

UJI INTEGRITAS KELONGSONG ELEMEN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 DENGAN METODE UJI CICIP PANAS

Rasito, Sudjatmi K.A., dan P. Ilham Yazid

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri BATAN
Jl. Tamansari No.71 Bandung 40132
Email: plasma_nuke00@yahoo.com

ABSTRAK.

UJI INTEGRITAS KELONGSONG ELEMEN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 DENGAN METODE UJI CICIP PANAS. Telah dilakukan pemeriksaan terhadap elemen bakar reaktor TRIGA 2000 untuk mengetahui integritas kelongsong elemen bakar. Pemeriksaan dilakukan dengan menggunakan metode uji cicip panas. Uji cicip panas merupakan salah satu teknik uji integritas kelongsong elemen bakar dengan menggunakan radionuklida hasil fisi di dalam air rendaman sesudah iradiasi sebagai indikator kebocoran. Radionuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator adalah gas mulia Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m, Xe-135, dan anak luruhnya. Cuplikan air rendaman di dalam tabung uji diambil untuk kondisi sebelum dan sesudah iradiasi. Identifikasi radionuklida dan pengukuran aktivitas dilakukan menggunakan spektrometri gamma. Teridentifikasi 3 elemen bakar yang melepaskan kelima hasil fisi dengan konsentrasi rata-rata 0,4 kBq/L (Kr-87), 0,6 kBq/L (Kr-88), 0,3 kBq/L (Kr-85m), 0,3 kBq/L (Xe-135), dan 1,7 kBq/L (Cs-138). Ketiga elemen telah diambil dari teras untuk analisis lebih rinci mengenai sumber dan penyebab lepasan gas mulia tersebut.

Kata kunci: kebocoran elemen bakar, produk fisi, uji cicip panas, spektrometri sinar- γ

ABSTRACT.

INTEGRITY TEST ON THE FUEL ELEMENT CLADDING OF THE TRIGA 2000 REACTOR USING HOT SIPPING TEST METHOD. A series of leakage detection tests have been carried out to identify integrity of the fuel element cladding of the TRIGA 2000 reactor. The hot sipping test method was utilized in the tests. The hot sipping test method is one of the techniques to find out possible leakage on the fuel claddings, by detecting the presence of fission product nuclides in fuel elements soaking water that has been well isolated both before and after the irradiation. The fission products as leakage indicator were noble gases nuclide ie Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m, Xe-135, and daughters. It has been identified that 3 fuel element releasing fission products with maximum activity 0,4 kBq/L (Kr-87), 0,6 kBq/L (Kr-88), 0,3 kBq/L (Kr-85m), 0,3 kBq/L (Xe-135), dan 1,7 kBq/L (Cs-138). The activity of noble gases were identified and measured using gamma spectrometry device. Those fuel elements have been removed from the core for further analysis to know the source and cause of noble gas released.

Key words: fuel element leakage, fission product, hot sipping test, γ -ray spectrometry

1. PENDAHULUAN

Salah satu persyaratan dalam keselamatan radiasi dan beroperasinya sebuah reaktor penelitian adalah tidak adanya lepasan radionuklida hasil fisi ke air pendingin reaktor dan udara lingkungan. Deteksi dini lepasnya

radionuklida hasil fisi dari elemen bakar ke air pendingin dapat dilakukan dengan pemeriksaan radioaktivitas air pendingin primer. Radionuklida hasil fisi dapat keluar dari elemen bakar ke dalam air pendingin karena adanya kebocoran pada kelongsong elemen bakar.

Sebagian dari elemen bakar reaktor TRIGA

2000 yang digunakan saat ini ada yang berusia di atas 30 tahun dengan nilai fraksi bakar (*burn-up*) yang tinggi yaitu mencapai lebih dari 45%. Berdasarkan usia dan fraksi bakar maka perlu dilakukan pemeriksaan untuk mengetahui integritas kelongsong elemen bakar. Hasil uji integritas kelongsong elemen bakar disamping akan digunakan untuk melihat unjuk kerja elemen bakar juga sebagai antisipasi bahaya radiasi dari kemungkinan adanya lepasan gas hasil fisi ke air pendingin maupun udara.

