
**ASPEK PROTEKSI RADIASI
PADA PENINGKATAN DAYA REAKTOR TRIGA 2000 ***

**Rini Heroe Oetami
S.Wiryosimin , E.Kurnia , Sudrajat , S.Sofyan, Z.Arifin**

Puslitbang Teknik Nuklir – BATAN

ABSTRAK

ASPEK PROTEKSI RADIASI PADA PENINGKATAN DAYA REAKTOR TRIGA 2000. Reaktor TRIGA Mark II Bandung telah ditingkatkan dayanya dari 1 MW menjadi 2 MW dan saat ini namanya menjadi reaktor TRIGA 2000. Pekerjaan peningkatan daya meliputi tahap kegiatan pembongkaran, pemasangan dan uji nuklir yang memberikan risiko bahaya radiasi eksternal maupun internal. Bahaya radiasi dapat memberikan efek deterministik dan stokastik pada jaringan tubuh. Untuk mencegah efek deterministik dan menurunkan peluang terjadinya efek stokastik tersebut perlu dilakukan pengawasan keselamatan radiasi selama program peningkatan daya. Pengawasan keselamatan radiasi dilakukan dengan menerapkan prinsip proteksi radiasi yaitu: jarak, waktu dan perisai. Laju paparan radiasi diukur dengan menggunakan *surveymeter* jenis *cutie pie* dan *babyline*, sedangkan terimaan dosis personal dipantau dengan dosimeter termoluminesensi (TLD). Hasil survei laju paparan radiasi di dalam teras berkisar antara 100 R/jam sampai dengan 2600 R/jam. Potensi bahaya kontaminasi terbesar terdapat pada pekerjaan pembongkaran *thermal column*, dan *thermalizing column*. Dosis akumulasi personal tertinggi saat kegiatan berlangsung sebesar 7,85 mSv/tahun dan tidak melebihi nilai batas dosis tahunan (NBD) yang berlaku. Tidak adanya dosis personal yang melebihi NBD, menunjukkan aspek proteksi radiasi pada program peningkatan daya telah berjalan dengan baik.

Kata kunci: proteksi radiasi, laju paparan, dosis radiasi

ABSTRACT

RADIATION PROTECTION ASPECT ON TRIGA 2000 UP GRADING PROGRAMME. TRIGA Mark II research reactor was up graded from 1 MW to 2 MW and now its name become TRIGA 2000 reactor.

-
- Disajikan pada seminar Konvensi Nasional Keselamatan Nuklir II, BAPETEN, Mei 2002, di Jakarta

During up grading programme 3 stages of work were performed i.e. dismantling, reconstruction and commissioning. Radiation hazard appeared in this work were external and internal radiation that may result deterministic and stochastic effect. To prevent occurrence of the deterministic effect as well as to minimize the probability of the stochastic effect during the upgrading programme, radiation protection principle such as distance, time and shielding was applied. Exposure rate was measured using cutie pie and babyline surveymeter, while personnel dose was monitored using thermoluminescence dosimeter (TLD). It was found that the exposure rate in reactor core was 100 R/hour up to 2600 R/hour. The highest contamination was potentially occurred on thermal column and thermalizing column during dismantling. Based on the TLDs monitoring it was found that the highest dose was 7.85 mSv per year which is not exceeded the annual dose limit and it means that radiation protection aspect was well applied during the up grading programme.

Key words: radiation protection, exposure rate, radiation dose

PENDAHULUAN

Reaktor TRIGA Mark II telah ditingkatkan dayanya dari 1 MW menjadi 2 MW, dan sekarang namanya menjadi reaktor TRIGA 2000. Peningkatan daya tersebut dimulai pada bulan April tahun 1996 dan diselesaikan pada tahun 2000, bertujuan untuk meningkatkan kemampuan dalam bidang penelitian dan pengembangan teknik nuklir. Program peningkatan daya reaktor meliputi tiga tahapan kerja, yaitu tahap pembongkaran komponen reaktor dan fasilitas pendukungnya, tahap pemasangan, serta tahap uji nuklir berupa pengujian karakteristik reaktor. Medan radiasi dengan laju paparan tinggi akan dijumpai pada kegiatan peningkatan daya terutama pada tahap pembongkaran reaktor. Selain laju paparan tinggi juga melibatkan pekerjaan dengan kondisi sulit lainnya seperti ruang gerak yang sempit, obyek kerja yang sukar dijangkau, potensi kontaminasi yang cukup besar, dan sering dijumpainya kondisi dengan kombinasi kesulitan seperti tersebut di atas. Medan radiasi tinggi dan kondisi kerja yang sedemikian akan menimbulkan bahaya radiasi eksternal dan internal.

Radiasi eksternal dan internal dapat menimbulkan efek radiasi pada jaringan tubuh,

yaitu efek deterministik dan stokastik [4]. Efek deterministik adalah efek yang mempunyai nilai ambang batas dan muncul segera setelah nilai ambang batas penyinaran dilampaui, sedangkan efek stokastik adalah efek yang tidak mempunyai nilai ambang batas dan efek tersebut muncul beberapa waktu yang cukup lama setelah penyinaran. Untuk mencegah terjadinya kecelakaan yang menimbulkan efek radiasi tersebut maka perlu dilakukan pengawasan keselamatan kerja yang menerapkan prinsip proteksi radiasi, yaitu : jarak, waktu dan perisai. Pemantauan dosis akumulasi personil juga sangat penting dilakukan, agar terimaan dosis tahunan dapat dipantau dan diketahui apakah nilai dosis tersebut melebihi nilai batas yang ditentukan, atau tidak.

