

KOROSI DI INDUSTRI NUKLIR

Soedyartomo Soentono"

Abstrak. KOROSI DI INDUSTRI NUKLIR. Industri nuklir yang mendasarkan nilai tambahnya pada pemanfaatan iptek nuklir tidak luput dari ancaman korosi. Korosi di industri nuklir dapat menimbulkan kerugian ekonomi akibat berkurangnya masa produktif dan bahkan terjadinya kecelakaan. Dibahas sifat bahan yang digunakan di industri nuklir dan proses korosi serta pencegahan dan penanganannya. Disajikan kemungkinan pemanfaatan aktivasi lapisan tipis sebagai salah satu metoda analisis berdasarkan iptek nuklir untuk deteksi dan pengukuran laju korosi di industri nuklir.

Abstract CORROSION IN NUCLEAR INDUSTRY. Nuclear industries employing nuclear science and technology for its added value processes are object of corrosion. Corrosion in these industries may lead to an economic loss due to the decrease of the life-time and even an accident. Materials utilized in these industries as well as the corrosion processes and its protection and treatment are described. The possibility of thin layer activation utilization as a nuclear-based analytical method for detecting and measuring the corrosion rates in these industries is presented.

PENDAHULUAN

Masalah korosi, demikian juga aus dan erosi, sangat perlu diperhatikan dan ditanggulangi dalam suatu aktivitas industri karena tidak saja sangat berpengaruh pada program perawatan dan perbaikan, tetapi juga akan sangat mempengaruhi waktu hidup/masa pakai alat, mesin, instalasi, dan/atau keseluruhan pabrik yang berarti nilai ekonomi dan aktivitas industri itu sendiri.

Aktivitas industri pada dasarnya adalah suatu proses nilai tambah yang menghasilkan suatu produk berupa pelayanan (*services*) dan/atau barang (*goods*). Pada umumnya suatu aktivitas industri memerlukan alat, mesin, instalasi, atau pabrik yang mempunyai waktu hidup/masa pakai (umur produktif) tertentu. Tentu selalu dikehendaki umur produktif yang panjang sesuai dengan rancangannya atau bahkan yang dapat diperpanjang untuk memperoleh pemanfaatan yang lebih ekonomis. Untuk keperluan ini dibutuhkan program perawatan dan perbaikan yang paling optimum, yaitu antara lain harus

dapat mengidentifikasi, mengantisipasi, dan menanggapi masalah korosi pada alat, mesin, instalasi dan pabrik secara keseluruhan.

Berbagai cara pencegahan dan pengurangan, identifikasi, penentuan laju, dan cara penanganan korosi telah banyak dikembangkan untuk penyusunan program perawatan dan perbaikan yang dapat memperpanjang umur produktif alat, mesin, instalasi, dan keseluruhan pabrik. Salah satu cara identifikasi dan penentuan laju korosi adalah aktivasi lapisan tipis (*thin layer activation*). Aktivasi lapisan tipis (ALT) adalah suatu metoda yang menggunakan iltek nuklir, yang tidak saja lebih maju daripada metode lain, tetapi juga dalam beberapa hal merupakan satu-satunya metode yang dapat digunakan untuk deteksi, identifikasi, dan penentuan laju korosi pada alat, mesin, atau instalasi tertentu. Beberapa keunggulan metoda ini adalah lebih mudah, lebih cepat, lebih akurat, dan dapat dilaksanakan *in-situ/on-*

• Deputi Bidang Penelitian, Pengembangan Industri Nuklir, BATAN

line pada saat proses nilai tambah sedang berlangsung (operasi) sehingga dalam banyak hal lebih ekonomis.

Uraian selanjutnya di sini akan lebih ditekankan kepada korosi di industri nuklir dan sedikit uraian tentang penanggulangannya, serta kemungkinan pemanfaatan ALT di industri nuklir yang pada umumnya hampir sama dengan industri lainnya tetapi dengan persyaratan keandalan keselamatan yang lebih tinggi. Di dalam industri nuklir pada dasarnya alat, mesin, dan instalasi (peralatan komponen) untuk pelaksanaan jaminan dan kendali kualitas diklasifikasikan ke dalam 3 kategori yaitu kelas keselamatan (*safety class*), kelas kualitas (*quality class*) dan kelas gempa (*seismic class*) yang sebagian besar, kecuali untuk pulau nuklir (*nuclear island*), sama dengan industri lain. Oleh sebab itu hanya pada bagian pulau nuklir saja yang memerlukan penanganan korosi yang berbeda dengan sistem yang sangat andal dan lebih menjamin terselenggaranya keselamatan.

INDUSTRI NUKLIR

Industri nuklir adalah industri yang proses nilai tambahnya memanfaatkan iltek nuklir. Pemanfaatan iltek nuklir memiliki beberapa keunggulan oleh adanya berbagai sifat radiasi yang mudah dideteksi sampai kadar yang sangat rendah, berdaya tembus besar dan dapat dikendalikan dengan mudah - baik arah, luas berkas, maupun energi partikelnya (sehingga reaksi nuklir dan nonnuklir yang terjadi baik jenis, aktivitas maupun kedalamannya dapat dirancang optimum untuk berbagai tujuan). Selama lima dekade iltek nuklir untuk tujuan damai telah berkembang sangat pesat dan menghasilkan industri nuklir yang sangat luas pemanfaatannya dalam berbagai bidang kebutuhan manusia seperti bidang kebutuhan dasar manusia: pangan, sandang, papan, kesehatan, (pertanian, peternakan, farmasi, kedokteran), energi (listrik, uap, panas proses, desalinasi air), dan berbagai industri lainnya (pertambangan dan penambangan misal batubara, minyak & gas bumi, panas bumi, hidrologi, juga industri tekstil, kertas, kayu lapis, agroindustri, mesin dll).

