

## MANAJEMEN PENUAAN INSTALASI PENYIMPANAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS

**Budiyono, Parjono**

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN  
budibtd@batan.go.id

### ABSTRAK

**MANAJEMEN PENUAAN INSTALASI PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS.** Instalasi penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas merupakan salah satu jenis Instalasi Nuklir Nonreaktor. Instalasi ini dilengkapi dengan fasilitas keselamatan berupa struktur, sistem dan komponen (SSK). SSK yang penting untuk keselamatan dapat mengalami degradasi akibat penuaan. Oleh karena itu dibutuhkan suatu kegiatan manajemen yang efektif untuk mempertahankan fungsi dan umur layanannya. Kegiatan bertujuan untuk menentukan strategi dan implementasi manajemen penuaan dalam meminimalkan degradasi material SSK kritis. Metode yang digunakan adalah studi literatur, penyusunan program, dan implementasi kegiatan. Kegiatan manajemen penuaan telah menghasilkan dokumen program manajemen penuaan yang memuat tentang struktur organisasi, metode pengumpulan data, penapisan SSK, identifikasi penuaan, strategi manajemen penuaan, surveilan penuaan dan evaluasi. Program manajemen penuaan telah diimplementasikan di instalasi KH-IPSB3. Penapisan SSK telah menentukan bahwa *liner* kolam yang terbuat dari material SS 304 sebagai SSK kritis. Data laju korosi material SS 304 dalam lingkungan air kolam penyimpanan adalah 0,002 mpy. Jika ditinjau berdasarkan waktu sejak mulai beroperasi hingga saat ini maka, *liner* kolam penyimpanan BBNB yang merupakan SSK kritis masih mempunyai ketebalan 2,999 mm. Artinya ketebalan *liner* kolam masih 99,96% dari tebal awal. Apabila perhitungan prosentase sisa ketebalan *liner* menggunakan nilai 99,9%, berarti masih dibutuhkan waktu selama 40 tahun untuk mencapai ketebalan sisa tersebut. Kata kunci: Penuaan, struktur sistem dan komponen, korosi

### ABSTRACT

**AGING MANAGEMENT OF INTERIM STORAGE FOR SPENT FUEL.** *Interim storage for spent fuel is one type of nonreactor nuclear installation. This installation is equipped with safety facilities in the form of structures, systems and components (SSCs). SSCs that are important for safety can be degraded by aging. Therefore, an effective management activity is required to maintain the function and service life. The activity objective is to determine strategy and implementation of aging management in minimizing critical material SSK degradation. The method for this study is literature study, program preparation, and implementation of activities. Aging management activities have produced aging management program documents that include organizational structure, data collection methods, SSK screening, aging identification, aging management strategies, aging surveillance and evaluation. The aging management program has been implemented in ISFSF installations. SSK filtering has determined that a pool liner made of SS 304 material as a critical SSK. The data of corrosion rate of SS 304 material in the water environment of storage pool is 0.002 mpy. If reviewed based on the time since it started to operate until now, the liner storage pool for spent fuel which is a critical SSK still has a thickness of 2,999 mm. This means that the thickness of the pool liner is still 99.96% of the initial thickness. If the calculation of the remaining percentage of liner thickness using the value of 99.9%, it still takes 40 years to reach the remaining thickness.*

*Keywords: Aging, structure system and components, corrosion*

### PENDAHULUAN

Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3) merupakan salah satu jenis Instalasi Nuklir Nonreaktor. KH-IPSB3 berfungsi menyimpan sementara bahan bakar nuklir bekas, menyimpan material teriradiasi, melayani pemindahan material teriradiasi dan melayani penyiapan kegiatan re-ekspor bahan bakar bekas. Karakteristik utama KH-IPSB3 adalah adanya kanal hubung dan kolam penyimpanan yang berisi air. Kanal hubung tersebut menghubungkan tiga instalasi penting yaitu Instalasi Radiometalurgi (IRM), Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) dan Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG GAS) yang berfungsi sebagai jalur pemindahan BBNB dan material teriradiasi lainnya. Kolam penyimpanan berfungsi untuk menyimpan sementara BBNB dan material teriradiasi. Kapasitas kolam penyimpanan adalah 1458 bundel BBNB [1].

Untuk melayani tugas dan fungsinya, KHIPSB3 dilengkapi dengan fasilitas struktur, sistem dan komponen (SSK). Struktur sistem dan komponen KHIPSB3 adalah semua elemen yang memberi kontribusi pada proteksi dan keselamatan instalasi. SSK yang penting untuk keselamatan dapat mengalami perubahan fisik akibat penuaan sehingga mempengaruhi fungsi keselamatan dan umur layanannya. SSK yang sangat diperhatikan adalah SSK kritis, yaitu terdiri dari peralatan yang penting untuk keselamatan dan rentan terhadap penuaan tetapi tidak redundan, tidak mudah diperbaiki atau tidak mudah diganti. Selama operasi KHIPSB3, aspek-aspek penuaan yang mempengaruhi SSK kritis harus dikelola dengan baik.