Pengawasan keselamatan dilakukan oleh kelompok Keselamatan Radiasi, dan dalam pelaksanaannya mengacu pada peraturan dan ketetapan yang berlaku. Acuan yang digunakan di antaranya adalah UU No.10 tahun 1997, Peraturan Pemerintah No.63 tahun 2000 serta Surat Keputusan Kepala Bapeten No.01/Ka-Bapeten/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi.

Adapun tujuan pengawasan keselamatan dengan menerapkan aspek proteksi radiasi pada program peningkatan daya reaktor adalah untuk pengendalian bahaya radiasi. Terkendalinya bahaya radiasi dapat mengurangi jumlah dosis akumulasi personil sehingga dapat mencegah efek deterministik dan menurunkan peluang terjadinya efek stokastik pada pekerja akibat dosis radiasi yang diterimanya.

TATA KERJA

Program peningkatan daya reaktor dari 1 MW menjadi 2 MW meliputi tiga tahapan kerja utama yaitu tahap pembongkaran, tahap pemasangan dan tahap uji reaktor. Pada ketiga tahap tersebut dilakukan pengawasan keselamatan dengan menerapkan prinsip-prinsip proteksi radiasi yang didahului dengan tahap persiapan, sebagai berikut.

I. Tahap persiapan.

Tahap persiapan dimulai dengan menginventarisasi jenis pekerjaan dan memperkirakan jenis bahaya radiasi yang ditimbulkan. Setelah jenis pekerjaan ditetapkan dilakukan persiapan peralatan survei, peralatan cacah, peralatan pemantau, pemantau dosis personal, dan peralatan dekontaminasi. Alat/ bahan bantu kerja disiapkan juga misalnya : tali tambang, tabung pernafasan, plastik berbentuk lembaran atau kantong, penjepit bertangkai (*tong*), *radiacwash*, kertas merang, dan *sealtape*. Kelengkapan keselamatan diri misalnya *work pak* , jas lab, masker, tutup kepala plastik, helm dan *apron* dipersiapkan untuk melindungi pekerja radiasi.

Penyediaan ruang dekontaminasi personal dilakukan agar pekerja yang terkontaminasi dapat membersihkan dirinya dari kontaminan setelah selesai bekerja. Wadah limbah dipersiapkan untuk mewadahi limbah radioaktif yang dihasilkan dari setiap pekerjaan dan ditandai dengan tanda-tanda radiasi yang sesuai dengan jenis limbah. Kondisi kerja di ruang reaktor juga dipersiapkan dengan menentukan pengaturan daerah lalu lintas pekerja radiasi dan mengukur laju alir udara di permukaan *exhaust blower* untuk memastikan bahwa sistem *blower* bekerja dengan baik.

II. Tahap pembongkaran

Pekerjaan pada tahap pembongkaran dimulai dengan melakukan pemetaan radiasi di dalam tangki reaktor pada seluruh bagian teras untuk memperkirakan tingginya laju paparan radiasi. Pengukuran laju paparan radiasi tersebut dilakukan dengan menggunakan *Underwater surveymeter model CPMU small chamber Serial No.30503* yang mempunyai orde pengukuran kR.

Pembongkaran dimulai dengan mengeluarkan 172 elemen bakar yang terletak di rak elemen bakar dan teras dalam tangki reaktor. Elemen bakar dari *bulk shielding facility* (BSF) juga dipindahkan, dan selanjutnya disimpan dalam *spent fuel storage pit* (SFSP). Pemindahan elemen bakar ini dilakukan dengan menggunakan *transfer cask* khusus (warna biru) berbentuk silinder terbuat dari bahan timbal, untuk mengurangi laju paparan

terhadap pekerja radiasi. Setiap kali proses pemindahan elemen bakar dilakukan pengukuran laju paparan di permukaan elemen bakar dan daerah kerja (1 meter dari sumber) dengan menggunakan *surveymeter babyline* No. 81.

Setelah seluruh bahan bakar sebagai sumber radiasi disimpan di dalam SFSP, pemetaan radiasi pada teras diulangi untuk memperkirakan besarnya paparan dan akan digunakan sebagai bahan pertimbangan pengambilan tindakan proteksi pada pekerjaan selanjutnya.

Pada program peningkatan daya akan dilakukan modifikasi teras reaktor. Untuk pekerjaan ini air tangki harus dikeluarkan lebih dulu secara bertahap, agar air dapat digunakan sebagai perisai untuk pekerjaan pengeluaran komponen reaktor lainnya seperti rak bahan bakar, *lazy susan*(LS), *uranium shielded irradiation facility* (USIF), *bellow*, reflektor, batang kendali, dan *grid plate* (*top grid* dan *bottom grid*).

Lazy susan merupakan salah satu komponen teras yang memiliki laju paparan radiasi tinggi, dan untuk menurunkan laju paparan tersebut pada pekerja dibuat pengungkung saat LS akan dikeluarkan dari teras.

Permukaan air tangki diturunkan untuk mengurangi jarak pandang sehingga pekerjaan menjadi lebih mudah dilakukan. Dengan turunnya permukaan air maka pengukuran laju dosis di dasar tangki reaktor -dapat dilakukan lebih dekat dengan menggunakan *surveymeter babyline*.