Industri nuklir meliputi industri energi dan nonenergi, yang masih terus berkembang karena mempunyai "*competitive advantages*" seperti mudah, murah, cepat, akurat, dan lebih bersih serta ramah lingkungan. Industri nuklir mencakup beberapa hal seperti di bawah ini:

- a. Aplikasi isotop dan radiasi : pemuliaan mutasi tanaman pangan, sterilisasi dan pengawetan, radiovaksin untuk tembak, proses industri karet, kayu lapis, polimer/plastik, hidrologi (pendangkalan pelabuhan, kebocoran waduk, pipa dll), penentuan cadangan panas bumi. *enhanced oil recovery, column scanning, radiografi, dll,*
- b. Produksi isotop, radiofarmaka dan senyawa bertanda: sumber radiasi (^{60}Co untuk irradiator), diagnosis dan terapi dalam bidang kesehatan, sumber radiasi untuk radiografi uji-tak-merusak (*non-destructive test, NDT*) dan berbagai aplikasi seperti tersebut pada nomer a di atas,
- c. Rancang bangun dan rekayasa komponen nuklir: alat renograf, kamera gamma, detektor radiasi, spektrometer nuklir, instrumen kontrol nuklir (sistem kendali nukleonik) untuk berbagai industri, irradiator (sinar-X, berbagai akselerator partikel, mesin berkas elektron), perisai radiasi, sel panas, reaktor nuklir, dan berbagai komponen instalasi nuklir,
- d. Daur bahan bakar nuklir mulai dari eksplorasi, penambangan, pengolahan, konversi, pengayaan, fabrikasi elemen bakar, penyimpanan bahan bakar bekas, olahdaur-ulang, penyimpanan sementara dan penyimpanan lestari limbah radioaktif daur bahan bakar,
- e. Pengolahan limbah radioaktif mulai dari survei lingkungan, pemantauan lingkungan, pengumpulan, pemilihan, transportasi, pengolahan (evaporasi, pemekatan, insenerasi, pemadatan, pemantapan, immobilisasi), penyimpanan sementara dan lestari, dekontaminasi serta dekomisioning.

Dengan demikian dapat dipahami bahwa industri nuklir berkaitan sangat erat dengan berbagai : industri lainnya pada tahap perancangan, konstruksi, operasi, dan bahkan juga dekomisioning. Pada tahap konstruksi dan operasi industri energi seperti pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), selain berkaitan dengan industri rekayasa (arsitek dan konstruksi) dan pekerjaan sipil, industri nuklir energi juga berkaitan erat dengan industri listrik berat, mesin berat, mesin ringan, mesin preSISI, elektronik, alat angkutan, industri manufaktur lain, industri kimia, servis nuklir. Industri bahan bakar nuklir juga berkaitan erat dengan industri kimia, kimia dasar, logam dasar, serta industri pertambangan [1].

Dalam kaitannya dengan korosi (juga keausan dan erosi) perlu diperhatikan komponen mekanik, listrik, kendali, dll. Sebuah PLTN jenis reaktor air tekan (PWR) berdaya 1000 MW, memerlukan komponen mekanik pipa 60.000 m; las 50.000 rn; pompa 280 buah; berbagai wadah/tanki 260 buah; penukar panas 250 buah; berbagai keran 12.650 buah: 10.600 dioperasikan secara manual, 450 dioperasikan dengan motor dan 1600 dipasang untuk untai ukur. Selain itu komponen listrik yang diperlukan mencakup transformer besar 21 buah; kabel 430.000 m: 20.000 m untuk voltase tinggi dan 410.000 m untuk voltase rendah; serta drive 900 buah. Sebuah PLTN juga memerlukan instrumen kendali yang terdiri dari video display 8 unit, rekorder 60, indikator 500, alarm window 1000, cubicle 200, modul 16.000, dan kabel instrumen 1.500.000 m. Untuk pembangunan sebuah PLTN juga diperlukan pekerjaan sipil yang membutuhkan semen 60.000 t, agregat 200.000 m³; concrete 200.000 m³; formwork 350.000 m²; reinforcement 20.000 t, embedded part 2000 t, high tension steel 500 t, cat yang dapat didekontaminasi 200.000 m² [2].

Seperti disebutkan di atas, industri nuklir memerlukan keandalan keselamatan yang lebih tinggi daripada persyaratan industri umumnya (keselamatan nuklir), khususnya pada bagian pulau nuklirnya, yaitu bagian yang digunakan untuk proses dan atau pemanfaatan tenaga nuklir (radioisotop,

Widyanuklida No.1 Vol.2, Agust, 1998 radiasi, dan reaksi nuklir). Sesuai pasal 16 UU no. 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup. Oleh sebab itu tujuan utama keselamatan nuklir haruslah melindungi individu, masyarakat dan lingkungan dengan membangun dan mempertahankan, di dalam instalasi nuklir, suatu pertahanan yang efektif terhadap bahaya radiologi. Instalasi nuklir adalah tempat yang digunakan untuk pemrosesan dan/atau pemanfaatan radioisotop, radiasi, dan/atau tempat terjadinya/dapat terjadinya reaksi nuklir dapat menimbulkan bahaya radiologi. Keselamatan nuklir mencakup keselamatan reaktor (instalasi nuklir digunakan untuk melakukan reaksi nuklir berantai terkendali) dan keselamatan radiasi. Keselamatan reaktor bertujuan untuk mencegah dan menjamin dengan tingkat kepercayaan yang tinggi sehingga setiap kecelakaan di dalam reaktor akan memberikan konsekuensi radiologi yang kecil dan kecelakaan yang serius hams mempunyai kemungkinan yang sangat kecil. Sedangkan keselamatan radiasi bertujuan untuk menjamin penyinaran radiasi di dalam instalasi nuklir beroperasi dalam keadaan normal dan setiap pelepasan bahan radioaktif dari instalasi nuklir dipertahankan serendah mungkin yang masih dapat dicapai (*as low as reasonably achievable*, ALARA) dan di bawah batas yang telah ditentukan serta menjamin mitigasi jumlah penyinaran dalam keeekaaan [3].

Dari uraian di atas dapat difahami bahwa masalah korosi sebagai salah satu sumber yang dapat memieiu kegagalan keselamatan nuklir sangatlah diperhatikan, terutama di pulau nuklir pada industri nuklir. Sebelum membahas korosi di industri nuklir lebih ninci akan diuraikan terlebih dahulu berbagai bahan dan sifatnya yang diperlukan di industri nuklir:

BAHAN DI INDUSTRI NUKLIR

Pada dasarnya pemilihan bahan di industri nuklir haruslah memperhatikan sifat-sifat keteknikan konvensional tertentu sesuai dengan tujuan penggunaannya, seperti kekuatan mekanik, ketahanan, keuletan, integritas struktur, dapat difabrikasi, dapat dibentuk dengan mesin (dibubut, digrinda, dll), ketahanan terhadap korosi, sifat hantaran panas, kestabilan termal, kompatibilitas bahan, dan ketersediaan dan harganya di pasar. Di samping itu, pemilihan bahan juga perlu mempertimbangkan sifat-sifat khusus tertentu sesuai penggunaannya seperti interaksinya dengan neutron, sifat neutronik, radioaktivitas imbas, kestabilan terhadap radiasi, interaksi kimiawi, interdifusi partikel, kemudahan penanganan dan olah ulang.