Penuaan adalah proses perubahan karakteristik SSK sebagai fungsi waktu dan/atau akibat pemanfaatan pada kondisi operasi yang menyebabkan degradasi material. Salah satu perubahan fisik yang terjadi sebagai fungsi waktu pada suatu instalasi nuklir adalah penuaan (*aging*) fisik pada segenap komponen dan peralatan yang ada di instalasi. Penuaan dapat menurunkan tingkat ketersediaan (*availability*) dan kehandalan (*reliability*) SSK sehingga akan mempengaruhi kinerja pengoperasian instalasi secara keseluruhan. Jika penuaan terjadi pada SSK yang terkait dengan fungsi keselamatan maka akan membahayakan aspek keselamatan pekerja instalasi, masyarakat serta lingkungan di sekitar instalasi.

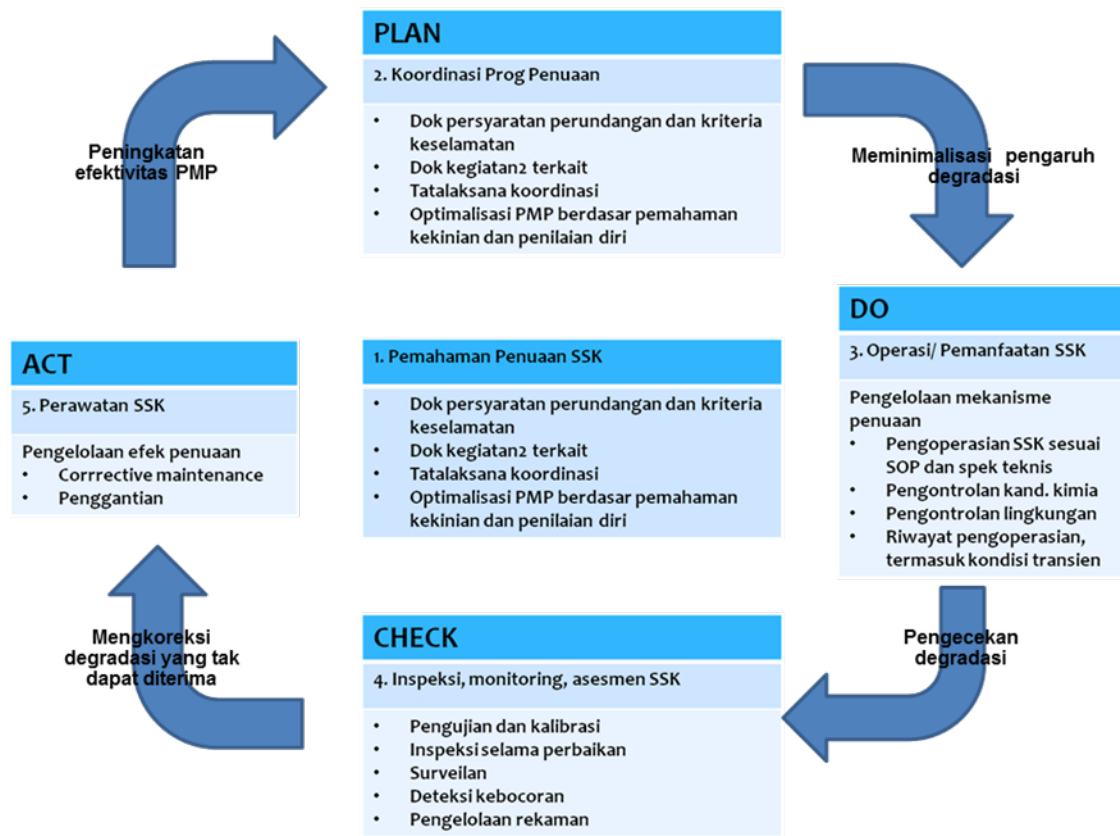
Kebolehjadian sebuah SSK mengalami kegagalan yang disebabkan oleh degradasi penuaan biasanya akan meningkat bersamaan dengan lamanya (waktu) sistem terkena kondisi operasi, kecuali jika dilakukan tindakan pencegahan. Penentuan dan penerapan tindakan perlawanan pencegahan perlu dilakukan, termasuk didalamnya adalah aktivitas seperti proteksi, perbaikan, pemolesan dan penggantian. Manajemen penuaan membutuhkan metodologi untuk mendeteksi dan mengevaluasi kekuarangan/kelemahan yang dihasilkan oleh kondisi operasi dan menindaklanjuti dengan tindakan perlawanan untuk mencegah dan memitigasi kekurangan/kelemahan. Salah satu pendekatan terhadap metodologi ini adalah penetapan bahwa SSK dapat melakukan fungsi keselamatannya selama operasi dan dalam kondisi lingkungan operasi. Hal ini dapat dicapai dengan melakukan pemilihan secara tepat terhadap SSK yang menjadi subyek dari aktivitas pengamatan dan memasukkannya dalam sebuah kegiatan deteksi penuaan jangka panjang, melalui pengumpulan data dan evaluasi terhadap efek potensial dari penuaan. Kegiatan ini akan disertai dengan tindakan perlawanan untuk pencegahan dan mitigasi terhadap efek penuaan dalam rangka meyakinkan akan tercukupinya suatu tingkat keselamatan dalam fasilitas.