Pada saat mengukur laju paparan radiasi yang tinggi di teras, digunakan rak gantung yang dirancang khusus dengan memberi perisai Pb pada alasnya untuk mengurangi terimaan dosis. Beberapa pekerjaan lain dengan potensi bahaya kontaminasi seperti pembongkaran pipa *heat exchanger* (HE) dan *demineralizer* dilakukan dengan pengawasan dari PPR yang melakukan pengukuran nilai laju paparan radiasi pada daerah kerja dan memberikan saran-saran proteksi lainnya.

Secara keseluruhan pekerjaan pembongkaran teras reaktor merupakan pekerjaan dengan kondisi laju paparan radiasi tinggi, memerlukan alat berat (*crane*), ruang gerak sempit dan dalam, sehingga mengganggu pernafasan. Pada kondisi yang demikian

dilakukan penerapan prinsip proteksi radiasi yaitu : jarak, waktu dan perisai. Prinsip jarak digunakan jika medan radiasi yang akan diukur sangat tinggi, seperti pengukuran laju paparan di dalam teras. Prinsip waktu digunakan jika daerah kerja merupakan medan radiasi tinggi dengan ruang gerak sempit, sedangkan prinsip perisai digunakan jika prinsip jarak dan waktu sudah tidak efektif dalam menurunkan laju dosis. Pekerjaan pembongkaran teras banyak menggunakan kombinasi ketiga prinsip proteksi radiasi tersebut. Pada pekerjaan pemeriksaan korosi dan pengukuran ketebalan tangki diterapkan prinsip waktu yaitu dengan membatasi jumlah waktu kerja sesuai dengan laju dosis di daerah tersebut.

Bahaya radiasi interna terdapat pada pekerjaan pembongkaran *thermalcolumn*, *thermalizing column*, pembongkaran BSF, pemindahan perisai beton, pembongkaran pipa primer dan pembongkaran fasilitas radiografi neutron. Bahaya radiasi interna tersebut diatasi dengan melakukan dekontaminasi permukaan benda dan tempat yang terkontaminasi, atau memasang *blower exhaust* untuk mengurangi kontaminasi di udara.

III. Tahap pemasangan

Tahap pemasangan teras meliputi : pemasangan tangki baru, penempatan kembali blok grafit pada *thermal column* dan *thermalizing column* diikuti dengan pemasangan struktur teras dan komponen lain seperti *bellow*, sistem *emergency core cooling system* (ECCS) dan pengisian kembali air tangki.

Bahaya radiasi eksterna dan interna masih tinggi pada tahap pemasangan walaupun tidak setinggi bahaya pada tahap pembongkaran. Prinsip proteksi radiasi juga diterapkan kembali pada setiap pekerjaan dalam tahap ini.

Bersamaan dengan pemasangan komponen reaktor dilakukan pewadahan limbah hasil pembongkaran seperti reflektor, klem, boud dan *bellow* yang merupakan limbah utama dari pembongkaran reaktor karena laju paparannya yang sangat tinggi.