Pada dasarnya bahan industri nuklir, terutama yang berada di pulau nuklir, dapat digolongkan sebagai bahan untuk instalasi nuklir (reaktor), seperti bahan bakar, bahan struktur, moderator, reflektor, selimut, elemen kendali, pendingin, perisai, dan bahan untuk sistem keselamatan serta radioisotop, sumber radiasi, dan radiofarmaka.

Berikut adalah uraian singkat tentang sifat-sifat penting berbagai bahan yang diperlukan di industri nuklir :

- a. Bahan bakar (fisi). Sifat utama yang diperlukan adalah adanya kandungan isotop fisi seperti ^{233}U , ^{235}U dan ^{239}Pu dan bahan fertile seperti ^{238}U , dan ^{232}Th . Senyawa kimianya dapat berbentuk metalik, keramik, kermat (keramik metal), karbida, nitrida, silisida, dan sulfida. Matriks bahan bakar harus dapat mengakomodasi hasil belah dalam jumlah besar, kestabilan termal dan radiasi sangat bagus, penghantar panas yang baik, mudah di olah-ulang. Oleh karena bahan bakar ini harus tidak mengalami korosi maka harus dikelongsongi (*cladded*), dengan bahan (*cladding*) yang tahan korosi yang juga harus mempunyai sifat tidak menyerap neutron, tidak mudah teraktivasi, tidak mudah bereaksi dengan bahan bakar dan hasil belah serta tahan radiasi, mempunyai kekuatan mekanik yang baik serta penghantar panas yang baik pula.
- b. Bahan struktur harus mempunyai sifat penyerapan/penangkapan neutron yang rendah (bahan dasar Zr, Al, Mg, Be), kekuatan mekanik yang tinggi dan sangat liat (bahan dasar *carbon steel*, SS), stabilitas termal tinggi (tahan panas, *Ni-base superalloys*), stabilitas terhadap radiasi tinggi (*refractory metals*, Mo, Ti, Ta, W), radioaktivitas imbas rendah (keramik, BeO , Al_2O_3 , MgO , SiO_2), penghantar panas yang baik (semen, ZrSi, SiC-Al), serta tahan korosi pada suhu tinggi (*grafit*, *prestressed concrete*).
- c. Bahan moderator dan reflektor harus mempunyai sifat-sifat nuklir berikut: tampang lintang hamburan neutron tinggi (bahan D_2O , H_2O), menghilangkan energi neutron dalam jumlah besar pada setiap tumbukan (bahan H_2 , C (*grafit*), tampang lintang serapan neutron rendah (bahan Be, BeO). Untuk moderator dan reflektor yang harus berbentuk zat padat, bahan harus mempunyai kekuatan yang memadai, stabil secara termal dan radiasi, dapat difabrikasi, tahan korosi, dan penghantar panas yang baik.
- d. Bahan selimut harus mempunyai bahan fertile, tampang lintang penyerapan neutron besar, tampang lintang hamburan neutron kecil, dan mudah diolah-ulang (bahan dasar: Th alami yaitu ^{232}Th , U alami terdepleksi yaitu ^{238}U dalam bentuk yang mempunyai kekuatan mekanik memadai, kestabilan termal dan radiasi, dapat difabrikasi, tahan korosi, dan penghantar panas yang baik).
- e. Bahan pendingin harus mempunyai sifat utama penghantar panas yang baik (berbagai gas), titik cair rendah dan titik didih tinggi (He , CO_2 , uap), densitas rendah dan daya pompa rendah (air cair), penyerapan neutron rendah (H_2O , D_2O), radioaktivitas imbas rendah (logam cair), stabilitas termal dan radiasi tinggi (Na, Bi, Pb), mengakibatkan korosi yang terendah, mudah dan aman penanganannya.

- f. Bahan perisai hams mempunyai sifat utama memperlambat neutron cepat (berbagai unsur ringan dan berbagai senyawa, H_2O , B, B_2O_3), menyerap neutron lambat dan termal (berbagai unsur medium dan berbagai senyawa, Fe, mineral besi, *boral concrete*), melemahkan sinar gamma primer dan menghasilkan sinar gamma sekunder yang paling sedikit (berbagai unsur berat, Pb, Bi, W).
- g. Berbagai radioisotop untuk perunut dan sumber radiasi. Radioisotop untuk perunut hams mempunyai sifat utama mudah diproduksi dengan aktivitas jenis yang memadai, mempunyai waktu-paro yang cukup singkat sehingga tidak membahayakan lingkungan tetapi cukup panjang untuk memudahkan waktu operasi yang dibutuhkan, hasil peluruhan akhir berbentuk isotop stabil yang tidak beracun dan mudah ditangani. Radioisotop untuk sumber radiasi hams mempunyai sifat utama mudah diproduksi dengan aktivitas jenis tinggi, waktu-paro cukup panjang sehingga dosis singkapan hampir konstan, mode radiasi peluruhannya sederhana, tidak memancarkan banyak radiasi dengan berbagai energi, isotop stabil hasil peluruhan akhir tidak beracun dan mudah ditangani.
- h. Bahan untuk radiofarmaka hams memenuhi persyaratan sebagai bahan farmasi, mudah diproduksi dengan aktivitas jenis memadai, waktu-paro biologi cukup pendek (untuk diagnosis) dan cukup panjang (untuk terapi), waktu *up-take* untuk mencapai organ sasaran sesingkat mungkin. Untuk tujuan diagnosis mode peluruhan hams sederhana, memancarkan sinar gamma monoenergetik dengan energi yang memadai, sedangkan untuk tujuan terapi sebaiknya memancarkan partikel bermuatan dengan energi yang memadai untuk merusak sasaran.

Penelitian pengembangan bahan untuk industri nuklir, khususnya yang digunakan di pulau nuklir, sedang dilakukan untuk tujuan memperpanjang waktu hidup PLTN (60 tahun), meningkatkan derajat bakar elemen bakar, dan mengurangi dosis paparan. Dengan

demikian dapat diketahui bahwa masalah korosi akan menjadi semakin penting di masa yang akan datang.