Program Manajemen Penuaan disusun untuk merencanakan dan melaksanakan upaya-upaya yang secara sistematis dan memadai dalam mengelola efek penuaan terhadap SSK. Khususnya SSK yang penting untuk keselamatan namun rentan terhadap penuaan. Manajemen penuaan dilakukan agar pengaruh penuaan terhadap SSK kritis masih dalam batas yang dapat diterima. Manajemen penuaan KHIPSB3 melingkupi kegiatan penapisan SSK, identifikasi penuaan, surveilan penuaan, strategi manajemen penuaan, pengumpulan data, dan evaluasi penuaan.

Makalah ini memaparkan tentang kegiatan manajemen penuaan KHIPSB3 selama diperoleh ijin operasi dari Bapeten. Kegiatan bertujuan untuk menentukan strategi dan implementasi manajemen penuaan dalam meminimalkan degradasi material SSK kritis karena pengaruh penuaan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Sejak penuaan mulai mempengaruhi kondisi keselamatan umum dari fasilitas, maka diperlukan suatu upaya penanggulangan. Untuk mencapai manajemen penuaan yang efektif diperlukan suatu pendekatan yang sistematis yang dapat memberikan kerangka kerja dalam mengkoordinasikan semua program dan kegiatan yang terkait. Pendekatan yang sistematis dapat diperoleh dengan mengadaptasi siklus Deming [*PLAN-DO-CHECK-ACT*] ke dalam manajemen penuaan SSK. Siklus pendekatan manajemen penuaan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. PDCA pelaksanaan Program Penuaan) [2]

**Pemahaman Penuaan SSK**

Pemahaman terhadap penuaan yang terjadi pada SSK harus dilakukan. Pemahaman ini merupakan kunci dari suatu manajemen penuaan yang efektif. Dasar desain, fungsi keselamatan yang hendak dicapai, *stressor*, mekanisme penuaan, dan dampak dari penuaan harus dipahami secara mendalam. Efek penuaan yang diakibatkan oleh beberapa kondisi operasi juga harus lebih dipahami. Jika kondisi atau mekanisme muncul secara bersamaan maka proses penuaan dapat terjadi lebih cepat.

Degradasi material dapat disebabkan oleh faktor radiasi, temperatur, tekanan, *cycling*, korosi dan erosi. Secara umum pengaruh radiasi terhadap logam adalah peningkatan *yield* dan *ultimate strength* yang menurunkan kekuatannya. Semua material dari bahan organik dan gelas sangat sensitif terhadap radiasi, oleh karena itu secara selektif harus dipantau terus selama dalam penggunaan. Temperatur di atas 60°C dapat menyebabkan degradasi beton karena dehidrasi yang menyebabkan kerusakan integritas dan efektivitas perisai. Peningkatan temperatur pada beberapa bahan polimer akan menghasilkan pengerasan atau penurunan kekuatan tarik dan elastisitas, walaupun temperatur yang dimaksud dalam rentang operasional. Vibrasi dan perulangan perubahan tekanan, aliran atau temperatur akan meningkatkan tekanan beban yang dapat menyebabkan keretakan pada material dan pada umumnya menimbulkan patah atau kerusakan *fatigue*. Vibrasi dapat menyebabkan degradasi pada komponen elektronik dan instrumentasi. Vibrasi pada sambungan dan *seal* adalah suatu faktor serius yang mengancam integritas. Pergeseran posisi dan lokasi adalah suatu fenomena umum yang disebabkan oleh vibrasi. Pergeseran relatif secara berulang di antara bagian yang berdekatan akan menimbulkan gesekan dan kelelahan. Korosi akan menimbulkan kerugian pada material melalui degradasi permukaan dan penurunan kekuatan. Korosi menyebabkan penurunan kekuatan melalui pengembangan keretakan. Efek lain dari korosi adalah deposisi partikel pada daerah rentan yang menimbulkan ketidaknormalan fungsi dari suatu komponen. Kondisi operasi seperti aliran fluida berkecepatan tinggi dapat menyebabkan erosi atau pengikisan peralatan Erosi akan menghasilkan kemerosotan permukaan dan menurunkan kekuatan. Efek penuaan pada beberapa kondisi operasi ditunjukkan pada Tabel 1. Efek penuaan untuk kejadian operasi terantisipasi ditunjukkan pada Tabel 2. Efek penuaan untuk beberapa lingkungan kondisi operasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Efek Penuaan pada Beberapa Kondisi Operasi [3]

Kondisi	Mekanisme penuaan	Konsekuensi/ Kegagalan
Radiasi	Perubahan sifat	- Dekomposisi kimia - Perubahan kekuatan - Perubahan duktilitas - Perubahan warna - <i>Swelling</i> - Perubahan resistivitas - Derajat bakar
Temperatur	Perubahan sifat	- Perubahan kekuatan - Perubahan resistivitas - Perubahan duktilitas - Perubahan warna
Tekanan	<i>Creep</i>	- Perubahan bentuk (mis. Patah, runtuh)
Perubahan berulang, aliran dan/atau beban, vibrasi karena aliran	Gerakan	- Pergeseran - Perubahan posisi dan kedudukan letak - Sambungan kendur
	<i>Fatigue</i>	- Patah, runtuh - Perubahan bentuk
	Kelelahan	- Kemerostan permukaan
Aliran	Erosi	- Perubahan kekuatan
Kimia cair	Korosi/ sel galvanis	- Pembebasan material radioaktif - Perubahan kekuatan - Perubahan posisi partikel - Hubung singkat - kebocoran