Uji cicip (*sipping test*) merupakan salah satu teknik uji tak merusak untuk deteksi integritas kelongsong elemen bakar dengan mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan radionuklida hasil fisi di dalam air rendaman elemen bakar setelah diiradiasi sebagai indikator kebocoran. Uji cicip dingin merupakan uji cicip untuk kondisi elemen bakar yang telah lama diiradiasi dengan nuklida indikator kebocoran adalah Cs-137. Pemeriksaan kebocoran elemen bakar TRIGA 2000 menggunakan uji cicip dingin telah dilakukan dengan elemen bakar yang diperiksa sebanyak 47 buah [1]. Hasil pemeriksaan elemen bakar menggunakan uji cicip dingin dianggap kurang memuaskan karena tidak mendapatkan hasil yang sama ketika pengujian diulang. Berbeda dengan uji cicip dingin, uji cicip panas dilakukan dalam kondisi elemen bakar diiradiasi di teras reaktor dan radionuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator rusaknya integritas kelongsong adalah gas mulia. Radionuklida dari golongan gas mulia merupakan hasil fisi yang mudah keluar saat elemen bakar diiradiasi jika terjadi kerusakan pada kelongsong elemen bakar.

Untuk pelaksanaan uji cicip panas dibuat perangkat uji integritas elemen bakar reaktor TRIGA 2000, dengan mempertimbangkan aspek keselamatan, sehingga paparan radiasi yang diterima pekerja diupayakan sekecil mungkin.

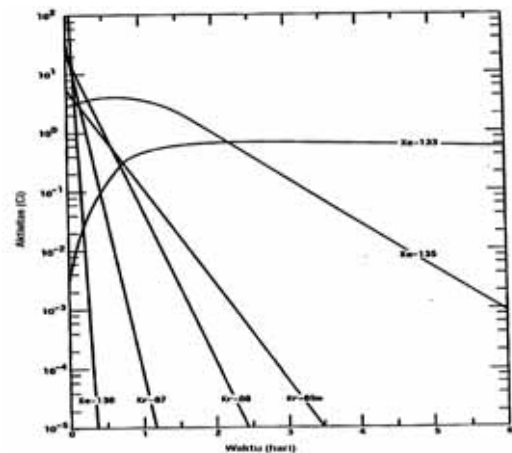
2. TEORI

Elemen bakar reaktor TRIGA 2000 Bandung merupakan elemen bakar tipe *Uranium Zirkonium-Hidrida (UZr-H)* dengan bahan kelongsong adalah baja tahan karat (*stainless steel, SS-304*). Elemen bakar jika diiradiasi akan menghasilkan sejumlah radionuklida hasil fisi. Nuklida hasil fisi yang terbentuk disamping dapat tetap terjebak di dalam matrik elemen bakar juga dapat lepas keluar dari matrik elemen bakar. Di antara nuklida hasil fisi yang paling mudah lepas adalah golongan gas mulia. Percobaan pengukuran laju lepasan nuklida

hasil fisi hasil iradiasi elemen bakar tipe UZr-H telah dilakukan oleh Langer dan Baldwin [2]. Konsentrasi nuklida gas mulia hasil fisi yang lepas sebagai fungsi lama waktu iradiasi diperlihatkan pada Gambar 1.

Pada iradiasi pendek diperlihatkan bahwa gas mulia hasil fisi yang lepas dengan aktivitas tinggi adalah Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m dan Xe-135. Tingginya aktivitas nuklida lepasan disamping karena dipengaruhi kelimpahan fisi juga dipengaruhi waktu paruh dan laju lepasan dari matrik elemen bakar.

Kelimpahan fisi nuklida gas mulia cukup tinggi, Xe-138 (5,89%), Kr-87 (2,53%), Kr-88 (3,67%), Kr-85m (0,3%) dan Xe-135 (6,45%) [3]. Nuklida Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m dan Xe-135 maupun juga anak luruh dari masing-masing nuklida selanjutnya akan digunakan sebagai indikator dalam kegiatan pemeriksaan integritas pada kelongsong elemen bakar dengan metode uji cicip panas.



Gambar 1. Lepas gas hasil fisi dari iradiasi elemen bakar tipe UZr-H

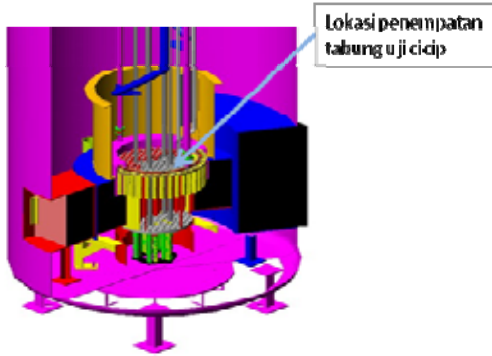
3. TATA KERJA

Pemeriksaan integritas elemen bakar TRIGA 2000 menggunakan metode uji cicip panas dilakukan melalui tiga tahapan yaitu modifikasi teras reaktor, uji cicip panas, dan pengukuran dengan spektrometer gamma.