Bahan yang digunakan di industri nuklir bukan di pulau nuklir sama dengan yang digunakan di industri lainnya, dengan demikian masalah korosi pada bagian ini sama dengan yang terjadi pada industri lainnya,

Sebelum membahas korosi di industri nuklir secara khusus akan dibahas secara singkat terlebih dahulu korosi secara umum dan penanganannya.

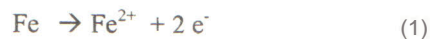
KOROSI DAN PENANGANANNYA

Korosi adalah salah satu fenomena elektrokimia pada bahan logam di berbagai macam kondisi lingkungan. Fenomena ini tidak dapat dihindari, walaupun dapat dihambat dan diharapkan dapat dikendalikan untuk mengurangi dan mencegah dampak negatifnya. Memilih bahan yang paling tahan korosi untuk lingkungan yang dihadapi tidak dapat menyelesaikan masalah secara tuntas, sebab hams pula dipertimbangkan berbagai hal lain dalam aktivitas industri terutama masalah ekonomi (harga bahan). Dalam suatu rancangan yang optimum sekalipun dengan berbagai cara proteksi (misal dengan menggunakan pelindung dari zat yang membentuk film tipis anti korosi, *protective thin film*) dan pengendalian terhadap korosi (pengendalian lingkungan dengan pengaturan pH larutan, dll), reaksi korosi masih dapat terjadi, bahkan dapat melampaui prediksi yang telah diperkirakan sebelumnya. Korosi perlu dipantau secara periodik, demikian pula upaya penghambatan dan pencegahannya yang terintegrasi dengan program perawatan dan perbaikan untuk memperoleh hasil yang maksimum.

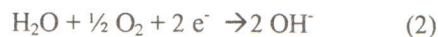
Pada dasarnya korosi adalah reaksi pelamtan (*dissolution*) logam menjadi ion pada permukaan logam yang berkontak dengan lingkungan yang mengandung air (*moisture*) dan oksigen melalui reaksi elektrokimia. Permukaan logam akan diselaputi oleh lapisan oksida tipis yang tersebar tidak merata yang mengakibatkan

terjadinya perbedaan potensial antara sistem dengan oksidanya menjadi suatu sel korosi (sel elektrokimia). Berikut adalah contoh korosi pada besi.

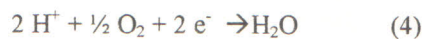
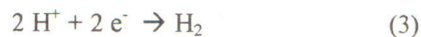
1. Di anoda terjadi pelarutan besi (Fe) menjadi ion Fe^{2+} :



2. Di katoda terjadi reaksi :

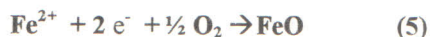


untuk lingkungan (larutan) netral atau basa, atau

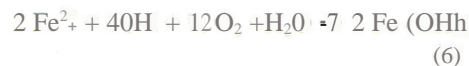


untuk lingkungan (larutan) asam.

Reaksi di atas terjadi secara bertahap dan sebenarnya terjadi juga berbagai reaksi lanjutan dalam larutan. Pada peristiwa korosi ringan, ion ferro yang terbentuk di anoda akan teroksidasi membentuk ferrosida (*gamma iron oxide*) berbentuk lapisan sangat tipis menempel pada permukaan logam dan mencegah terlarutnya besi lebih lanjut :



Demikian juga pada katoda, oksigen harus mencapai permukaan logam agar reaksi (2) dan (4) terjadi. Ion hidroksin yang terbentuk juga dapat terserap pada permukaan membentuk lapisan yang menghalangi penyerapan oksigen. Pada keadaan ini terjadi polarisasi katoda dan proses korosi berjalan lambat. Pada peristiwa korosi yang cepat, lapisan penghambat (pelindung) tersebut tidak sempat terbentuk, ion Fe beraksi dengan ion hidroksil :



Ferrihidroksida terendapkan pada permukaan dan menutupi/mencegah terbentuknya lapisan pelindung (lingkungan

di bawahnya menjadi anaerob, memungkinkan kegiatan mikrobia anaerob meningkat). Adanya bahan lain di media yang berhubungan dengan permukaan anoda dan katoda tentu saja mempengaruhi berbagai reaksi tersebut. Garam yang terlarut akan menyebabkan kenaikan daya hantar listrik larutan, sehingga mempertinggi kecepatan larut garam. Bahan yang menutupi sebagian permukaan akan menyebabkan perubahan/perbedaan konsentrasi oksigen, garam, pH dan lain-lainnya yang dapat membentuk sel elektrokimia baru yang mempertinggi kecepatan korosi (logam semakin cepat rusak).

Secara umum bentuk korosi diklasifikasikan sebagai korosi normal dan korosi pada tempat tertentu. Contoh korosi pada tempat tertentu adalah korosi permukaan, sambungan, celah, galvanik, lubang, antarbutir, retak tegangan, kelelahan bahan dsb. Sedangkan faktor yang berpengaruh terhadap korosi dapat dibedakan menjadi yang berasal dari bahan itu sendiri dan yang berasal dari lingkungan:

1. Faktor dari bahan: kemurnian dan unsur kelumit yang ada dalam bahan, komponen pencampur, struktur material, bentuk kristal, kerusakan permukaan butir, batas butir, ukuran butir, kekasaran permukaan, pengerjaan dingin, dan perlakuan panas
2. Faktor dari lingkungan: lingkungan laut, kandungan garam terlarut, tingkat pencemaran udara, suhu, kelembaban udara relatif, curah hujan, dan pengaruh mikrobia.

Dari uraian di atas dapat difahami bahwa pengendalian korosi pada dasarnya adalah pengendalian/pemilihan bahan, perlakuan permukaan bahan, dan pengendalian lingkungan. Logam mulia seperti Pt, Au, Ag, Cu dan logam yang permukaannya dapat membentuk lapisan tipis (film) seperti Ni, Al, dan Cr mempunyai daya tahan relatif tinggi terhadap korosi. Demikian

pula logam paduan (*alloy*) dari Cu-Zn, Cu-Sn, dan *stainless steel* (304, 316, 430) sering digunakan sebagai bahan antikorosi. Perlakuan permukaan panas dengan pemanasan, pengapian dan nitrida sering dilakukan untuk memperoleh sifat antikorosi bahan.