Tabel 2. Efek penuaan untuk kejadian operasi terantisipasi [3]

Kondisi	Mekanisme penuaan	Konsekuensi/ Kegagalan
Ekskursi daya	Kerusakan thermal dan mekanis	- kemerostan sistem - percepatan penuaan
Banjir	Deposisi dan kontaminasi	- korosi
Kebakaran	Panas, asap, gas reaktif	- penurunan kekuatan korosi

Tabel 3. Efek penuaan untuk beberapa lingkungan kondisi operasi [3]

Kondisi	Mekanisme penuaan	Konsekuensi/ Kegagalan
Kelembaban, salinitas	Korosi/ sel galvanis	- kebocoran - pembebasan material radioaktif - penurunan kekuatan - deposisi partikel - hubung singkat
Agen kimia	Reaksi kimia	- produk kimia tak diinginkan - kemerostan struktur
Angin, debu, pasir	Erosi dan deposisi	- perubahan kekuatan - kemerostan kekuatan - kegagalan fungsi komponen

### Kordinasi Program Manajemen Penuaan

Optimalisasi program manajemen penuaan SSK dengan cara koordinasi, integrasi, dan modifikasi program dan kegiatan terkait manajemen penuaan perlu dilakukan. Beberapa kegiatan lainnya adalah mendokumentasikan regulasi pengawasan dan kriteria keselamatan, mendokumentasikan kegiatan-kegiatan yang relevan, menjelaskan mekanisme koordinasi, dan meningkatkan efektivitas manajemen penuaan berdasarkan pemahaman terkini.

Sejak penuaan mulai mempengaruhi kondisi keselamatan umum fasilitas, diperlukan suatu pendeteksian dan pengkajian tentang pengaruh komponen yang menua terhadap keselamatan. Suatu

program untuk deteksi efek penuaan dilaksanakan secara teratur dalam rangka kegiatan manajemen penuaan. Program didasarkan pada informasi data desain, perawatan dan pengujian periodik dari komponen dan sistem. Insiden dan kegagalan aktual dijadikan sebagai suatu faktor yang diperhitungkan dalam program, dan selain itu juga dilakukan estimasi dari umur sisa operasi/pelayanan dari komponen yang ada. Program penuaan juga memuat metode untuk seleksi dan katagorisasi komponen yang akan menua, aktivitas pemeriksaan (*surveillance*), metode pengumpulan data dan metode lebih lanjut untuk evaluasi efek-efek penuaan. Pengkajian efek penuaan sangat bergantung pada kegiatan pengumpulan, penyimpanan dan evaluasi data, oleh karena itu perhatian harus dicurahkan untuk hal-hal terkait dengan kegiatan ini.

Program deteksi penuaan mempunyai daftar SSK instalasi dan analisis kemungkinan penuaannya. Seleksi dan katagorisasi dari perangkat yang akan mengalami proses penuaan dilakukan selama proses perancangan. Material dan perangkat diseleksi untuk meminimasi efek penuaan. Proses seleksi meliputi identifikasi terhadap kondisi operasi khusus; keterkaitan dengan keselamatan; material pembuat; mode operasi yang dibutuhkan; persyaratan pengujian; persyaratan perawatan; perkiraan umur operasi termasuk estimasi penggunaan pra pelayanan; dan kemudahan pengantiannya.

Katagorisasi SSK yang diperkirakan akan mengalami penuaan harus dilakukan berdasarkan beberapa faktor keterkaitan, yaitu keselamatan, kemudahan diperbaiki atau diganti. Perangkat yang mempunyai faktor keterkaitan/kepentingan utama, tidak mempunyai redudansi, tidak mudah diperbaiki atau diganti sebagai katagori 1. Perangkat yang mempunyai faktor keterkaitan utama, tetapi memiliki redudansi, mudah di periksa atau mudah diganti sebagai katagori 2. Perangkat yang tidak mempunyai keterkaitan yang utama tetapi tidak mudah untuk diperiksa atau diperbaiki sebagai katagori 3. Perangkat selain katagori 1, 2 dan 3 disebut dengan katagori 4.