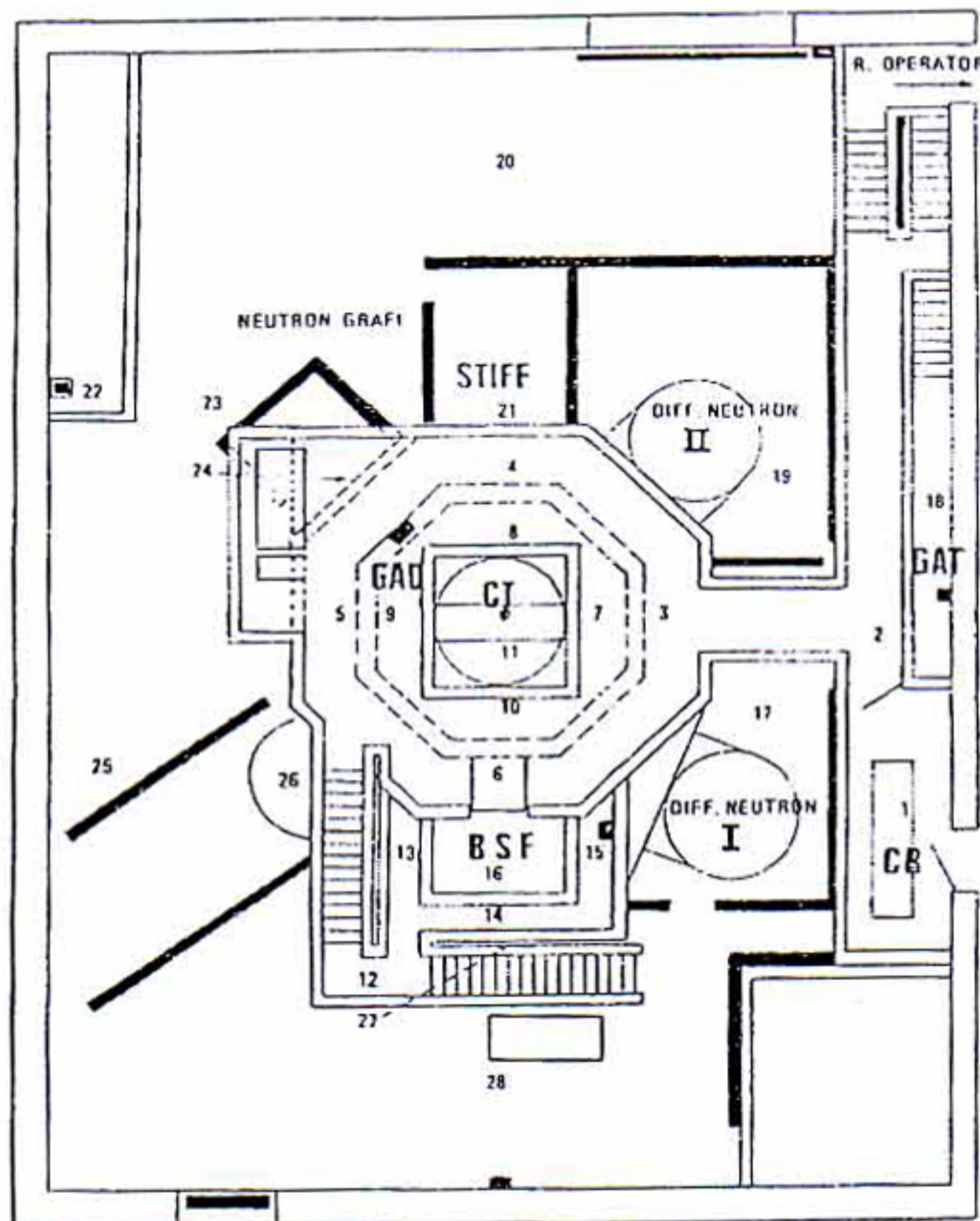
IV. Tahap komisioning

Tahap akhir program peningkatan daya adalah tahap uji nuklir. Pada tahap ini seluruh komponen teras telah masuk ke dalam tangki reaktor beserta air pendingin. *Area monitor* dipasang pada dek reaktor dan tempat lalu lintas pekerja radiasi untuk mendukung pengoperasian reaktor. Posisi *area monitor* di daerah pekerja radiasi adalah di reaktor *hall* selatan, utara dan tangga reaktor sebelah timur. Daerah tersebut merupakan tempat yang selalu dilintasi pekerja radiasi dan pada *area monitor* dipasang alarm yang akan memberikan bunyi peringatan jika nilai laju paparan radiasi melebihi nilai batas yang ditetapkan yaitu 0,025 mSv/jam

Seluruh ruang reaktor disurvei untuk memastikan bahwa tidak ada sumber radiasi lain yang berkontribusi pada laju dosis kecuali yang berasal dari teras reaktor. Jika ditemukan sumber radiasi lain maka sumber tersebut segera dipindahkan.

Survei radiasi dilakukan setelah kekritisan reaktor dicapai dan pengoperasian reaktor mencapai daya 2 MW. Laju dosis gamma dan neutron diukur pada titik yang telah ditentukan di seluruh ruang reaktor (nomor 1 sd. 28) seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Pengukuran laju paparan neutron dilakukan dengan menggunakan *surveymeter* neutron Model CAT 0552 -1175947.

Ruang kendali (*control room*) posisi 1 merupakan titik pengamatan yang paling penting dalam aspek proteksi radiasi ini, karena tempat tersebut merupakan daerah kerja operator reaktor. Operator akan berada di ruang kendali selama mengoperasikan reaktor dan tidak akan berada di bagian lain kecuali pada keadaan yang tidak normal.



Gambar 1. Titik survei di reaktor TRIGA 2000 (nomor 1 sd. 28) menunjukkan lokasi pengukuran laju dosis pada operasi normal 2 MW

Pemantauan dosis akumulasi personil dilakukan secara terus menerus dengan menggunakan dosimeter termoluminesens dan dosimeter kantong

Hasil kegiatan proteksi radiasi dicatat dalam *log book* yang memuat tanggal, waktu kerja, nama pekerja radiasi, PPR, *supervisor* penanggung jawab pada setiap jenis pekerjaan, hasil pengukuran laju dosis dan alat ukur yang digunakan serta keterangan penting lain yang diperlukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemetaan radiasi di dalam teras reaktor sebelum kegiatan pembongkaran dan setelah elemen bakar dikeluarkan dari teras tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pemetaan laju paparan radiasi di dalam tangki reaktor TRIGA Mark II, sebelum kegiatan pembongkaran dan setelah elemen bakar dikeluarkan dari teras

No	Lokasi	Pengukuran I R/jam	Pengukuran II R/jam	Keterangan
1	Permukaan <i>bellow</i>	250	100	3 posisi pengukuran
2	Permukaan <i>bellow</i>	200	90	
3	Permukaan <i>bellow</i>	200	120	
4	Permukaan klem <i>bellow</i>	360	130	Pengukuran dengan <i>SM Underwater TA CPMU Small Ch. Serial No.30503</i>
5	Permukaan reflektor tengah arah tenggara	580	120	
6	Permukaan klem <i>bellow</i>	150	70	
7	Permukaan <i>CentreTimple</i>	3200	530	
8	Permukaan reflektor	360	230	
9	Permukaan reflektor tengah arah barat laut	160	60	
10	Permukaan reflektor tepi arah barat laut	80 - 100	50	
11	Jarak 1 meter dari <i>bellow</i>	150	20	
12	Rak elemen bakar	9000	6000	
13	Permukaan <i>bottom grid</i>	Tidak diukur	60	
14	Permukaan <i>top grid</i>	Tidak diukur	1400	
15	Teras Selatan	Tidak diukur	2400	
16	Teras Timur	Tidak diukur	2600	
17	Teras Barat	Tidak diukur	2600	
18	Teras Utara	Tidak diukur	3000	