Pemberian bahan anti korosi pada permukaan (pencegatan atau pemberian Japisan pelindung) dan penambahan penghambat korosi dalam larutan adalah salah satu cara pengendalian, penghambatan, dan pencegahan korosi. Cara lain adalah penggunaan arus listrik dari luar dan anoda umpan (*sacrificial anode*). Perlakuan terhadap permukaan bahan, atau modifikasi permukaan bahan dengan pembentukan lapisan tipis dipermukaan banyak dilakukan dengan berbagai teknik yang berikut :

- *Hot dipping*: Zn, Sn, Al, Pb-Sn dll untuk anoda, logam anti korosi (Zn-Al)
- *Electroplating*: Zn, Sn, Cu, Ni, Cr, Au
- *Diffusion Coating*: Cr (kromisasi), Al (kalorisasi), Zn (sherardisasi)
- *Chemical plating*: Cu, Au, Ni, dll.
- *Vapour plating*: Evaporasi deposisi, *sputtering*, *ceramics coating* dari Sic dengan CVD dan TIC, TIN dengan proses PVD
- *Chemical conversion*: Phosphating, chromating
- *Anodization*: Anodisasi dengan Al, *stainless steel* dan Ti
- *Enamel painting*: *Molten inorganic glass coating* pada permukaan baja
- *Painting*: cat, karet, pelapisan dengan plastik
- *Cladding*: pengelongsongan, penggabungan dua plat

Pencegahan dan penghambatan korosi melalui pengendalian lingkungan dapat dilakukan dengan menjaga kelembaban udara serendah mungkin. Pengurangan kandungan oksigen dalam cairan netral dapat dilakukan misalnya dengan memanaskan cairan, menurunkan tekanan, menambahkan zat penghilang oksigen (*deoxidizers*) dan lain-lain. Juga pengendalian pH larutan sangat penting artinya bagi pencegahan korosi.

Laju kecepatan korosi dapat pula dikurangi dengan menambahkan zat penghambat (*inhibitor*) korosi ke dalam cairan. Penghambat ini dapat mempengaruhi dua hal: Yang pertama adalah adanya anoda yang berfungsi menghambat kecepatan larut logam, dan yang kedua adalah katoda yang berfungsi menghambat kecepatan reaksi oksidasi. Bahan kimia, misal Na_2CrO_4 , NaNO_2 , dan NaMoO_4 dapat digunakan sebagai anoda penghambat korosi, sedangkan ZnSO_4 dan juga $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ dapat digunakan sebagai katoda penghambat korosi. Bahan kimia lain seperti Na_3PO_4 dapat pula digunakan untuk menghambat korosi karena membentuk film. Selanjutnya ada pula pencegahan korosi dengan cara elektrik, yaitu mengatur potensial elektrokimia logam. Sebagai contoh, besi stabil pada potensial di bawah -0,7 V, juga bentuk oksidanya seperti FeO , Fe_2O_3 , dan Fe_3O_4 bersifat pasif di atas 0 V dalam lingkungan netral pada pH 7. Dengan demikian, dalam praktek pencegahan, dengan katoda (*cathodic protection*) potensial besi dikendalikan kurang dari -0,7 V. Umumnya dilakukan dengan menggunakan anoda pengumpan (*sacrificial anode*) yang elektrodanya dihubungkan dengan berbagai logam (*noble metals*), misal Zn, atau dilakukan dengan mengalirkan arus pada besi yang dijadikan katoda sehingga film pasif dapat dipertahankan.

Dari uraian di atas difahami bahwa pencegahan korosi di industri nuklir dilakukan dengan melakukan optimasi bahan yang dipilih berdasarkan sifat keteknisan konvensional tertentu, (termasuk sifat korosinya), dan sifat nuklir, khusus yang diperlukan, serta perlakuan permukaan dan/atau pengendalian lingkungan. Penanganan terhadap korosi pada industri nuklir di bagian bukan pulau nuklir sama dengan penanganan korosi pada industri lainnya. Sebagai contoh, industri penambangan dan pengolahan bahan bakar nuklir, pemurnian bahan bakar nuklir, konversi, pengolahan limbah sangat mirip dengan industri penambangan lainnya maupun industri kimia, tetapi dengan

penanganan keselamatan yang lebih tinggi karena adanya bahaya radiasi eksternal dan internal serta bahaya kekritisan (pada pulau nuklir) pada tahap pengayaan kandungan bahan fisil, konversi, olah ulang bahan bakar bekas dengan kandungan bahan fisil yang tinggi. Khusus pada bagian pulau nuklir, penanganan korosi harus lebih canggih agar dapat dihasilkan keandalan keselamatan yang lebih tinggi. Sebagai contoh adalah penanganan korosi pada kolam reaktor (baik untuk riset maupun reaktor daya) di mana terdapat beberapa elemen bakar, elemen kendali, moderator, reflektor, berbagai fasilitas irradiasi, target/cuplikan, berbagai komponen elektro-mekanik, berbagai reaksi nuklir, generasi panas, vibrasi, aliran pendingin dan berbagai macam radiasi dengan berbagai energi, maupun kolam tempat penyimpanan elemen bakar bekas yang juga berisi berbagai alat elektromekanik, berbagai target/cuplikan radioaktif, dll. Dalam hal ini penanganan korosi dilakukan secara maksimal. Bahan bakar dimasukkan ke dalam kelongsong dengan bahan tahan korosi. Komponen mekanik, elektromekanik dan dipilih dari bahan yang tahan korosi atau yang telah diberi perlakuan permukaan tertentu. Dalam hal pengendalian lingkungan, untuk air pendingin (sekali-gus sebagai moderator) digunakan air bebas mineral (tersedia unit pemurnian air khusus) dan air pendingin ini selalu dikendalikan pH-nya. Hasil korosi (sebagian besar teraktivasi) yang masih terjadi selalu dibersihkan dengan penukar ion (*mixed-bed double-bed ion-exchanger*) dengan cara mengalirkan air pendingin melewati penukar ion secara berkesinambungan. Kolam reaktor maupun kolam penyimpanan elemen bakar bekas selalu dipantau dan dikendalikan lingkungannya secara kontinu dengan berbagai alat pantau dan kendali, termasuk kelembaban udara, kebersihan udara. Perlu diingat bahwa penukar ion pada suatu saat akan jenuh karena kapasitas penangkapan ion hasil korosi dan bahan teraktivasi terlampaui. Jika penukar ion telah jenuh, penukar ion akan dieuci untuk pengaktifan kembali dan hasil cucian menjadi limbah radioaktif yang harus diolah sesuai dengan prosedur pengolahan.

limbah radioaktif. Setelah beberapa kali peneueian/pengaktifan kembali, penukar ion tidak dapat dipakai lagi dan akan diperlukan sebagai limbah radioaktif juga.