### **Operasi/ Pemanfaatan SSK**

Pengelolaan mekanisme dan efek-efek penuaan selama penggunaan SSK bertujuan untuk meminimalkan degradasi. Beberapa unsur kegiatan yang penting dilakukan adalah penggunaan prosedur operasi dan Batas Kondisi Operasi yang benar, pengendalian kondisi kimia, dan pengendalian kondisi lingkungan. Penyebab utama fenomena penuaan kebanyakan timbul dari kondisi operasi, yang mendukung aktuasi mekanisme penuaan. Tingkat radiasi, temperatur dan tekanan pada kondisi operasi normal akan mempengaruhi sifat fisik dari suatu material. Perubahan berulang (*cycling*) dari temperatur dan tekanan akan mempercepat proses kemerosotan (*deterioration*). Kondisi lingkungan yang dimaksud adalah kondisi iklim seperti kelembaban, kebekuan dan angin, dan kondisi lokasi seperti salinitas, pasir, debu dan agen kimia. Efek dari kondisi ini secara umum adalah korosi, erosi atau reaksi kimia tidak dikehendaki terhadap perlengkapan yang terpapar oleh lingkungan tersebut.

### **Inspeksi, Monitoring, dan Asesmen SSK**

Inspeksi, pemantauan, dan pengkajian SSK bertujuan untuk mendeteksi, memantau, dan mengkaji efek-efek penuaan. Kegiatan yang dilakukan meliputi pengujian dan kalibrasi, *Pre-service and in-service inspection*, surveilan, deteksi kebocoran, dan pemantauan vibrasi. Aktivitas pemeriksaan penuaan adalah bagian dari program deteksi penuaan yang merupakan suatu program jangka panjang. Aktivitas pemeriksaan penuaan direncanakan secara konsisten dengan seleksi perangkat, proses katagorisasi dan kualifikasi komponen. Aktivitas juga mengambil pengalaman berharga dari program perawatan pencegahan dan pengujian periodik.

Bukti nyata adanya penuaan dapat timbul secara bertahap dan tiba-tiba. Oleh karena itu pengamatan dan inspeksi visual yang teliti dalam program inspeksi *in-service* periodik atau yang terjadual untuk semua komponen dan sistem dilaksanakan. Gejala yang timbul dari masalah penuaan adalah distorsi dimensi, permukaan atau material, kebocoran, retak dan perubahan warna. Efek penuaan dapat terdeteksi melalui adanya perubahan dari parameter terukur. Parameter-parameter tersebut secara periodik diukur secara konsisten, dan hasil pengukurannya dibandingkan dan dikaji. Parameter fisik seperti temperatur, tekanan, laju alir, tingkat radiasi, kualitas air adalah merupakan indikator dari kondisi SSK. Banyak efek penuaan yang tak dapat diukur secara langsung. Aktivitas yang terencana disiapkan untuk memfasilitasi kinerja teratur dari pengujian menyeluruh yang dibutuhkan. Pengujian digunakan untuk melihat adanya tanda kemerosotan (*deterioration*). Pengujian terjadual menghasilkan informasi seksama untuk mengkaji efek-efek penuaan. Uji tak merusak berguna untuk mengidentifikasi degradasi karena penuaan. Hasil pengujian, yang bergantung pada spesifikasi desain dan pengoperasian dari suatu fasilitas, di evaluasi untuk mendapatkan kecenderungan gejala yang dapat mengindikasikan adanya masalah penuaan.

### **Perawatan SSK**

Perawatan SSK bertujuan untuk mengelola efek-efek penuaan dan memitigasi degradasi yang terjadi. Metodenya adalah dengan *preventive maintenace*, *corrective maintenance*, manajemen suku cadang, dan penggantian. Hasil pengamatan dan pengujian dimanfaatkan untuk mengkaji adanya degradasi SSK dalam rangka melaksanakan tindakan pencegahan dan koreksi. Profil dan sifat penuaan dapat dikembangkan dari aktivitas ini, sehingga memungkinkan dilakukannya penggantian terhadap komponen yang menua sebelum terjadinya degradasi dan kegagalan terduga. Frekuensi pengamatan dan pengujian dioptimasi berdasarkan desain, data, dan rekomendasi pabrikan pembuatnya. Pengamatan terhadap material termasuk didalamnya uji kupon material dalam kondisi operasi normal. Kupon diambil dari tempatnya untuk kemudian diuji sehingga tidak mengganggu material komponen itu sendiri. Aktivitas pengamatan dan pengujian dievaluasi secara periodik bersamaan dengan analisis data yang telah terkumpul.

Komponen terkait keselamatan membutuhkan perhatian khusus untuk mencegah agar efek penuaan tidak menyebabkan kegagalan yang tak diinginkan. Dalam kasus tersebut, filosofi perawatan pencegahan adalah merupakan satu pendekatan yang harus diadops. Perawatan pencegahan dimanfaatkan untuk mendeteksi dan memitigasi degradasi dan kegagalan komponen, struktur dan sistem, didalamnya termasuk perbaikan, penggantian dan pembaharuan dengan pemolesan. Program perawatan pencegahan dijadualkan berdasarkan rekomendasi pabrikan, syarat garansi dan pengalaman operator fasilitas. Cara ini sangat sesuai untuk perangkat standar, dan optimasi waktu mungkin diperlukan pengalaman sejalan dengan perkembangan perangkat. Untuk komponen dan sistem yang terekspos langsung dengan lingkungan yang dapat mempercepat efek dari penuaan, informasi dari literatur dan pengalaman dari fasilitas yang lebih tua dapat digunakan untuk membuat suatu program perawatan pencegahan sesuai dengan laju kegagalan terprediksi. Program perawatan dievaluasi secara periodik bersamaan dengan analisis dari data yang terakumulasi. Evaluasi periodik terhadap data selalu dilakukan, Kesimpulan menyeluruh terhadap semua data yang tersedia dari suatu problem yang spesifik harus disiapkan. Semua faktor dipertimbangkan secara sistematis dalam rangka mengambil keputusan apakah sistem akan diperbaiki, diperbaharui atau diganti.

