasiswa Sains dan Reka-yasawan*, Terjemahan oleh Alex Tri Kantjono Widodo, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1991.
2. FRANK N. KEMMER and JOHN McCALLION (Nalco Chemical Company), *The NALCO Water Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York.
3. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Safety Analysis Report Rev. 8, Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy*, BATAN, Vol. 2 Copy No. 5, March 1999.
4. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Laporan Pendahuluan Analisis Keselamatan Peningkatan Daya Reaktor Triga Mark II Bandung 2000 kW*, Pusat Penelitian Teknik Nuklir, Bandung, Februari 1999.
5. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini*, Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta, Yogyakarta, 1996.
6. GOSTA WRANGLÉN, *An Introduction To Corrosion And Protection Of Metals*, Departement Of Electrochemistry And Corrosion Science, Royal Institute Of Technology Stockholm, Sweden, First Published, 1985.
7. SUMIJANTO, *Studi Pengaruh Ion Cl dan Cu Terhadap Integritas Tangki Reaktor Kartini*, Presentasi Ilmiah, P3TM Yogyakarta.