KEMUNGKINAN PEMANFAATAN ALT

Seperti yang umum diketahui keandalan peralatan industri, sistem transportasi, pipa dan pembangkit daya konvensional maupun nuklir, dll sangat dipengaruhi oleh proses degradasi seperti keausan, korosi, dan erosi. Oleh sebab itu pengembangan metode deteksi, pengukuran dan pemantauan proses degradasi tersebut sangatlah penting artinya. Pemantauan yang baik dapat mencegah kecelakaan yang sangat berbahaya selama operasi instalasi industri dan kendaraan alat transportasi, dan dapat menghindarkan kerugian produksi yang disebabkan oleh rusaknya mesin [6].

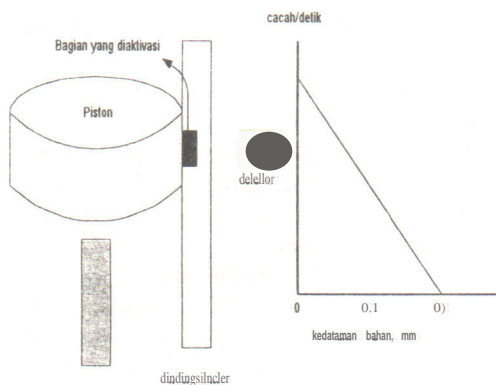
Apabila obyek yang hendak dipantau tidak dapat diakses, atau tertutup, terlindungi oleh struktur pembungkus, metode nuklir seperti aktivitas partikel bermuatan dan neutron menjadi alat yang paling baik untuk mengukur dan memantau keausan dan korosi.

Aktivasi neutron yang dilakukan dalam reaktor nuklir menghasilkan distribusi aktivitas yang homogen di seluruh cuplikan (aktivitas bulk). Keunggulan metode aktivasi neutron adalah dapat diukurnya seluruh bagian cuplikan yang diaktivasi, sedangkan kelemahannya adalah proporsi aktivitas yang terpendakan (karena keausan dan korosi) sangat sedikit, sehingga diperlukan cairan pendingin atau pelumas untuk memperoleh kepekaan deteksi yang cukup baik. Selain itu kelebihan aktivitas yang cukup mengakibatkan metode ini hanya dapat dilakukan di laboratorium dengan perlengkapan proteksi radiasi yang memadai.

Untuk dapat memanfaatkan metode aktivasi pada aplikasi *in-situ*, telah dikembangkan metode ALT dengan menggunakan aktivasi partikel bermuatan. Pada metode ini hanya lapisan permukaan setebal beberapa mm bagian cuplikan yang diaktivasi. Kepekaan yang cukup tinggi

pada aras aktivitas rendah membuat metode ini tidak memerlukan proteksi radiasi yang rumit (sebagian besar bahkan tidak memerlukan proteksi radiasi).

Contoh pengukuran keausan dinding silinder secara sederhana metode ALT diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 1 Pengukuran keausan dinding silinder dengan metode ALT

Pada gambar di atas sebagian kecil dinding silinder diaktivasi (dalam contoh ini dipilih di sekitar bagian paling atas yang dicapai cincin piston berbentuk aktivasi lapis tipis menggunakan siklotron) dan selanjutnya selama beroperasi bagian ini terkikis oleh piston. Ketebalan lapisan tipis yang menjadi radioaktif akibat aktivasi diatur dengan pemilihan energi partikel dan sudut berkas iradiasi. Radioaktivitas yang diamati akan tak terukur (tak terdeteksi oleh detektor) pada saat kikisan telah menghabiskan bagian yang diaktivasi. Oleh sebab itu dengan mengetahui ketebalan bahan yang diaktivasi, dalam contoh ini antara 20 μm sampai sekitar 0,2 mm sesuai dugaan kedalaman keausan yang akan diatur, maka dapat ditentukan laju keausan. Dengan prinsip yang serupa dapat pula diketahui laju korosi, dan laju erosi.

Radiasi gamma karakteristik yang dipancarkan oleh bagian yang ditandai (aktivasi) dapat menembus dinding silinder, jaket pendingin dan berbagai bagian lain yang berada di antara bagian bertanda dan detektor radiasi tanpa atenuasi yang berarti dan dapat direkam oleh instrumen pengukur dengan

mudah dan akurat. Bagian kanan gambar menunjukkan bahwa keausan bergantung pada waktu. Keausan komponen dapat diamati dengan mudah dan cepat dengan melihat perubahan aktivitas akibat bahan yang terkikis. Tentu saja untuk ketepatan pengukuran hasil kikisan haruslah dapat dikumpulkan/terkumpul pada suatu tempat yang berperisai sehingga tidak mengganggu radioaktivitas yang diukur.

Keunggulan metode ALT adalah sebagai berikut:

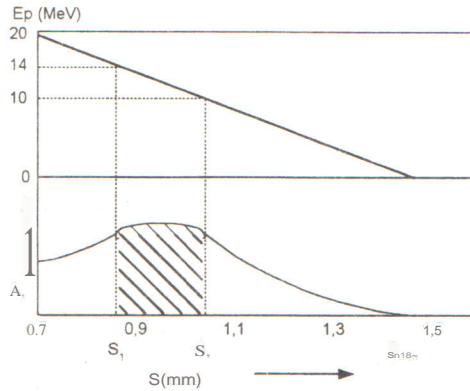
1. Degradasi permukaan (keausan, korosi, erosi) dapat diamati dari jarak jauh.
2. Pengukuran degradasi bagian kritis mesin selama operasi dapat dilakukan secara *in-situ* dan *fine*.
3. Degradasi permukaan berbagai komponen pada mesin yang sama dapat diukur secara simultan.
4. Pemantauan proses degradasi lambat dapat dilakukan dengan sensitivitas tinggi.
5. Tidak mengganggu kondisi operasi mesin atau sistem selama pengukuran.
6. Radioaktivitas sangat rendah ($\ll 370 \text{ kBq}$, $< 10^{-10} \text{ Ci}$).
7. Lebih murah dan lebih cepat dibandingkan metode konvensional.