3.1 Modifikasi Teras Reaktor

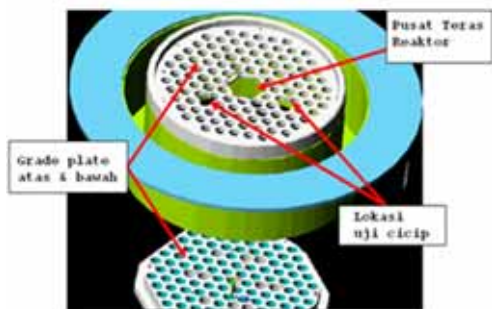
Uji cicip merupakan salah satu metode untuk menguji integritas kelongsong elemen bakar dengan memanfaatkan teridentifikasinya radionuklida hasil fisi di dalam cuplikan air rendaman elemen bakar. Adapun uji cicip panas

merupakan istilah yang diberikan khusus untuk uji cicip yang dilakukan dengan elemen bakar yang diiradiasi di teras reaktor. Pengerjaan uji cicip panas dilakukan di teras reaktor. Adapun bentuk teras reaktor TRIGA 2000 diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Teras reaktor TRIGA 2000

Untuk melakukan uji cicip panas perlu dilakukan modifikasi pada teras reaktor. Modifikasi dilakukan untuk dapat menempatkan tabung uji cicip ke dalam teras sehingga dapat diiradiasi sebagaimana elemen bakar lainnya. Dengan diameter tabung uji cicip yang lebih besar dari ukuran elemen bakar maka diperlukan minimal tiga kedudukan elemen bakar yang digantikan. Bagian *top grid* diambil sehingga tiga lubang elemen bakar membentuk segitiga dengan luas rongga yang dimungkinkan dapat dimasuki tabung uji. Pembuatan lubang dan penempatan tabung di teras reaktor TRIGA diperlihatkan pada Gambar 3 dan 4.

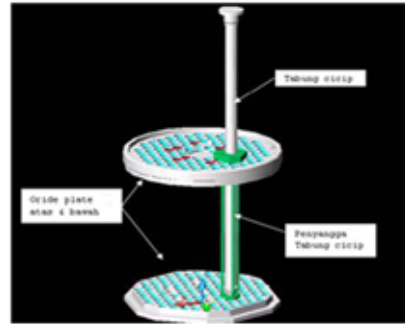


Gambar 3. Pembuatan lubang di teras reaktor

3.2 Uji Cicip Panas

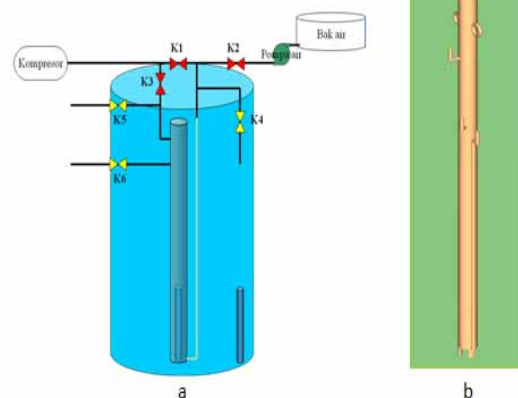
Dalam uji cicip panas, elemen bakar direndam dan diradiasi di dalam sebuah tabung yang dibuat dari baja tahan karat dengan

diameter 5,08 cm, tebal 0,127 cm, dan tinggi 400 cm. Pada tabung juga dipasang 3 buah pipa kecil yang dibuat dari baja tahan karat dengan diameter 1 cm dan tebal 0,1 cm yang berfungsi sebagai saluran air dan udara.