Data pengukuran I dan II menunjukkan nilai laju paparan dengan kondisi sebelum dan setelah elemen bakar dikeluarkan dari dalam tangki reaktor. Laju paparan di bagian *grid* dan teras tidak diukur sebelum elemen bakar dikeluarkan karena dijumpai kesulitan dalam menempatkan detektor. Hasil pengukuran laju paparan di dalam tangki diberi nomor urut 1 s.d 18. Setelah elemen bakar dikeluarkan hasil pengukuran pada teras memperlihatkan laju paparan masih sangat tinggi, walaupun pada beberapa posisi lainnya menunjukkan adanya penurunan nilai laju paparan yang besar, misalnya pada posisi CT sebesar 2670 R/jam dan pada rak elemen bakar sebesar 3000R/jam.

Penurunan laju paparan yang sangat besar (83 % pada permukaan CT dan 79 % pada permukaan reflektor tengah arah tenggara) sangat penting dalam mengurangi risiko bahaya radiasi eksternal yang akan diterima pekerja radiasi. Penurunan sebesar 30 % pada rak elemen bakar kosong disebabkan oleh kondisi rak yang telah terkontaminasi secara melekat dan posisinya saat pengukuran masih di atas teras, sehingga walaupun bahan bakar telah dikeluarkan laju paparan radiasinya masih tetap tinggi.

Laju dosis pada *bellow* untuk berbagai posisi pengukuran berkurang antara 40% sampai 63 %. Laju dosis pada teras masih tinggi disebabkan karena komponen yang ada di dalam teras telah teriradiasi selama 30 tahun lebih, sehingga menjadi radioaktif. Adanya hamburan radiasi di dalam teras juga menyebabkan nilai laju paparan menjadi sangat tinggi.

Laju paparan pada permukaan LS yang semula 2900 R/jam pada posisi tergantung 2,5 meter di bawah permukaan air tangki turun menjadi 250 μ Sv/jam (dalam besaran laju dosis) di daerah kerja operator *crane* setelah dilakukan pengungkungan. Laju dosis di ruang kendali mencapai 150 μ Sv/jam pada saat LS diangkat ke permukaan air untuk dipindahkan ke BSF. Laju dosis sebesar 250 μ Sv/jam masih melebihi batas normal daerah kerja (0,025 mSv/jam) sehingga pada proses pengangkatan LS diterapkan juga prinsip waktu dan perisai. Potensi bahaya radiasi pada proses ini adalah radiasi eksternal, dan terlihat bahwa prinsip perisai untuk sumber radiasi tinggi sangat baik dalam mengurangi laju dosis. Dosis akumulasi personil akan menjadi lebih sedikit jika laju

dosis yang mengenai pekerja radiasi lebih rendah.

Pemindahan *top grid* ke BSF memberikan laju dosis antara 10 sampai 60 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ pada daerah kerja yang berjarak 2 m dari sumber. Laju dosis terbesar dari komponen *bottom grid* adalah laju dosis permukaan bawanya sebesar 10 mSv. Kondisi ini diatasi dengan menerapkan prinsip jarak dalam upaya mengurangi terimaan dosis akumulasi.

Laju dosis pada permukaan grafit antara 28 – 3000 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dan di daerah kerja antara 50 – 100 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ pada pekerjaan pembongkaran *thermal column* dan *thermalizing column*. Laju dosis tinggi ini disebabkan oleh pancaran radiasi dari reflektor yang masih terdapat di dalam tangki dan diatasi dengan pemasangan perisai Pb. Pengeluaran grafit dilakukan dekat dengan sumber radiasi, sehingga harus diterapkan prinsip waktu, yaitu waktu kerja antara 7 menit sampai 25 menit. Kondisi dengan kombinasi penyulit laju dosis tinggi dan kontaminasi debu grafit diatasi dengan memberikan kelengkapan proteksi diri seperti masker, sarung tangan kulit (grafit yang ditangani sangat keras), dan tutup kepala.

Potensi bahaya kontaminasi lain ada pada pekerjaan pembongkaran pompa primer, HE, pembukaan *beamplug* dan sirkulasi air tangki. Laju paparan radiasi pada daerah kerja untuk pekerjaan tersebut berkisar antara 2 sampai 20 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, nilai ini aman bagi pekerja radiasi.

Hasil pemetaan radiasi ulang di dalam tangki setelah semua sumber dengan paparan radiasi sangat tinggi dikeluarkan dari teras ditunjukkan pada Tabel 2. Pemetaan ulang dimaksudkan untuk menghitung dan merancang tindakan proteksi yang harus diterapkan pada pekerjaan selanjutnya, misalnya pemeriksaan korosi tangki reaktor, dan tahap pemasangan tangki baru serta pemasangan kembali komponen struktur teras. Hasil pengukuran laju dosis pada Tabel 2 diberi nomor urut 1 sd. 8.