Gambar 1 memperlihatkan bahwa setelah tahap strategi manajemen penuaan yang ke 5 kemudian dilanjutkan kembali ke tahap 1 dalam rangka meningkatkan efektivitas program manajemen penuaan. Demikian seterusnya siklus pendekatan pelaksanaan manajemen penuaan tersebut berlangsung.

### **METODE**

Kegiatan manajemen penuaan ini menggunakan metode studi literatur, penyusunan program manajemen penuaan dan implementasi program. Studi literatur digunakan untuk menentukan strategi yang efektif dan terkini dalam penyusunan program manajemen penuaan. Program manajemen penuaan digunakan untuk panduan implementasi kegiatan di KH-IPSB3.

### **PEMBAHASAN**

#### **Program Manajemen Penuaan KH-IPSB3**

Sebagai bentuk strategi yang proaktif, manajemen penuaan SSK yang penting bagi keselamatan dilaksanakan pada seluruh tahapan instalasi. Tahapan suatu instalasi nuklir adalah mulai dari desain, fabrikasi dan konstruksi, komisioning, operasi, dan dekomisioning. Pada tahap operasi instalasi KH-IPSB3, manajemen penuaan dilakukan secara sistematis dengan menyusun program manajemen penuaan yang tepat. Penyusunan program telah mempertimbangkan kualifikasi personil untuk memahami konsep dasar manajemen penuaan selama operasi, perawatan, dan rekayasa. Unsur-unsur penting dalam manajemen penuaan KH-IPSB3 adalah pembentukan organisasi, pengumpulan data, penapisan SSK, identifikasi penuaan, penetapan strategi manajemen penuaan, implementasi program dan evaluasi [4]. Program manajemen penuaan KH-IPSB3 telah meningkatkan kesadaran, motivasi dan rasa memiliki SSK. Prosedur operasi, peralatan dan material digunakan secara benar. Jumlah dan kualifikasi untuk pekerjaan tertentu dapat terjamin kecukupannya. Penyimpanan suku cadang dilakukan secara benar untuk meminimalkan efek-efek penuaan. Komunikasi internal dan eksternal dilakukan secara efektif. *Database* riwayat kehandalan dan perawatan SSK digunakan secara baik. Penggunaan metode uji tak merusak dan pemantauan penuaan memadai dan terqualifikasi.

Metode pengumpulan data yang digunakan dalam manajemen penuaan KHIPS3 meliputi penelusuran data informasi spesifikasi teknis terkait SSK, data surveilan penuaan, data operasi, data perawatan, data perbaikan, dan penilaian keselamatan berkala. Data dan informasi yang diperlukan

sehubungan dengan manajemen penuaan diantaranya adalah data dasar SSK kritis. Berdasarkan dokumen desain, struktur kanal hubung dan kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas terdiri dari 4 lapis yaitu beton, *mild steel*, beton dan *liner*. Dinding bagian luar menggunakan beton bertulang setebal 1,7 m sedangkan dinding dalam setebal 0,295 m. Diantara kedua beton terdapat *mild steel* sebagai pengungku sekunder. Dinding beton bagian dalam kolam penyimpanan diberi *liner* dari bahan *stainless steel* 304 dengan ketebalan 3 mm. Sambungan antara lembaran *liner* menggunakan metode las [1].

Data riwayat operasi dan perawatan terkait SSK kritis adalah dilakukannya kegiatan re-eksport atau repatriasi bahan bakar nuklir bekas (BBNB). Kegiatan terkait repatriasi yang telah dilaksanakan di KHIPSB3 adalah pemindahan 42 bundel bahan bakar bekas dari RSG ke kolam KH-IPSB3 dilanjutkan dengan pemindahan bahan bakar bekas tersebut dari kolam ke *cask TN-MTR* pada tahun 2009. Pemindahan material teriradiasi dari PRSG ke INUKI melewati kanal hubung dilakukan rata-rata 3 - 4 kali sebulan dan sudah dilakukan sejak tahun 2009 hingga sekarang. Kegiatan perawatan yang dilakukan pada tahun 2008 adalah pengelasan titik-titik kebocoran *liner* kanal hubung dan kolam penyimpanan.

Dokumen Program Manajemen Penuaan KHIPSB3 telah menguraikan secara rinci tentang tahap penapisan untuk mendapatkan SSK kritis. Program sudah mencakup seluruh SSK kritis yang penting untuk keselamatan selama operasi KHIPSB3. Penentuan SSK kritis berdasarkan Perka Bapeten Nomor 7 tahun 2012 pasal 15 bahwa yang termasuk SSK kritis adalah SSK yang penting untuk keselamatan yang tidak redundan, tidak mudah diganti dan tidak mudah diperbaiki [4]. Dari hasil proses penapisan diperoleh kesimpulan bahwa SSK kritis KH IP SB3 adalah *liner stainless steel* kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas [5].