Gambar 4. Penempatan tabung uji cicip

Elemen bakar yang direndam di dalam tabung uji diiradiasi pada daya reaktor 300 kW selama 30 menit. Jika integritas kelongsong elemen bakar rusak maka radionuklida hasil fisi terutama dari golongan gas mulia (krypton dan xenon) akan dengan mudah keluar dan mengkontaminasi air rendaman. Air rendaman selanjutnya diambil sebanyak 250 mL sebagai cuplikan dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma. Skema dan tabung uji cicip panas yang dilakukan di teras reaktor TRIGA 2000 diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Uji cicip panas, (a) Skema dan (b) bentuk tabung

Dalam uji cicip panas, pertama kali elemen bakar yang akan diperiksa dimasukkan ke dalam tabung yang berisi air murni. Pengisian air

murni dilakukan dengan menjalankan pompa, membuka katup K2 dan menutup katup-katup yang lain. Setelah elemen bakar dimasukkan ke dalam tabung yang telah berisi air maka dilakukan pengadukan yaitu dengan menjalankan kompresor, membuka katup K1 dan K5 dan menutup katup-katup lainnya. Kemudian dilakukan pengambilan cuplikan latar belakang sebanyak 250 mL dengan cara menjalankan kompresor, membuka katup K1, K6, dan menutup katup-katup lainnya. Selanjutnya dilakukan iradiasi selama 30 menit dengan sebelumnya mematikan kompresor dan pompa dan menutup semua katup. Setelah iradiasi selesai, dilakukan pengambilan cuplikan uji cicip sebanyak 250 mL dengan cara menjalankan kompresor, membuka katup K1, K6, dan menutup katup-katup lainnya. Tahap selanjutnya adalah melakukan *shut-down* reaktor, mengambil elemen bakar dan menempatkannya kembali di teras dan mengeluarkan air rendaman ke pendingin primer. Air rendaman dari dalam tabung dikeluarkan dengan cara menghidupkan kompresor, membuka katup K3, K4 dan menutup katup-katup lainnya.

3.3 Spektrometri Gamma

Dari setiap elemen bakar yang diuji, diambil cuplikan air rendamannya sebanyak dua kali. Cuplikan pertama diambil sebelum iradiasi dan cuplikan kedua diambil setelah iradiasi. Cuplikan pertama disebut juga cuplikan latar belakang dimana hasil analisisnya digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan adanya kontaminasi radionuklida dari hasil iradiasi sebelumnya. Cuplikan air diambil melalui pipa saluran keluaran tabung uji dan dimasukkan ke dalam botol plastik dengan volume 250 mL.



Gambar 6. Spektrometer gamma di Lab ARL PTNBR

Cuplikan air selanjutnya dianalisis menggunakan spektrometer gamma untuk diidentifikasi jenis nuklida dan aktivitasnya. Analisis dengan metode spektrometri gamma dilakukan di lab Analisis Radioaktivitas Lingkungan (ARL) bidang Keselamatan dan Kesehatan (K2) dan lab Teknik Analisis Radiometri (TAR) bidang Senyawa Bertanda dan Radiometri (SBR) PTNBR-BATAN Bandung. Detektor yang digunakan adalah jenis *high purity germanium* (HPGe) dengan efisiensi 30% relatif terhadap sintilator NaI(Tl) 3"x3", serta sebuah *multichannel analyzer* (MCA). Resolusi energi atau *full width at half maximum* (FWHM) detektor adalah 1,87 keV pada energi 1,33 MeV yang merupakan energi transisi ⁶⁰Co. Adapun untuk tampilan dan analisis spektrum digunakan *software* PCA II *Nucleus*.

Pengukuran radioaktivitas dilakukan dengan menempatkan cuplikan dalam detektor HPGe. Cuplikan dicacah selama 4000 detik ($\pm 1,1$ jam). Perlakuan ataupun kondisi cuplikan saat pencacahan dibuat mendekati kondisi kalibrasi efisiensi. Karena pengukuran dengan spektrometri gamma merupakan metode pengukuran relatif maka dalam identifikasi nuklida dan pengukuran radioaktivitas diperlukan kalibrasi, yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi menggunakan sumber standar.

3.3.1 Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi pada MCA dimaksudkan untuk mengubah cacahan sebagai fungsi kanal (*channel*) menjadi cacahan sebagai fungsi energi. Dengan kalibrasi energi dapat diidentifikasi jenis nuklida berdasarkan energi gamma karakteristik yang dimiliki masing-masing radionuklida. Untuk melakukan kalibrasi energi digunakan sumber standar titik multi energi yang berisi nuklida ²⁴¹Am (59,5 keV); ¹³⁷Cs (661,6 keV); dan ⁶⁰Co (1173 keV dan 1332 keV).

