

KAJIAN TERHADAP PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA PWSCC KOMPONEN BEJANA TEKAN REAKTOR PWR

Sofia L. Butarbutar, Geni Rina Sunaryo dan Febrianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email: sofia.butarbutar@yahoo.com

ABSTRAK

KAJIAN TERHADAP PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA PWSCC KOMPONEN BEJANA TEKAN REAKTOR PWR. Bejana tekan reaktor ditempatkan pada peringkat tertinggi dalam hal keselamatan karena berperan sebagai penghalang lepasnya produk fisi, sehingga perlu dijaga integritas strukturnya. Salah satu jenis degradasi yang dapat mengancam keandalannya adalah Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC). Salah satu metoda yang dilakukan untuk menekan PWSCC adalah dengan mengendalikan pendingin primer, dengan cara menginjeksikan hidrogen yang bertujuan untuk menekan salah satu produk radiolisis yang dapat menyebabkan Electrochemical Corrosion Potential (ECP) meningkat serta memitigasi inisiasi dan laju pertumbuhan PWSCC. Jumlah penginjeksian hidrogen ke dalam pendingin reaktor saat ini adalah 25-50 cc/kg. Tetapi penambahan hidrogen ini juga mengakibatkan meningkatnya paparan radiasi. Metode yang digunakan dalam penulisan makalah ini adalah kajian dari 5 literatur. Diketahui bahwa hidrogen diinjeksikan ke dalam pendingin primer untuk menekan produk radiolisis dan dengan cara demikian mengendalikan jumlah dissolved oxygen. Dengan berkurangnya konsentrasi oksigen dalam air pendingin maka nilai ECP juga akan menurun, hal ini dikarenakan semakin sedikitnya produk radiolisis yang terbentuk. Penginjeksian hidrogen dalam jumlah kecil dapat memperlama waktu inisiasi retak. Meskipun penambahan hidrogen sukses dalam menurunkan laju korosi, namun memberikan efek samping dengan meningkatnya paparan radiasi. Peningkatan ini disebabkan perubahan bentuk oksida dari Fe_2O_3 (hematit) menjadi Fe_3O_4 (magnetit) akibat penambahan hidrogen. Salah satu metode untuk menurunkan laju paparan radiasi dan korosi adalah Injeksi Zinc, seperti yang telah diterapkan di reaktor BWR. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk memahami efektivitas injeksi zinc dalam menurunkan laju paparan radiasi dan korosi yang disebabkan oleh injeksi hidrogen pada reaktor PWR.

Kata kunci: hidrogen, PWSCC, PWR, ECP

ABSTRACT

ASSESSMENT OF HYDROGEN INJECTION EFFECT ON PWSCC OF PWR PRESSURE VESSEL COMPONENT. Reactor pressure vessel placed on the first rank regarding on safety due to its role as a fission product release confinement, so it need to focus at integrity of the structure. Kind of degradation that can affect its reliability is Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC). One of method which can be applicated to supress PWSCC is to control primary cooling water by injecting hydrogen in order to suppress one of radiolysis product which can increasing Electrochemical Corrosion Potential (ECP) and also mitigating PWSCC initiation and growth. The level of hydrogen that injected to the primary water for now on is 25-50 cc/kg. But the hydrogen injection also resulting radiation exposure increasing. The method in this paper is assessing 5 literature. It is known that hydrogen injected to the primary water in order to suppress radiolysis product, thereby control the dissolved oxygen level. Decreasing of oxygen level on the primary water resulting ECP decreasing, this is because fewless radiolysis product formed. It is known that low level hydrogen delay crack initiation. Hydrogen injection is success on decreasing corrosion rate, but contribute on side effect due to increasing of radiation exposure. This increasing resulted due to changing of oxyde Fe_2O_3 (hematite) into Fe_3O_4 (magnetite) with hydrogen injection. Method which can be applied to decrease the radiation exposure and minimize corrosion is Zinc Injection, as have been applied in BWR. That is why it need to know more about the efectivity of zinc injection to decrease the dose rate and minimize corrosion on PWR as a side effect of hydrogen injection.