Potensi yang menyebabkan penuaan, mekanisme penuaan dan efek penuaan pada *liner stainless steel* kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas yang merupakan SSK kritis ditunjukkan pada Tabel 4. *Linner* kolam/ kanal penyimpanan BBNB menggunakan bahan SS304. Efek penuaan *liner* yang mungkin terjadi adalah bocor/ retak. Kebocoran/ keretakan *liner* disebabkan oleh mekanisme korosi akibat pengaruh lingkungan. Selama operasi KHIPSB3, *liner* SS304 dalam kondisi terendam air kolam/ kanal penyimpanan. Oleh karena itu potensi penyebab korosi adalah kimia air. Kondisi kimia air kolam penyimpanan dijaga pada nilai tertentu untuk menghambat terjadinya korosi pada *liner*.

Tabel 4. Potensi, Mekanisme dan Efek Penuaan pada SSK Kritis

SSK	Bahan	Potensi Penyebab Penuaan	Mekanisme Penuaan	Efek Penuaan
<i>Liner</i> kolam & kanal	SS 304	Kimia air	Korosi	- Retak - Bocor
Struktur kolam	Beton	Kelembaban, salinitas	korosi	- Retak - Bocor - Penurunan kekuatan

#### Implementasi Manajemen Penuaan KH-IPSB3

Surveilans penuaan SSK kritis telah dilakukan secara berkesinambungan selama umur operasi KH-IPSB3. Kegiatan surveilans penuaan tersebut mempertimbangkan hasil penapisan SSK, spesifikasi teknik, hasil identifikasi penuaan, persyaratan inspeksi *in-service*, persyaratan pemantauan parameter, persyaratan uji kinerja, dan pengalaman operasi. Kegiatan surveilans air kolam dan sample penuaan KH-IPSB3 ditunjukkan pada Gambar 2. Kegiatan pengujian tebal *liner* dan retak beton ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Kegiatan surveilan air kolam dan sample penuaan KH-IPSB3



Gambar 3. Kegiatan pengujian tebal *liner* dan retak beton.

Selama kegiatan operasi KH-IPSB3, dilakukan pemantauan rutin terhadap penuaan *liner* kolam. Komponen yang kemungkinan besar berpengaruh terhadap penuaan *liner stainless steel* di kolam penyimpanan BBNB adalah kondisi kualitas air kolam. Oleh karenanya pemantauan nilai pH dan konduktivitas air kolam penyimpanan BBNB dilakukan secara rutin dan terus menerus. Pemantauan rutin dilakukan minimal satu kali dalam seminggu dengan alat yang telah terkalibrasi. Hasil pemantauan selama operasi ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data hasil pemantauan kondisi air kolam penyimpanan BBNB

Obyek yang dipantau	Nilai terukur	Nilai BKO
pH	5,6 – 7,1	5,5 – 7,5
Konduktivitas	1,36 - 1,54	< 15 $\mu$ S/cm

Air merupakan substansi yang agresif terhadap logam yang dibasahnya meskipun air berada dalam keadaan murni. Hal ini disebabkan karena air akan terionisasi menghasilkan ion  $H^+$  dan  $OH^-$ . Air murni memberikan kontribusi kecil terhadap konduktivitas listrik karena air hanya akan



memberikan ion  $H^+$  dan  $OH^-$  dalam jumlah yang relatif kecil. Air akan memiliki konduktivitas tinggi jika air mengandung berbagai impuritas terlarut dan terionisasi dalam air. Pada suhu  $25^{\circ}C$  air murni mempunyai konduktivitas listrik =  $0,56 \mu S/cm$  [6]. Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai rata-rata konduktivitas air kolam penyimpanan BBNB relatif stabil dibawah nilai batas maksimal yang dipersyaratkan,  $15 \mu S/cm$ . Hasil pemantauan konduktivitas air kolam berkisar antara  $1,36 - 1,54 \mu S/cm$  [7]. Nilai konduktivitas tersebut jauh lebih kecil dari nilai batas kondisi operasi yang aman yang tercantum dalam Laporan Analisis Keselamatan yaitu  $< 15 \mu S/cm$  [1]. Tabel 5 juga menunjukkan bahwa nilai rata-rata pH air kolam selalu berada pada rentang nilai pH minimal dan maksimal dalam kondisi batas operasi normal. Hasil pemantauan pH air kolam bervariasi antara  $5,6 - 7,1$ . Nilai pH tersebut memenuhi syarat kondisi batas operasi normal yaitu pada kisaran  $5,5 - 7,5$ . [1]

Dari data-data tersebut menunjukkan bahwa kualitas air kolam penyimpanan BBNB terjaga sangat baik pada kondisi pH antara  $5,6 - 7,1$  dan konduktivitas antara  $1,36 - 1,54 \mu S/cm$ . Hal ini sesuai dengan batas kondisi operasi yang dipersyaratkan dalam LAK. Dengan nilai tersebut berarti kemungkinan terjadinya korosi pada *liner* yang diakibatkan karena pengaruh air kolam sangat kecil.