3.3.2 Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui efisiensi cacahan detektor dari energi gamma yang dipancarkan masing-masing radionuklida. Nilai efisiensi cacahan detektor yang diperoleh untuk masing-masing energi gamma selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi nuklida di dalam cuplikan. Untuk dapat melakukan kalibrasi efisiensi dibutuhkan sumber standar dengan kondisi pencacahan yang sama, yaitu wujud, geometri, energi gamma yang dipancarkan, dan

waktu pencacahan yang sama dengan pencacahan cuplikan. Untuk kalibrasi efisiensi digunakan material standar cair Holmium-166m yang merupakan nuklida pemancar gamma multi energi. Material standar digunakan untuk membuat grafik efisiensi sebagai fungsi energi. Nilai efisiensi ini dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi masing-masing nuklida yang teridentifikasi.

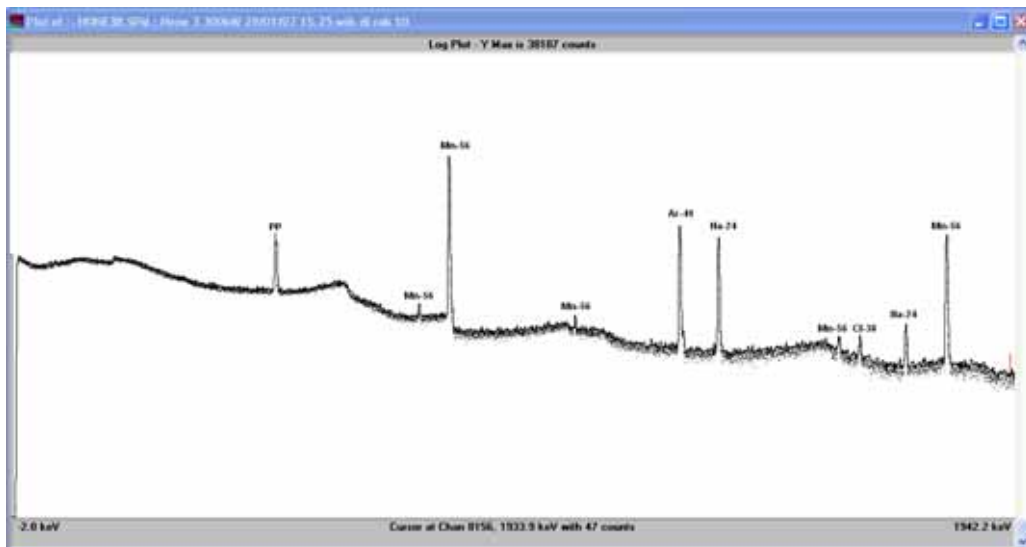
3.3.3. Identifikasi Nuklida

Identifikasi radionuklida di dalam cuplikan didasarkan pada nilai puncak spektrum yang merupakan energi gamma karakteristik masing-masing nuklida. Nuklida di dalam cuplikan akan dikelompokkan ke dalam dua jenis yaitu nuklida hasil aktivasi dan nuklida hasil fisi. Kebocoran pada kelongsong elemen bakar diindikasikan dari terdeteksinya nuklida hasil fisi di dalam cuplikan air rendaman elemen bakar setelah iradiasi. Adapun nuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator kebocoran adalah golongan gas mulia karena kemudahannya lepas dari matrik elemen bakar. Gas mulia hasil fisi yang digunakan sebagai indikator kebocoran adalah Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m dan Xe-135. Teridentifikasi nuklida Xe-138 (258 keV), Kr-87 (403 keV), Kr-88 (196 keV), Kr-85m (151 keV) dan Xe-135 (249 keV) atau anak luruhnya di dalam cuplikan air rendaman elemen bakar setelah iradiasi akan menjadi indikator rusaknya integritas kelongsong.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji cicip panas dilakukan dengan mengiradiasi elemen bakar dalam tabung berisi air murni. Seluruh komponen uji cicip panas yaitu tabung, air, dan elemen bakar akan teradiasi. Untuk memastikan nuklida yang teridentifikasi dalam air hanya yang berasal dari elemen bakar maka sebelumnya dilakukan iradiasi tabung yang hanya berisi air tanpa elemen bakar. Pada Gambar 6 diperlihatkan spektrum gamma dari cuplikan air hasil iradiasi tabung tanpa elemen bakar. Pada spektrum diperlihatkan puncak energi gamma dari nuklida Mn-56, Na-24, Cl-58, dan Ar-41. Nuklida tersebut seluruhnya adalah hasil aktivasi netron, baik aktivasi dari unsur-unsur di dalam bahan kelongsong maupun mineral yang larut di dalam air.