Key words: hydrogen, PWSCC, PWR, ECP

PENDAHULUAN

Bejana tekan reaktor PWR merupakan komponen *pressure boundary* yang paling penting terkait perannya dalam memainkan fungsi

keselamatan, yakni sebagai penghalang lepasnya produk fisi. Oleh karena itu perlu dijaga integritas struktur materialnya sehingga diharapkan dapat dioperasikan sesuai dengan umur disainnya. ^[1]

Pada disain PWR Amerika dan Eropa, Alloy 600 digunakan sebagai material komponen bejana tekan. Alloy 600 merupakan paduan dengan kandungan nikel tinggi yang memberikan ketahanan yang baik terhadap korosi, akan tetapi telah ditemukan bahwa komponen-komponen tersebut di atas rentan terhadap PWSCC, dikarenakan komponen tersebut terekspos oleh temperatur tinggi. Penyebab tersebut dapat dipahami karena bejana tekan reaktor tersebut dikondisikan beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi. PWSCC merupakan suatu fenomena korosi pada paduan nikel, khususnya Alloy 600. Fenomena ini dapat terjadi apabila tiga aspek: tegangan tarik tinggi, lingkungan yang agresif, dan mikrostruktur yang rentan hadir secara bersamaan.^[2]

PWSCC dapat diminimasi atau ditekan dengan cara meminimasi salah satu aspek tersebut, yaitu lingkungan. Aspek lingkungan dalam hal ini adalah air yang digunakan sebagai pendingin primer pada reaktor tipe PWR harus dikendalikan karena berkaitan dengan masalah korosi. Salah satu metoda pengelolaan kimia air sisi primer yang dapat menekan PWSCC adalah penambahan hidrogen atau injeksi hidrogen. Hidrogen yang ditambahkan dapat menekan kandungan oksigen terlarut yang dapat menyebabkan *Electrochemical Corrosion Potential* (ECP) meningkat, dengan demikian dapat menekan proses korosi, sehingga integritas struktur material komponen dan keselamatan operasi reaktor tetap terjaga.^[3]

Makalah ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan hidrogen terhadap PWSCC dan terhadap penurunan nilai ECP, sehingga dapat diketahui penambahan hidrogen yang optimal dalam menekan korosi dan laju dosis pada PWR.

TINJAUAN PUSTAKA

PWSCC pada komponen bejana tekan reaktor

Paduan nikel digunakan sebagai material konstruksi pada PWR, dan semenjak dua puluh lima tahun terakhir mengalami PWSCC. Lokasi terjadinya PWSCC terdapat di *base metal of instrument nozzles, heater thermal sleeves, nozzle penetrations CRDM, pressurizer instrument penetrations* dan *hot leg penetrations*.^[4]

Paduan nikel tinggi seperti Alloy 600 rentan terhadap PWSCC^[5], apalagi material tersebut terekspos oleh air bertemperatur tinggi seperti yang terdapat di bejana tekan. Komposisi kimia dari Alloy 600 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Material Alloy 600^[6]

Unsur	Kadar
C	< 0,15%
Cr	14 – 17 %
Cu	< 0,5%
Fe	6-10%
Mn	<1%
Ni	>72%
Si	<0.5%
S	0,015%

PWSCC pada komponen alloy 600 dapat terjadi apabila secara simultan terdapat kehadiran kerentanan material, lingkungan yang agresif dan tegangan tarik yang tinggi. Dengan mengendalikan atau meminimasi salah satu dari aspek diatas dapat menekan terjadinya PWSCC. Inisiasi dan propagasi PWSCC itu sendiri sangat sensitif terhadap temperatur dan kerentanan material.

Kimia air primer reaktor PWR

Reaktor tipe PWR dan BWR sangatlah berbeda apabila ditinjau dari sistem pendingin. Sistem pendingin pada reaktor BWR hanya satu untai dimana air reaktor dibiarkan mendidih di teras reaktor dan produk radiasi akan terbawa keseluruhan sistem, sedangkan pada reaktor PWR pendingin terdiri dua untai sistem, sehingga produk radiasi akan terkungkung di sistem primer. Pada reaktor PWR produk yang teraktivasi tidak sampai terbawa ke sistem sekunder sehingga pada reaktor PWR fokus penanganan produk teraktivasi ini lebih banyak pada sisi pendingin primer, oleh karena itu penting untuk melakukan kontrol kimia air. Hal ini dikarenakan kimia air mempunyai peran yang penting dalam menentukan integritas komponen reaktor, kelongsong bahan bakar dan meminimalkan laju paparan radiasi.^[7]