Tabel 2. Data laju dosis radiasi di dalam tangki reaktor setelah elemen bakar, *bellow*, reflektor dan LS dan beberapa komponen dikeluarkan dari teras

No	Lokasi	Laju dosis mSv/jam	Keterangan
1	<i>Thermal Column</i>	1,20 – 2 – 3	Pengukuran dari arah dinding tangki ke pusat tangki Alat ukur : <i>SM Babyline 81</i> Dasar rak gantung (Pb) tempat PPR berdiri : 0,12 mSv/jam
2	Difraksi II	8 – 10	
3	Difraksi I	8	
4	Thermalizing Column	3,50 – 6,80 – 11	
5	TOF	9 – 15	
6	Radiografi neutron	100 – 90 – 50	
7	Dasar tangki	10	
8	Dinding tangki lapis III	0,40 – 1,20	

Dari Tabel 2 terlihat bahwa laju dosis masih tinggi pada fasilitas radiografi neutron, hal ini disebabkan oleh adanya sumber bismuth yang masih berada dalam fasilitas tersebut. Penggunaan rak gantung dengan perisai Pb yang digunakan bagi PPR saat pengukuran di dalam tangki sangat efektif, sebab dapat menurunkan nilai laju dosis sampai 0,12 mSv/jam. Penurunan tersebut sangat berpengaruh untuk mengurangi terimaan dosis akumulasi personil.

Tabel 3 menyajikan jumlah personil dengan terimaan dosis pada rentang dosis tertentu untuk waktu 5 tahun pertama program peningkatan daya.

Tabel 3. Data jumlah pekerja radiasi yang menerima dosis tahunan pada rentang tertentu selama kurun waktu peningkatan daya.

Tahun	Dosis 0 – 1 mSv (orang)	Dosis 1,01 – 2,50 mSv (orang)	Dosis 2,51 – 5,00 mSv (orang)	Dosis 5,01 – 10 mSv (orang)
I (1996)	15	35	27	8
II (1997)	56	27	5	-
III (1998)	53	41	1	-
IV (1999)	54	30	10	-
V (2000)	77	11	1	-

Tabel 3 menunjukkan bahwa terimaan dosis pada tahun pertama cukup tinggi, disebabkan pada tahun tersebut banyak dilakukan pekerjaan pembongkaran struktur reaktor yang sangat radioaktif. Pada tahun I ada 8 orang yang mendapat dosis lebih dari 5,01 mSv, mereka adalah PPR yang menerima dosis tertinggi sebesar 7,85 mSv dan operator reaktor dengan terimaan dosis tertinggi sebesar 6,39 mSv. Terimaan dosis PPR lebih besar dari operator reaktor karena PPR lebih dulu melakukan pengukuran sebelum pekerjaan dilakukan oleh pekerja radiasi dan selama pekerjaan berlangsung PPR juga selalu berada di medan radiasi yang sama. Pada umumnya PPR lebih lama berada di medan radiasi dari pada pekerja radiasi, terutama untuk pekerjaan dengan laju dosis tinggi, sehingga terimaan dosisnya menjadi lebih besar.

Pada tahun pemantauan berikutnya tidak dijumpai personil dengan terimaan dosis melebihi 5 mSv, dan secara keseluruhan cenderung menurun. Penurunan ini disebabkan oleh jenis pekerjaan yang melibatkan paparan radiasi tinggi telah berkurang, diantaranya banyak dilakukan pekerjaan perawatan instrumentasi yang tidak melibatkan banyak sumber radiasi.

Pada tahun ke III jumlah personil dengan terimaan dosis lebih dari 2,51 mSv hanya seorang yaitu seorang PPR dengan nilai terimaan dosisnya sebesar 2,58 mSv. Dosis akumulasi personil pada tahun tersebut cukup rendah karena pada tahun ini dilakukan pengelasan tangki baru yang tidak aktif dan memakan waktu cukup lama.

Pada tahun ke IV terjadi peningkatan terimaan dosis pada rentang 2,51 –5 mSv, hal ini disebabkan oleh adanya pemasangan kembali struktur teras dan komponen lainnya yang memiliki aktivitas tinggi.

Pada tahun V dilaksanakan tahap uji nuklir, terimaan dosis menjadi lebih kecil sesuai dengan makin berkurangnya sumber radiasi yang memiliki laju paparan tinggi.

Pengeluaran limbah reaktor (reflektor, *bellow*, baud dan klem *bottom grid*) dari ruang reaktor juga menurunkan laju dosis radiasi di reaktor *hall* sehingga dapat menurunkan dosis akumulasi yang diterima personil.

Hasil pengukuran laju dosis saat reaktor beroperasi pada daya 2MW di titik pengukuran (nomor 1 sd. 28) sesuai dengan Gambar 1, disajikan dalam Tabel 4. Reaktor yang telah beroperasi normal menyebabkan laju dosis radiasi gamma (γ) dan neutron di ruang reaktor meningkat. Survei radiasi harus dilakukan secara rutin pada setiap pengoperasian reaktor [3]. Survei radiasi yang dilakukan secara rutin dapat memberikan gambaran tentang nilai laju dosis di seluruh ruang reaktor sehingga terimaan dosis pada pekerja radiasi dapat dikendalikan. Pengukuran laju dosis radiasi meliputi laju dosis radiasi gamma dan neutron. Data pengukuran I dan II menunjukkan laju dosis gamma sebelum dan setelah pemasangan perisai pada dinding tangki dan permukaan BSF. Pada pengukuran awal laju dosis radiasi di ruang kendali mencapai nilai 0,01 mSv/jam, besarnya paparan ini dipastikan berasal dari tangki reaktor sebagai satu-satunya sumber radiasi setelah tahap uji nuklir. Upaya pemasangan perisai pada bagian dinding tangki yang terbuka dapat menurunkan laju dosis di ruang kendali menjadi 0,008 mSv/jam seperti tercantum dalam Tabel 4 . Laju dosis di permukaan tengah BSF masih tinggi (1mSv/jam) maka pada permukaan BSF dipasang kembali lembaran Pb. Upaya ini dapat menurunkan laju dosis pada permukaan BSF menjadi 0,8