Sebenarnya pada saat berkas ion yang dipercepat (dari akselerator) menembus suatu bahan, partikel akan dengan cepat kehilangan energinya dan menembus dengan kedalaman tertentu seperti terlihat pada Gambar 2. Sejumlah kecil partikel bermuatan berinteraksi dengan inti atom bahan, mengimbas suatu reaksi nuklir dan menghasilkan isotop radioaktif. Konsentrasi radioisotop yang dihasilkan pada lapisan di bawah permukaan sangatlah rendah ($1-10^{10}$). Pengaktivasiannya hanyalah menghasilkan aras radioaktivitas yang sangat rendah dalam jumlah beberapa $\sim \text{Ci}$. Radioaktif yang terjadi di bawah akan meluruh dengan memancarkan sinar gamma.

Berbagai parameter penandaan haruslah diatur secara komposisi radionuklidanya hams sederhana agar hasil pengukuran andal. Kedalaman lapisan radioaktif harus

sepadan dengan dugaan ketebalan yang akan terkikis.

Distribusi kedalaman aktivitas hams diketahui secara tepat karena akan digunakan untuk mengkonversi pengurangan intensitas cacah yang berbanding lurus dengan berbagai parameter destruksi massa.



Gambar 2 Skema Aktivasi Lapisan Tipis

[Ketergantungan energi proton (bagian atas) dan konsentrasi aktivitas (bagian bawah) dengan kedalaman iradiasi besi oleh Proton 30 MeV (daerah terarsir menunjukkan kisaran kedalaman) dengan konsentrasi aktivitas yang hampir konstan]

Untuk dapat membuat suatu penandaan yang baik untuk pengukuran degradasi diperlukan beberapa informasi dasar seperti data kisaran energi dalam bahan, berbagai nilai ambang reaksi nuklir, ketebalan target dan ketergantungan/hubungannya dengan energi partikel. Berbagai partikel bermuatan untuk mengaktivasi iradiasi berbagai unsur telah sangat dikenal dan informasi yang tersedia cukup lengkap sehingga dapat dilakukan banyak pilihan terhadap partikel bermuatan yang digunakan untuk pemecahan masalah tertentu. [6],[7]. Dalam hal ini jangkauan partikel dalam senyawa dan logam paduan yang teraktivasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus Bragg sebagai berikut:

$$1/R_0 = \sum_i \eta_i / R_i \quad (7)$$

di mana R_0 adalah jangkauan dalam logam paduan, R_i adalah jangkauan dalam unsur i , dan η_i adalah konsentrasi unsur i .

Kedalaman lapisan radioaktif yang terjadi akibat aktivasi bergantung pada energi partikel dan sudut berkas radiasi partikel terhadap permukaan cuplikan :

$$d = [R(E_0) - R(E_{th})] \sin(\theta) = R_0 \sin(\theta) \quad (8)$$

di mana E_0 adalah energi partikel, E_{th} adalah energi ambang reaksi aktivasi, R_0 adalah jangkauan partikel yang berenergi E_0 dalam suatu bahan tertentu, dan θ adalah sudut antara sumbu berkas radiasi dan permukaan cuplikan.

Dengan demikian dalam metode ALT ini dapat diatur ketebalan bagian yang diaktivasi (ditandai) sehingga sensitivitas pengukuran pun dapat diatur. Dari referensi [6,8] dapat diketahui berbagai data yang diperlukan termasuk berbagai energi ambang reaksi aktivasi. Hams pula diingat bahwa dalam penggunaan besaran nyata (aktual dalam praktek) energi ambang reaksi aktivasi hams dikoreksi pula dengan besarnya *Coulomb barrier*.

Aktivasi berbagai unsur kimia dan bahan konstruksi yang umum dipakai sudah banyak dipelajari [6,9,10,11], beberapa rekomendasi dapat dilihat pada Tabel 1. Rekomendasi ini dapat digunakan sebagai salah satu perkiraan/petunjuk karena banyak pilihan aktivasi lain yang dapat digunakan sebagai cara pemecahan masalah yang dihadapi. Sebagai contoh, bila tidak tersedia partikel alpha energi tinggi maka logam paduan Al masih dapat diselidiki dengan aktivasi unsur lain pencampurnya. Demikian pula kandungan Fe yang besar dalam paduan *bronze* dapat pula digunakan sebagai unsur yang diaktivasi dan keausan bahan dapat diselidiki dengan mengukur ^{58}Co .

Karakteristik utama aktivasi bahan adalah ketebalan target yang dihasilkan. [12] yang umumnya ditentukan sebagai aktivasi radionuklida per satuan radiasi, biasanya IIAh.

$$Y = NI \lambda (1 - e^{-\lambda t}) \quad (9)$$

di sini A adalah aktivasi radionuklida, pada akhir iradiasi, I adalah arus iradiasi, λ adalah konstanta peluruhan, dan t adalah waktu iradiasi.

Ketebalan target logam paduan yang dihasilkan dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Y_z = Y_i \eta_i R_z/R_i \quad (10)$$

dengan Y_i adalah ketebalan hasil aktivasi logam paduan, Y adalah hasil radionuklida dari unsur i mumi, dan η_i adalah konsentrasi unsur i dalam logam paduan.

Dalam beberapa hal khusus aktivasi seperti tersebut di atas tidak dapat dilakukan untuk membuat lapisan tipis radioaktif pada permukaan cuplikan. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

- Tidak tersedia akselerator yang dapat mempercepat partikel yang diperlukan
- Bagian mesin yang diselidiki terlalu besar dan terlalu rumit untuk iradiasi
- Lapisan radioaktif yang diperlukan sangat tipis
- Matriks bahan atau unsur kelumit cuplikan tidak dapat diaktivasi dengan partikel yang tersedia. Jenis partikel dan energinya)

Untuk berbagai kasus tersebut tersedia berbagai metode alternatif yang telah dikembangkan seperti difusi isotop dan aktivasi rekoil. Pada metode difusi isotop pembentukan lapis tipis radioaktif dilakukan dengan pendifusian isotop radioaktif pada kondisi imbas buatan ke permukaan cuplikan dengan larutan kimia yang mengandung isotop tersebut. Sedangkan pada aktivasi rekoil digunakan foil berisi unsur tertentu, misal A, yang dapat teraktivasi oleh partikel dengan jenis dan energi yang tersedia, menjadi radioisotop B, melalui reaksi nuklir, A(a,b)B. Selanjutnya sebagian inti radioaktif B dengan energi kinetik yang cukup akan terpelanting meninggalkan foil tipis dan menembus permukaan cuplikan. Dengan demikian dapat diperoleh lapisan radioaktif

Widyanuklida No.1 Vol.2, Agust. 1998
 tipis pada permukaan cuplikan akibat adanya implantasi inti radioaktif B dan metode ALT selanjutnya dapat dilaksanakan.