Pendingin primer PWR dikendalikan secara kimia dengan penambahan asam borat, LiOH dan hidrogen. Boron ditambahkan sebagai *chemical shim* (kompensasi kimia) untuk mengendalikan neutron, dan lithium digunakan untuk mengendalikan pH sistem pada batas tertentu untuk menekan korosi material struktur. Pengaturan pH dilakukan dengan penambahan LiOH (lithium hidroksida) yang dikombinasikan dengan asam borat. Reaktor PWR direkomendasikan untuk dioperasikan pada rentang pH antara 6,9 dan 7,4 dengan konsentrasi lithium sekitar 2,2 – 3,5 ppm. Hidrogen ditambahkan untuk menekan pembentukan spesi pengoksida dari hasil radiolisis pendingin air.

Injeksi hidrogen

Sebagian besar PWR yang beroperasi sekarang ini menambahkan hidrogen ke dalam pendingin primer untuk mengendalikan korosi dan radiolisis, dan telah berhasil selama beberapa dekade.^[8] Metode ini bertujuan menekan produk radiolisis seperti hidrogen peroksida, yang merupakan pengoksidasi tinggi, yang dapat merusak bahan bakar dan material struktur.

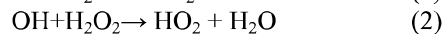
Jumlah hidrogen dispesifikasikan dalam panduan kimia air primer PWR sekitar 25–35 cm³ hidrogen per kg air. Level hidrogen yang lebih rendah dipercaya cukup untuk menekan produk pengoksidasi dalam air primer PWRs. Hidrogen sebagai parameter kimia sirkuit primer mempunyai pengaruh yang paling besar terhadap retak.

Pengoptimasian konsentrasi hidrogen seperti halnya pengendalian pH, merupakan suatu pendekatan yang menjanjikan dalam memelihara keandalan PLTN terhadap *aging* karena sangat bermanfaat terhadap integritas material. Terdapat perbedaan pada beberapa negara dalam hal penambahan hidrogen ke dalam air pendingin reaktor, Amerika menetapkan rentang penambahan hidrogen sebesar 25-50 cc/kg, Rusia sebesar 30-60 cc/kg, dan Jepang sebesar 25-35 cc/kg.^[9]

Radiolisis air

Air merupakan lingkungan yang agresif terhadap logam. Oleh karena reaktor dioperasikan pada temperatur dan tekanan tinggi, sehingga produk radiolisis banyak terjadi seperti O₂ dan H₂O₂ akibatnya air reaktor bersifat oksidatif, sebagai akibat penyerapan energi radiasi oleh molekul air. Dari adanya produk-produk radikal ini, terutama dengan adanya ion oksigen, menjadi pemicu adanya proses korosi pada material di pendingin ataupun di teras.

Dalam radiolisis pendingin, reaksi penting sebagai berikut, sangat dipengaruhi oleh temperatur.^[10]



Pada reaksi (1) penambahan hidrogen mendorong rekombinasi oksigen yang dihasilkan oleh radiolisis air, sedangkan reaksi (2) merupakan dekomposisi pendingin. Dalam pendingin PWR, jumlah H₂ yang cukup, mampu menekan konsentrasi O₂, yaitu dengan cara mengikat oksigen menjadi H₂O sehingga dapat mencegah masalah terkait korosi. Ketidakhadiran oksigen oleh karena penambahan hidrogen dan rekombinasi radiolitik bertujuan untuk mencegah berbagai masalah korosi.

Electrochemical Corrosion Potential (ECP)

ECP adalah pengukuran reaksi oksidasi reduksi (redoks) yang terjadi pada permukaan logam. Reaksi ini bergantung secara langsung pada konsentrasi oksigen, hidrogen, dan hidrogen peroksida dalam air. Pengukuran ECP dibuat untuk menentukan bilamana propagasi SCC akan terjadi. Pada prakteknya, jika ECP menurun di bawah - 230 mVSHE, laju pertumbuhan tidak signifikan. Apabila di atas - 230 mVSHE, laju pertumbuhan retak meningkat seiring meningkatnya ECP.^[11]

METODOLOGI

Pada makalah ini telah dilakukan kajian pustaka dari lima literatur. Literatur tersebut diperoleh melalui buku dan internet.