Pengujian korosi telah dilakukan untuk melihat ketahanan *liner* kolam terhadap oksidasi ketika diberi potensial luar. Seberapa besar kecepatan korosi pada material *liner* akan terjadi. Hasil pengukuran laju korosi pada sampel kupon material SS304 sebagai material yang sama dengan *liner* kolam penyimpanan BBNB diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel.6. Hasil pengukuran laju korosi kupon SS304 dalam lingkungan air kolam KHIPSB3 [8]

Sampel	$E_{corr}(mV)$	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$\beta_a(mV)$	$\beta_c(mV)$	CR (mpy)
SS304	-76,5	0	24,59	5,17	0,002

Besar kecilnya harga potensial korosi mengindikasikan kecenderungan sampel untuk mengalami oksidasi selama berada dalam media pengkorosi. Jika potensial korosi bebas dari sampel yang terukur rendah berarti sampel tersebut mudah teroksidasi, dan jika potensial korosi dari sampel yang terukur tinggi berarti sampel mudah tereduksi [8]. Tabel 4. menunjukkan bahwa laju korosi untuk material SS 304 dalam lingkungan air kolam KHIPSB3 sebesar  $0,002$  mpy atau dengan kata lain bahwa *liner* kanal dan kolam mengalami pengurangan sebesar  $0,002$  mili inci/tahun. Jika dihitung berdasarkan waktu sejak mulai beroperasi hingga saat ini maka, *liner* kolam penyimpanan BBNB yang menggunakan material sama SS304 masih mempunyai ketebalan  $2,999$  mm. Artinya ketebalan *liner* kolam masih  $99,96\%$ . Apabila perhitungan prosentase sisa ketebalan *liner* menggunakan nilai  $99,9\%$ , berarti akan dibutuhkan waktu selama 40 tahun ke depan.

Untuk memastikan kondisi *liner* sesuai dengan hasil dari metode pengukuran laju korosi kupon diatas, juga dilakukan metode pengukuran langsung ketebalan *liner* dengan alat ultrasonik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *liner* kolam dan kanal masih setebal  $3$  mm. Sehingga kedua metode menghasilkan nilai pengukuran yang hampir sama. Selama operasi KH-IPSB3 belum dilakukan modifikasi SSK kritis. Kegiatan yang telah dilakukan hanya perawatan *liner stainless steel* yang dilakukan pada tahun 2008. Kegiatan perawatan yang dilakukan adalah pengelasan titi-titik kebocoran.

## KESIMPULAN

Dari bahasan diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa KH-IPSB3 telah memiliki program manajemen penuaan yang memuat tentang struktur organisasi, metode pengumpulan data, penapisan SSK, identifikasi penuaan, strategi manajemen penuaan, surveilan penuaan dan evaluasi. Program manajemen penuaan telah diimplementasikan di KH-IPSB3 untuk meminimalisir degradasi material SSK kritis akibat penuaan. Jika dihitung berdasarkan waktu sejak mulai beroperasi hingga saat ini maka, *liner* kolam penyimpanan BBNB yang merupakan SSK kritis masih mempunyai ketebalan  $2,999$  mm. Artinya ketebalan *liner* kolam masih  $99,96\%$  dari tebal awal. Apabila perhitungan prosentase sisa ketebalan *liner* menggunakan nilai  $99,9\%$ , berarti akan dibutuhkan waktu selama 40 tahun untuk mencapai ketebalan sisa tersebut.

Masalah ke depan yang perlu dikaji secara mendalam adalah potensi kebocoran yang terjadi pada sambungan las *liner*. Pengaruh lingkungan terhadap kualitas sambungan las pada *liner* kolam bisa jadi berbeda dengan pengaruhnya terhadap bahan *liner* SS304

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (LAK KH-IPSB3), rev 7, PTLR – BATAN, 2009.
- [2] Bambang Herutomo, Manajemen Penuaan Instalasi Nuklir, Diktat Pemeliharaan INNR, 2011.
- [3] Dokumen IAEA TECDOC-792, *Management of Research Reactor Ageing*.
- [4] PERKA BAPETEN No 7 Tahun 2012 tentang Manajemen Penuaan Instalasi Nuklir Nonreaktor.
- [5] BUDIYONO, “Penentuan Struktur Sistem Dan Komponen Kritis Untuk Manajemen Penuaan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas”, Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2014, PTLR, Serpong, 2015.
- [6] SUMIJANTO, *Diklat Manajemen Penuaan Dan Aspek Keselamatan Dari Reaktor Penelitian*, BAPETEN, Jakarta, (2005).
- [7] YHON IRZON, TITIK SUNDARI, DYAH SR, DARMAWAN AJI, “Pemantauan Air Pendingin di Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (IPSB3)”, Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2014, PTLR, Serpong, 2015.
- [8] RAHAYU KUSUMASTUTI, GENI RINA SUNARYO, “Analisis Laju Korosi Material AlMg<sub>2</sub> Dan SS304 Dalam Lingkungan Air Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (ISSF)” Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XII, PTLR, Serpong, 2014.