mSv/jam dan menurunkan pula laju dosis di ruang kendali menjadi 0,006 mSv/jam. Dengan paparan daerah kerja sebesar 0,006 mSv/jam dan pergantian *shift* operator reaktor sebanyak 3 kali dalam 24 jam, maka jika operator bekerja secara penuh dalam setahun terimaan dosis mereka tidak akan melampaui NBD tahunan sebesar 50 mSv/tahun.

Besarnya laju dosis radiasi neutron dan gamma di ruang kendali dapat disebabkan oleh adanya hamburan yang dihasilkan akibat interaksi neutron dan foton dengan materi yang ada dalam sistem teras dan disekitarnya.

Menurut DOE Handbook [2] beton dapat menghambur balikkan 20 % berkas gamma datang, dan neutron dapat pula dihamburkan secara signifikan sedangkan efek *streaming* terjadi jika berkas radiasi melalui suatu rongga (*void*). Pada proses pemasangan grafit dan pelapisan dinding BSF, dimungkinkan masih terdapat rongga antara dinding perisai lama dengan dinding BSF baru, sehingga laju dosis pada permukaan BSF menjadi lebih tinggi dan terdeteksinya neutron di ruang kendali diperkirakan merupakan efek *streaming* tersebut.

Laju dosis yang tinggi pada fasilitas radiografi neutron diatasi dengan memasang perisai, *beam plug* dan *shutter* pada permukaannya. Pemasangan tersebut berhasil menurunkan laju dosis 80 mSv/jam menjadi 0,026 mSv/jam, dengan demikian nilai paparan pada permukaan HE menjadi berkurang karena letaknya berada di depan radiografi neutron.

Laju dosis di permukaan *Standard TRIGA Irradiation Facility* (STIF) meningkat tetapi hal tersebut tidak membahayakan karena pada permukaan fasilitas STIF dipasang perisai Pb dan beton, sehingga laju dosis radiasi di ruang reaktor utara menjadi 0,08 mSv/jam.

Menurut ketentuan yang berlaku NBD tahunan bagi pekerja radiasi adalah sebesar 50 mSv per tahun [1]. Sebagai upaya untuk tidak melampaui NBD pekerja, aspek prinsip proteksi radiasi di P3TkN menerapkan nilai batas laju dosis sebesar 0,025 mSv pada daerah di mana pekerja radiasi sering berada yaitu pada ruang kendali dan

tempat lalu lintas pekerja radiasi (ruang reaktor utara, timur dan selatan). Pemilihan tempat pemasangan *area monitor* (alarm dipasang pada laju dosis 0,025 mSv) secara tetap pada daerah lalu lintas pekerja radiasi di reaktor *hall* bertujuan untuk memantau laju dosis daerah kerja secara kontinu.

Untuk memantau laju dosis pada permukaan tangki dilakukan pemasangan *area monitor* pada dek reaktor. *Area monitor* tersebut berguna sebagai salah satu indikator adanya kenaikan daya atau keadaan lain yang menyebabkan kenaikan laju paparan radiasi dalam teras. Nilai batas laju dosis yang ditetapkan pada *area monitor* sebesar 0,50 mSv/jam dan alarm akan berbunyi sebagai tanda peringatan jika laju dosis melebihi nilai batas tersebut. Kenaikan laju dosis tersebut berasal dari kenaikan paparan radiasi di teras, sehingga operator dapat mengambil tindakan pencegahan dalam pengopersian reaktor.

Laju dosis pada permukaan difraksi I diukur pada daerah kerja sebesar 0,08 mSv dan tepat pada permukaannya sebesar 0,32 mSv, sedangkan laju dosis daerah kerja di difraksi II sebesar 0,02 mSv dan tepat pada permukaan sebesar 0,12 mSv.

Laju dosis di daerah lalu lintas pekerja (reaktor *hall* selatan, tangga reaktor *hall* timur dan reaktor *hall* utara) menunjukkan laju dosis di bawah nilai 0,025 mSv/jam merupakan nilai yang aman bagi pekerja radiasi.

Laju dosis di daerah lalu lintas pekerja (reaktor *hall* selatan, tangga reaktor *hall* timur dan reaktor *hall* utara) menunjukkan laju dosis di bawah nilai 0,025 mSv/jam merupakan nilai yang aman bagi pekerja radiasi. Laju dosis neutron pada permukaan fasilitas *time of flight* (TOF) tidak terukur disebabkan oleh laju dosis yang terlalu tinggi. Tingginya laju dosis tersebut disebabkan kondisi TOF pada saat pengukuran belum dilengkapi dengan *shutter*.