PEMBAHASAN

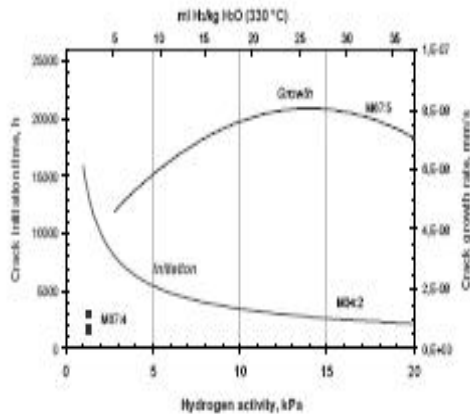
Pengaruh hidrogen terhadap ECP

Radiolisis air yang melewati teras reaktor menghasilkan konsentrasi spesi radikal bebas dalam jumlah besar seperti H₂, O₂, H₂O₂. Terbentuknya produk radiolisis tersebut dapat meningkatkan potensial elektro kimia sampai beberapa ratus milivolt, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai ECP bergantung pada konsentrasi radikal bebas yang terbentuk. Nilai ECP harus dijaga serendah mungkin, dengan cara mencegah kehadiran spesi pengoksidasi. Untuk menekan terbentuknya spesi pengoksida ini, berbagai negara telah menggunakan metode injeksi hidrogen ke dalam air pendingin reaktor. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui optimasi penambahan hidrogen ke dalam air pendingin. Konsentrasi hidrogen yang rendah sekitar < 5cc/kg sudah dapat menekan radiolisis atau sebagai penangkap oksigen dan spesi pengoksidasi lainnya, pernyataan ini dapat dilihat pada Gambar 3. Pada konsentrasi 5 cc/kg hidrogen, kecepatan pertumbuhan retak semakin meningkat, sampai pada konsentrasi di atas 35 cc/kg mulai melambat. Sedangkan untuk inisiasi retak, hidrogen pada konsentrasi < 5 cc/kg akan memperlama waktu terjadinya awal retak.

Pengaruh hidrogen terhadap PWSCC

Tujuan penambahan hidrogen adalah untuk memitigasi PWSCC dan mencegah laju pertumbuhan retak. Penambahan konsentrasi hidrogen ke dalam pendingin primer dapat menurunkan waktu inisiasi PWSCC, seperti terlihat pada Gambar 1. Penambahan hidrogen mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap inisiasi dan pertumbuhan retak. Berdasarkan pemahaman dari Gambar 1. waktu inisiasi retak

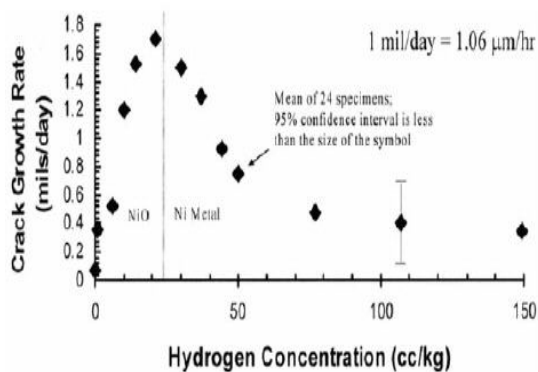
semakin berkurang secara kontinyu dengan bertambahnya jumlah hidrogen yang diinjeksikan, dengan kata lain bahwa hidrogen dalam jumlah banyak dapat mempercepat terjadinya retak. Sementara itu, pertumbuhan retak mencapai maksimum pada konsentrasi hidrogen sekitar 25 ml/kg dan selanjutnya kecepatan pertumbuhan retak berkurang.



Gambar 1. Hubungan inisiasi retak terhadap konsentrasi hidrogen [12].

Meskipun aplikasi penambahan konsentrasi hidrogen pada PWR sekitar 25 sampai 50 cc/kg, akan tetapi dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa penambahan sekitar 5 cc/kg dapat memperlama waktu inisiasi dan mencegah pertumbuhan retak. Selain itu seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa reaksi radiolisis sudah dapat ditekan dengan menambahkan hidrogen sebanyak 5 cc/kg.