Apabila energi partikel yang digunakan untuk menembak foil tidak melebihi 40 MeV, energi B yang terpelanting berkisar antara beberapa ratus keV sampai beberapa MeV. Kedalaman maksimum implantasi pada bahan cuplikan berkisar antara beberapa μ m untuk inti radioaktif dengan massa menengah (Be, ^{22}Na) dan berkisar antara beberapa puluh sampai ratusan nanometer untuk inti yang lebih berat (^{48}V , ^{56}Co , ^{65}Zn).

Pada industri nuklir di luar pulau nuklir, pemanfaatan metode ALT tentu saja sangat mirip dengan pemanfaatan metode ini pada industri lainnya. Jika cuplikan terkontaminasi oleh radioisotop, maka perlu ada penyesuaian dan koreksi dalam pengukuran cacah. Pada pulau nuklir, khususnya yang berada di medan radiasi tertentu yang dapat menimbulkan aktivasi seperti di sekitar teras reaktor, metode ALT tidak diperlukan karena korosi (dan juga degradasi lainnya) dapat diketahui langsung dengan pemantauan sinambung terhadap berbagai radiasi (termasuk aktivasi hasil korosi).

PUSTAKA

1. S. Supadi, Permasalahan dalam rangka Introduksi Energi Nuklir di Indonesia; Prosiding Pertemuan Ilmiah Teknologi Bahan Bakar Nuklir dan Pengolahan Limbah Radioaktif, 2-4 Feb. 1987, Puspiptek, Serpong, BATAN, 1987
2. IAEA, Construction of Nuclear Power Plant, IAEA TRS 285 IAEA Vienna 1989.
3. S. Soentono et.al, laminan dan Kendali Kualitas di Industri Nuklir: Workshop Sehari laminan Kualitas Industri Energi dalam rangka Mengantisipasi Pasar Bebas, Pus. Studi Energi UGM dan BPPT, Yogyakarta, 20 Agustus 1997
4. B.S. Ma, "Nuclear Reactor Materials and Applications", Van Nostrand

Reinhold, New York, Cincinnati, Toronto, Melbourne, 1983

5. E. Mattsson, The Atmospheric Corrosion properties of Some Common Structural Metals, A comparative Study, Material Performance, July 1982
6. IAEA, The Thin Layer Activation Method and Its Applications in Industry, IAEA-TECDOC-924, IAEA, Vienna, 1996
7. C.F. Williamson, J.P. Boujot, J. Picard., Table of Range and Stopping Power of Chemical elements for charged particles, Rapport CEA-R-3042, 1966
8. Landolt-Bornstein, Numerical data and Functional Relationship in Science and Technology, New Series, Group 1 : Nuclear and Particle Physics
9. V.V. Maluhin, 1.0. Konstantinov, Activation of Construction Materials on Cyclotron, Isotop v SSSR., 44, 1975
10. P.P. Dmitriev, The Radionuclide Yield in the Reaction with Protons, Deuterons, Alpha Particles and He-3 Ions, Energoatomizdat, Moscow, 1986
11. P. Albert et al., Thick Target Yields for the Production of Radioisotopes, "Handbook on Nuclear Activation Data", TRS 273, IAEA, Vienna, 1987
12. N.N. Krasnov, Thick Target Yield, Int. Journal. Appl. Rad. And Isotopes, 25, 1974

Tabel 1. Reaktivitas Isotop Berenergi Rendah dan Energi Tinggi

Isotop	Partikel	Reaktivitas	Waktu Paruh	Yield	Isotop Target	Tipe Reaktor	Spesies	Referensi
Ba	e-e-3	Bl-7(53,31T)	122,4	1/1	-	3t-aij	Q,47B	SOb.m
C	e-e-3	Bl-7(53,31T)	132,1	629	-	3t-aij	g,47B	SOb.m
Ir	d	Nj-22(262thl)	1:728	14:16	Nj-24	10t-aij	1-15	gh.ru
Ir		Nj-22(262thl)	142,7	15,92	Nj-24, Mg-2B	10 t-aij	1-15	gh.ru
S	d	Nj-22(262thl)	1:723	78	-	3t-aij	1-15	gh.ru
Ti	Ip	Ti-41(16 t)	1:725	1ffiiU	Sc45, &41	20 t-aij	g,9-15	2b.m
V	d	O-51(27)t	216	1i11D	-	3t-aij	1032	3b.m
a-	Ip	Mi-52(5 t)	11	1J731	Mi54	3t-aij	1-16	ajb.m
		~2,3t	45	241,5	O-51MIS2	40t-aij	-Q,84	1ttLn.
M1	p	~2,31T	725	629	O-51, Fe,ff	3t-aij	-Q,84	1ttLn.
Fe	p	Co-57(8,51T)	11	444	O-51	7t-aij	Q, ffi-14	7.ab.m
		Co-51Co53	45	1110tal	O-51, Fe,ff	7t-aij	SJJ:Q,9	7.ab.m
Co	p	IOXOU81T)	727	4fiU	-	7t-aij	Q,81	7.ab.m
N	d	Co-51Co53	725	1\$+821	O-51, Co6	7t-aij	Q7-09	7.ab.m
OL	p	Zn-65(244.IT)	11	2516	-	7t-aij	112	1ttLn.
Zn	d	Znai(244, 1IT)	aj5	4:99	Q1,67	3t-aij	112	1ttLn.
Zr	p	N-92n11Q 1IT)	1:724	ffii	ZI-&fB(III)	7t-aij	Q,8-1	1b.m
N-92	p	N-92n11Q 1IT)	aj5	4:m,9	ZI-M>mn.	7t-aij	g,8-1	1b.m
		Team611T)	45	111	ffb,mm., Ty93	15 WGI1	Q5-1	6-7b.m
~	p	Team611T)	1:724	518	Tc-97	1W(J1	Q5-1	6-7b.m
Sl	d	S-124(ED,21T)	1:723	1:rn	S-124h, S-122	20t-aij	163	6b.m
W	p	R3-1B<r.11IT)	22	211D	R3-183	7t-aij	g,7-1	4b.m