Elemen bakar yang berada di teras reaktor satu persatu diuji cicip, jumlah elemen bakar yang diperiksa adalah 107 buah. Cuplikan air rendaman elemen bakar sebelum iradiasi diambil dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma. Salah satu contoh spektrum gamma dari cuplikan air rendaman elemen bakar sebelum diiradiasi diperlihatkan pada Gambar 8. Gambar 8 merupakan spektrum gamma dari cuplikan air rendaman elemen bakar No.7874 sebelum diiradiasi. Pada spektrum diperlihatkan puncak dari nuklida Co-60 dan Cr-51. Keduanya merupakan nuklida hasil aktivasi dengan umur paro yang panjang.



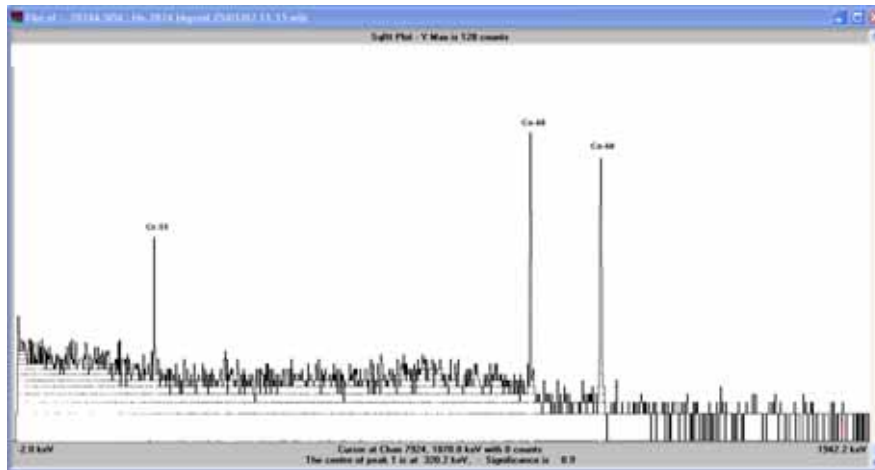
Gambar 7. Spektrum gamma cuplikan air tanpa elemen bakar

Keberadaan nuklida Co-60 dan Cr-51 dimungkinkan akibat kontaminasi pada kelongsong elemen bakar yang larut ke air rendaman pada saat pengadukan.

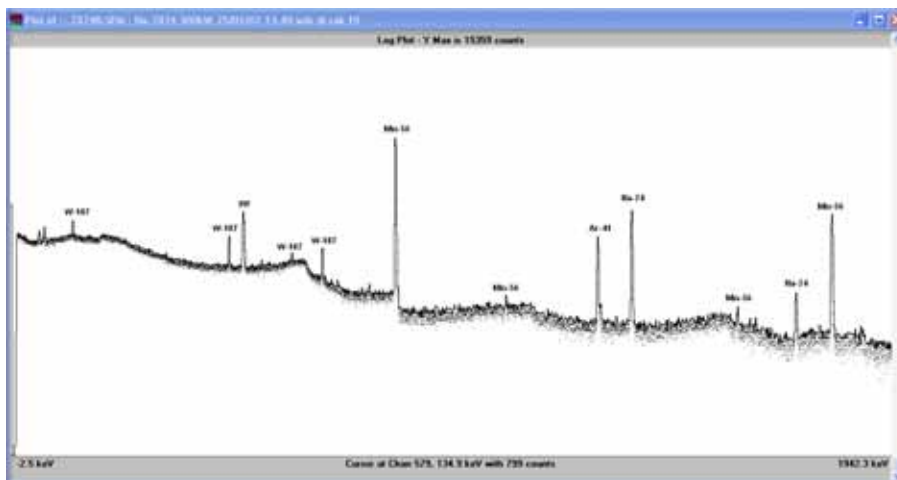
Spektrum gamma dari cuplikan air rendaman elemen bakar No.7874 setelah iradiasi diperlihatkan pada Gambar 8. Dalam spektrum tampak puncak nuklida W-187, Mn-56, Na-24, Ar-41 yang seluruhnya merupakan nuklida hasil aktivasi. Nuklida W-187, Mn-56, dan Na-24 merupakan hasil aktivasi unsur di dalam bahan kelongsong, sedangkan Ar-41 merupakan hasil aktivasi gas argon, salah satu gas mulia yang banyak larut di dalam air.