Tabel 4. Data laju dosis radiasi gamma(γ) dan neutron (n) di reaktor TRIGA 2000 pada operasi normal 2 MW. Pengukuran I dan II dilakukan sebelum dan setelah pemasangan perisai di dinding tangki dan permukaan BSF.

No	Titik survei radiasi	Pengukuran I Laju dosis γ mSv/jam $\times 10^{-2}$	Pengukuran II Laju dosis γ mSv/jam $\times 10^{-2}$	Pengukuran Laju dosis n mSv/jam $\times 10^{-2}$
1	Ruang Kendali	0,8	0,6	0,5
2	Tempat Ganti Sepatu	1,6	1,4	0,8
3	Dek Timur	3,8	3,0	3
4	Dek Utara	9,5	14	5
5	Dek Barat	11	13	5
6	Dek Selatan	6	5,8	6
7	Pagar Tangki Timur	10	10	20
8	Pagar Tangki Utara	12	18	12
9	Pagar Tangki Barat	10	18	14
10	Pagar Tangki Selatan	8	10	20
11	Permukaan Air Tangki	48	62	60
12	Latar Tangga BSF	5,0	2,6	3
13	Tepi pagar BSF Barat	30	10	6
14	BSF Selatan	14	12	1,5
15	BSF Timur	25	10	0,8
16	Permukaan BSF	100	20-80	0,8
17	Difraksi neutron I	2-20	8-32	10-400
18	Tangga <i>hall</i> Timur	0,5	0,5	0,4
19	Difraksif neutron II	0,5 -7,5	2-12	0,2 - 10
20	Reaktor <i>hall</i> Utara	1,4	0,8	0,3
21	Permukaan STIF	2,5 - 80	8-170	0,2 - 50
22	Permukaan HE	5,5	0,7-1,4	0,3 -0,5
23	Depan Perisai Radiografi neutron	8,5	0,4	0,3
24	Permukaan radiografi neutron	8000	2,6	0,8
25	Reaktor <i>hall</i> Barat	2-4	2,5	3
26	Permukaan TOF	320	600	<i>Off scale</i>
27	Dinding BSF Selatan	1,4	1,2	0,6
28	Reaktor <i>hall</i> Selatan	3,0	2,2-1,2	0,8 - 1

KESIMPULAN

Dari aspek proteksi radiasi program peningkatan daya reaktor TRIGA Mark II dari 1 MW menjadi 2 MW dapat diambil kesimpulan dan disarankan sebagai berikut :

1. Program peningkatan daya reaktor dapat memberikan potensi bahaya radiasi interna maupun eksternal terhadap pekerja radiasi karena adanya medan radiasi tinggi dan debu radioaktif
2. Pemetaan radiasi sebelum suatu pekerjaan dilakukan sangat penting untuk memperkirakan potensi bahaya radiasi dan besar dosis yang akan diterima pekerja, sehingga dapat dilakukan persiapan untuk tindakan pencegahan.
3. Prinsip proteksi radiasi yaitu pengaturan jarak, pembatasan waktu dan penggunaan perisai yang telah diterapkan selama program dilaksanakan sangat membantu dalam menurunkan laju dosis yang mengenai pekerja radiasi.
4. Peralatan proteksi radiasi dan kelengkapan diri untuk keselamatan radiasi serta fasilitas dekontaminasi harus tersedia dan mencukupi sehingga pengawasan keselamatan radiasi dapat terlaksana dengan baik.
5. Tidak adanya dosis personal yang melebihi NBD dan tidak adanya kecelakaan radiasi selama program peningkatan daya, menunjukkan bahwa tujuan proteksi radiasi yaitu mencegah efek deterministik dan mengurangi peluang efek stokastik dapat tercapai.
6. Beberapa ketidaksempurnaan yang dijumpai dalam pelaksanaan pengawasan keselamatan radiasi selama program peningkatan daya, adalah kurangnya penerapan budaya keselamatan, sehingga disarankan :
 - Setiap pekerja radiasi harus memahami bahwa tanggung jawab keselamatan radiasi terletak pada diri masing-masing pekerja radiasi
 - Membiasakan diri untuk mempersiapkan peralatan secara lengkap sebelum masuk ke medan radiasi sehingga dapat bekerja secara efisien.
 - Pekerja radiasi harus selalu berkomunikasi dengan PPR saat bekerja di dalam

medan radiasi tinggi dan sebaiknya tidak bekerja sendirian sekalipun pekerja tersebut mempunyai kemampuan tinggi dalam bidangnya.

- Setiap jenis pekerjaan yang akan dilakukan harus dirancang dan didiskusikan secara matang dengan seluruh anggota tim kerja terlebih dahulu sebelum memasuki medan radiasi, sehingga diskusi di medan radiasi tidak perlu dilakukan karena hanya akan menambah terimaan dosis serta memperbesar risiko bahaya radiasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. BAPETEN, Surat Keputusan Kepala Bapeten No.01/Ka-Bapeten/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, BAPETEN, Jakarta, (1999) 13
2. DOE, Alara Training For Technical Support Personnel , "DOE Handbook", U.S Department of Energy, Washington DC, 1997 : 35
3. IAEA, "Code on the Safety of Nuclear Research Reactors Operation" (Safety Series No 35 – S2), International Atomic Energy Agency, Vienna, 1992 : 27
4. MARTIN,A. and HARBISON, S.A., "An Introduction to Radiation Protection", Third Edition, Chapman and Hall, New York, 1986 : 33