Pengaruh hidrogen pada pertumbuhan retak akan maksimum di sekitar pita kesetimbangan Ni/NiO seperti tampak pada Gambar 2. puncak pertumbuhan retak berada pada konsentrasi hidrogen sebesar 25 cc/kg. Selanjutnya pertumbuhan akan melambat sampai pada konsentrasi 50 cc/kg, dan terlihat relatif konstan pada konsentrasi > 50 cc/kg.

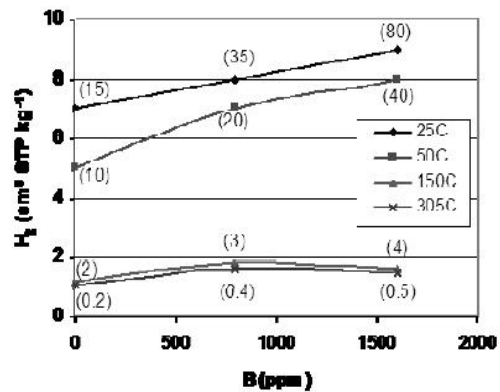


Gambar 2. Hubungan laju pertumbuhan retak terhadap konsentrasi hidrogen [9].

Optimasi konsentrasi hidrogen

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa hidrogen ditambahkan ke dalam pendingin primer untuk menekan radiolisis dan dengan cara demikian mengendalikan jumlah oksigen terlarut, yang mana sangat penting untuk meminimasi korosi material struktur. Secara garis besar jumlah injeksi hidrogen ke dalam air pendingin diharapkan rendah. [13] Karena dengan konsentrasi yang rendah maka kelarutan nikel bertambah, sehingga dapat mengurangi Ni dan dengan demikian mengurangi generasi Co-58 yang merupakan hasil aktivasi Ni. Karena apabila kelarutan nikel berkurang berarti akan meningkatkan laju korosi paduan nikel dan berakibat pada kenaikan deposit bahan bakar, akan mempengaruhi laju dosis pada plant.

Seperti telah disinggung pada teori bahwa pendingin primer PWR dikendalikan secara kimia dengan penambahan asam borat, LiOH dan hidrogen, maka hubungan ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan pengaruh hidrogen pada inisiasi dan propagasi PWSCC pada Alloy 600MA [11]

Injeksi hidrogen ke dalam pendingin sangat bergantung secara signifikan pada temperatur, hal ini dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur (sebagai fungsi kandungan boron) maka jumlah hidrogen yang dibutuhkan semakin rendah. Pada temperatur mendekati temperatur operasi, hidrogen yang dibutuhkan hanya sekitar < 2 cc/kg. Pada gambar tersebut, jumlah hidrogen secara signifikan berkurang dengan semakin tingginya temperatur dan hanya berubah sedikit terhadap kenaikan boron yang signifikan.

Optimasi level DH oleh karena itu menjadi suatu ukuran penting untuk mengendalikan laju dosis pada PWRs, dan tambahan ukuran kendali lain seperti optimasi pH. Karena apabila tidak ditentukan konsentrasi yang tepat maka penambahan hidrogen hanya akan sukses dalam menurunkan laju korosi, namun akan memberikan

efek samping dengan meningkatnya paparan radiasi. Peningkatan paparan radiasi ini disebabkan karena perubahan bentuk oksida dari Fe_2O_3 (hematit) menjadi Fe_3O_4 (magnetit) dengan penambahan hidrogen. Salah satu metode untuk menurunkan laju paparan radiasi dan korosi adalah injeksi zinc, seperti yang telah diterapkan di reaktor BWR. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk memahami efektivitas injeksi zinc dalam menurunkan laju paparan radiasi dan korosi yang disebabkan oleh injeksi hidrogen pada reaktor tipe PWR.^[14]

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam kimia air pendingin reaktor PWR, optimasi penambahan hidrogen merupakan salah satu parameter penting selain pengendalian pH. Penambahan hidrogen sekitar 25 – 50 cc/kg merupakan suatu upaya pengendalian dari sisi aspek lingkungan yang dapat secara langsung menekan terjadinya PWSCC.^[7,12]

Penambahan hidrogen dapat menekan produk radiolisis yang terbentuk oleh karena air berada pada lingkungan ber temperatur tinggi. Konsentrasi hidrogen yang rendah sekitar < 5cc/kg sudah dapat menekan radiolisis atau sebagai penangkap oksigen dan spesi pengoksidasi lainnya, selain itu dapat memperlama waktu inisiasi dan mencegah pertumbuhan retak.