Dari spektrum cuplikan elemen bakar No.6713 setelah iradiasi yang diperlihatkan pada Gambar 10, tampak puncak nuklida hasil aktivasi yaitu Mn-56, Na-24, Ar-41 dan juga

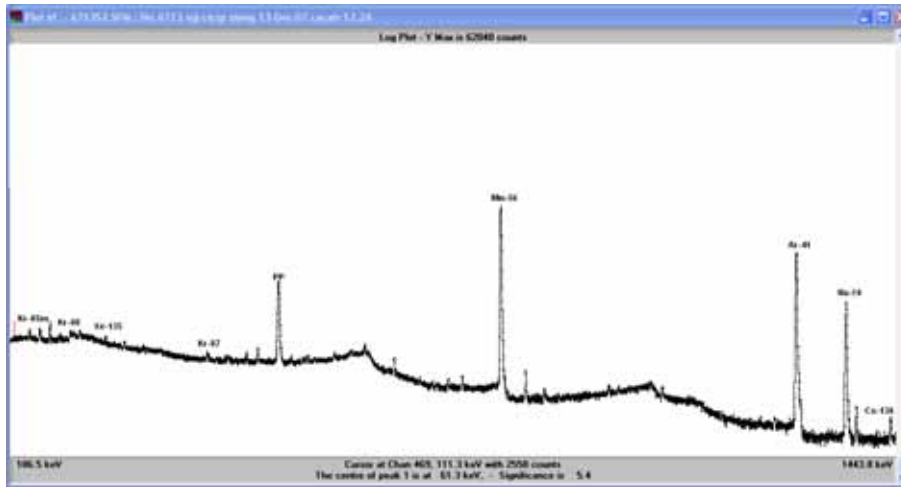
hasil fisi dari golongan gas mulia yaitu Kr-87, Kr-88, Kr-85m, Xe-135, dan Cs-138 yang merupakan anak luruh Xe-138. Umur paro gas mulia hasil fisi umumnya pendek, Xe-138 (14 menit), Kr-87 (1,3 jam), Kr-88 (2,8 jam), Kr-85m (4,5 jam) dan paling panjang Xe-135 (9,1 hari). Karena waktu paruh Xe-138 sangat pendek maka digunakan anak luruhnya yaitu Cs-138 yang memiliki umur paro yang sedikit lebih panjang (32,2 menit). Pencacahan dilakukan sesegera mungkin setelah pencuplikan agar nuklida yang berumur pendek tersebut masih dapat terdeteksi oleh spektrometer gamma. Untuk mendeteksi Xe-135 yang berumur paro panjang pencacahan dilakukan dalam waktu yang cukup lama. Dengan volume air rendaman 7,4 liter dan waktu iradiasi adalah 30 menit maka laju kebocoran maksimum adalah 3,2 Bq/detik.



Gambar 8. Spektrum gamma cuplikan elemen bakar No.7874 sebelum iradiasi



Gambar 9. Spektrum gamma cuplikan elemen bakar No.7874 setelah iradiasi



Gambar 10. Spektrum gamma cuplikan elemen bakar No.6713 setelah iradiasi

Tabel 1. Elemen bakar reaktor TRIGA 2000 yang terindikasi ada lepasan gas mulia

No.	No. Elemen	Fraksi bakar (%)	Konst. lepasan gas mulia (kBq/L)				
			Cs-138	Kr-87	Kr-88	Kr-85m	Xe-135
1.	6747	31,43	3,7 ± 0,7	< 0,1 ± 0,1	< 0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1
2.	6713	36,33	1,0 ± 0,1	0,9 ± 0,2	1,0 ± 0,3	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1
3.	6696	39,27	0,3 ± 0,1	< 0,1 ± 0,1	0,5 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1

Dari 107 elemen bakar yang diperiksa terdapat 3 buah elemen bakar yang memiliki spektrum gamma dengan puncak energi gamma karakteristik beberapa gas mulia hasil fisi. Dua elemen bakar lainnya adalah nomor 6747 dan 6696. Teridentifikasi gas mulia hasil fisi di dalam cuplikan air rendaman ketiga elemen bakar tersebut (Tabel 1) mengharuskan ketiga elemen bakar tersebut dikeluarkan dari teras untuk dianalisis lebih lanjut guna memastikan sumber dari gas mulia.

Elemen bakar nomor 6747, 6696, dan 6713 di samping usianya yang sudah tua yaitu di atas 30 tahun juga telah memiliki fraksi bakar yang tinggi dengan nilai umumnya di atas 30%. Fraksi bakar dari elemen bakar sangat berpengaruh pada integritas kelongsong elemen bakar. Tingginya fraksi bakar menjadikan banyak hasil fisi terutama bentuk gas yang berada di dalam celah kelongsong-pelet. Dalam kondisi operasi, di dalam elemen bakar akan terbentuk gas-gas hasil fisi terutama gas mulia yang akibat adanya panas dan tekanan dapat berdifusi keluar dari pelet dan berkumpul di rongga antara pelet dengan kelongsong. Tekanan akan makin besar pada elemen bakar yang telah memiliki fraksi bakar tinggi

dikarenakan jumlah hasil fisi yang berupa gas yang sudah banyak. Kelongsong elemen bakar telah dirancang untuk menahan tekanan tersebut. Usia elemen bakar juga sangat berpengaruh karena kebocoran kelongsong elemen bakar dapat ditimbulkan oleh adanya korosi pada kelongsong akibat interaksi material kelongsong dengan air pendingin primer dalam waktu yang cukup lama [4,5].

Di samping fraksi bakar tinggi dan usia yang tua, kebocoran kelongsong juga dapat terjadi karena jenis material elemen bakar itu sendiri. Khusus untuk elemen bakar tipe UZr-H, keberadaan unsur hidrogen (H) di satu sisi dapat memberikan keunggulan yaitu sebagai moderator, tetapi di sisi lain hidrogen dapat lepas dari matrik pelet dan menambah beban tekanan di dalam kelongsong terutama pada suhu 650 °C [6]. Untuk itu kebocoran kelongsong elemen bakar TRIGA dapat juga terjadi pada elemen bakar yang masih memiliki fraksi bakar rendah.

Kegiatan pemeriksaan elemen bakar menggunakan metode uji cicip panas telah menunjukkan indikasi lepasan gas mulia dari 3 elemen bakar reaktor TRIGA 2000, yaitu nomor 6747, 6696 dan 6713 Elemen bakar tersebut

usianya yang sudah tua yaitu di atas 30 tahun juga memiliki fraksi bakar yang tinggi yaitu 31,43 %, 39,27 %, dan 36,33 %.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pemeriksaan elemen bakar reaktor TRIGA 2000 menggunakan metode uji cicip panas telah menunjukkan ada lepasan gas mulia dari kelongsong 3 elemen bakar yaitu nomor 6747, 6696, dan 6713.

Elemen bakar tersebut disamping usianya yang tua yaitu di atas 30 tahun umumnya juga memiliki fraksi bakar yang sudah tinggi yaitu 31,43%, 39,27%, dan 36,33%.

Analisis lebih teliti perlu dilakukan pada ketiga bahan bakar tersebut untuk mengetahui sumber dan penyebab lepasan gas mulia.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih secara tulus disampaikan kepada ibu Lenny bersama tim pencacah dari lab TAR bidang Senyawa Bertanda dan Radiometri, kepada ibu Eem Rukmini bersama tim pencacah dari lab ARL bidang Keselamatan dan Kesehatan, kepada seluruh personil uji cicip panas yang terdiri dari tim reaktor, tim proteksi radiasi, dan juga tim bengkel PTNBR atas semangat dan kerja

kerasnya hingga kegiatan ini dapat selesai dengan baik.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. **SUDJATMI K.A., RASITO, PUTRANTO ILHAM Y., DEDI SUMARNA**, Deteksi kebocoran elemen bakar reaktor TRIGA 2000 dengan metode uji cicip (Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir, Jakarta 2-3 Agustus 2006), BAPETEN, Jakarta (2007) 820-866.
2. **LANGER, S., dan BALDWIN, N.L.**, Fission Product Release Experiments on Uranium-Zirconium Hydride Fuels, Gulf General Atomic (1971).
3. **CHUNG, C., CHEN, C.Y., LIN, C.S., YEH, W.W., LEE, C.J.**, Rapid monitoring of gaseous fission products released from nuclear power stations, *Journals of Rad. Nuc. Chem.*, 233 (1-2), (1998) 281 – 284.
4. **IAEA**, “Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors” (Technical Report Series No.388), IAEA, Vienna (1998).
5. **SPENCER H.B.**, Irradiation Effects in Cladding and Structural Materials, Rowman and Littlefield Inc., New York (1965).
6. **SIMNAD, M.T.**, The UZr-H Alloy: Its Properties and Use in TRIGA Fuel, E-117-833, General Atomic (1980).