Konsentrasi hidrogen harus dijaga pada level yang rendah, karena dengan konsentrasi yang rendah maka kelarutan nikel bertambah, sehingga dapat mengurangi Ni dan dengan demikian mengurangi generasi Co-58 yang merupakan hasil aktivasi Ni. Karena apabila kelarutan nikel berkurang berarti akan meningkatkan laju korosi paduan nikel dan berakibat pada kenaikan deposit bahan bakar, akan mempengaruhi laju dosis pada plant.

Meskipun penambahan hidrogen sukses dalam menurunkan laju korosi, namun memberikan efek samping dengan meningkatnya paparan radiasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk memahami efektivitas injeksi zinc dalam menurunkan laju paparan radiasi dan korosi yang disebabkan oleh injeksi hidrogen pada reaktor tipe PWR.^[14]

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA-TECDOC-1120, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety:
2. PWR pressure vessels, IAEA VIENNA 1999
3. SHAH, V.N., WARE, A.G., PORTER, A.M., Assessment of Pressurized Water Reactor Control Rod Drive Mechanism

- Nozzle Cracking, Rep. NUREG/CR-6245, USNRC, Washington, DC (1994).
4. A. Molander: Radiolysis studies at Studsvik
5. concerning influence of DH in PWR environment. International Workshop on Optimization of Dissolved Hydrogen Content in PWR Primary Coolant. Tohoku University, Sendai, Japan, July, (2007).
6. USNRC, Crack Growth Rates and Metallographic Examinations of Alloy 600 and Alloy 82/182 from Field Components and Laboratory Materials Tested in PWR Environments
7. Young Sik Kim, In Gyu Park, Power Engineering Research Institute, The Role Of Microstructural Variables in Primary Water Stress Corrosion Cracking of Inconel 600
8. Matweb, Special Metal of Inconel 600
9. KFC05Sr02_Primary Coolant Chemistry.doc r10 5/26/2004 "Chapter 5 Primary Coolant Chemistry"
10. HSE Nuclear Directorate, Step 3 Reactor Chemistry Assessment Of The Westinghouse AP1000 Division 6 Assessment Report No. AR 09/035
11. Technical Update EPRI, Assessment of the Effect of Elevated Reactor Coolant Hydrogen on the Performance of PWR Zr-Based Alloys, December 2006
12. Alaleh Pakravan, Materials Science and Engineering University of Toronto, Stress Corrosion Crack Nucleation in Alloy 600 and the Effect of Surface Modification
13. Anders Molander, Electrochemical Measurements in Nuclear Power Environments, Studsvik Nuclear AB, SE-61182 Nyköping, Sweden
14. Molander A, Jenssen A, Norring K, König M and Andersson P-O. Comparison of PWSCC initiation and crack growth data for Alloy 600. International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. Berlin, September 15 – 18, 2008.
15. Hideki TAKIGUCHI, et. al, Optimization of Dissolved Hydrogen Concentration for Control of Primary Coolant Radiolysis in Pressurized Water Reactors, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 41, No. 5, p. 601–609 (May 2004)
16. H. Kawamura et.al, The Effect of Zinc Addition to Simulated PWR Primary Water on the PWSCC Resistance, Crack Growth Rate and Surface Oxide Films Characteristics of Prefilmed Alloy 600, San. Diego Ca, CORROSION 98

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Selain hidrogen, apa saja yang dapat mempengaruhi PWSCC?

(Juni CH, PTNBR BATAN)

2. Bagaimana pengaruhnya terhadap kegetasan material akibat penambahan hidrogen?
3. Pada kadar berapa hidrogen agar kegetasan Alloy masih di toleransi?

(Rasito, PTNBR BATAN)

Jawaban :

1. LiOH, Zinc Injection, Asam Borat.
2. Karena banyaknya hidrogen yang ditambahkan jumlahnya kecil < 5 cc/kg sehingga belum terjadi kegetasan material.
3. Penggetasan hidrogen akan terjadi apabila konsentrasi hidrogen tinggi, namun tidak hanya kandungan hidrogen akan tetapi juga dipengaruhi oleh tegangan yang diaplikasikan serta komposisi dan mikrostruktur dari komponen tersebut.