

**PENGARUH DAYA DAN DURASI OPERASI REAKTOR TERHADAP
KONSENTRASI ^3H DAN ^{14}C DI AIR SISTEM PENDINGIN PRIMER
REAKTOR RSG-GAS**

Pande Made Udiyani¹⁾, Subiharto²⁾, dan Nugroho L²⁾.

- 1). Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional
- 2). Pusat Reaktor Serba Guna - Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, Tangerang, 15310

Diterima editor 14 Desember 2009

Disetujui untuk dipublikasi 19 Pebruari 2010

ABSTRAK

PENGARUH DAYA DAN DURASI OPERASI REAKTOR TERHADAP KONSENTRASI ^3H DAN ^{14}C DI AIR SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR RSG-GAS. Telah dilakukan penelitian terhadap pengaruh daya dan durasi operasi reaktor terhadap konsentrasi ^3H dan ^{14}C dalam air sistem pendingin primer reaktor RSG-GAS. Keberadaan nuklida ^3H dan ^{14}C di dalam air sistem pendingin primer reaktor RSG-GAS merupakan hasil produk fisi dan aktivasi. Nuklida radioaktif ini mempunyai potensi bahaya radiasi interna dan eksterna, karena mempunyai umur paro yang panjang yaitu 12,26 tahun untuk ^3H dan 5568 tahun untuk ^{14}C , sehingga mempunyai dampak radiologis yang sangat berarti. Analisis dan pengukuran contoh cuplikan air pendingin primer dilakukan dengan menggunakan alat LSC (*Liquid Scintillation Counter*). Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh daya dan durasi operasi reaktor terhadap konsentrasi nuklida ^3H dan ^{14}C dalam air sistem pendingin primer, korelasi konsentrasi kedua nuklida dengan komponen sistem reaktor yang berkaitan dengan penuaan komponen, dan estimasi penerimaan radiasi terhadap pekerja radiasi di reaktor RSG-GAS dalam kaitan dengan keselamatan daerah kerja dan keselamatan personal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya konsentrasi ^3H dan ^{14}C di air sistem pendingin primer reaktor RSG-GAS sebanding dengan daya yang dibangkitkan dan durasi operasi reaktor. Pertambahan konsentrasi ^3H dan ^{14}C di kolam reaktor RSG-GAS yang pesat setelah lima tahun pertama operasi reaktor diperkirakan karena intensitas pengoperasian reaktor yang tinggi, dan adanya proses akumulasi nuklida yang mempunyai umur paro yang panjang. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk mengkaji keselamatan operasi reaktor, keselamatan personal, keselamatan kerja, dan proses penuaan reaktor.

Kata kunci : air pendingin primer, ^3H , ^{14}C , reaktor RSG-GAS

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF REACTOR OPERATION DURATION AND POWER TO CONCENTRATION OF ^3H AND ^{14}C IN PRIMARY COOLANT SYSTEM WATER RSG-GAS REACTOR. The influence of reactor power and operation duration on concentration of ^3H and ^{14}C in primary coolant water system RSG-GAS reactor has been studied. The existence of nuclides ^3H and ^{14}C in primary coolant system RSG-GAS reactor is a result of fission product and activation. These nuclides have potential internal and external radiation hazard, due to long half life i.e. 12,26 years and 5568 years for ^3H and ^{14}C respectively, so that will have significant radiological impact. Analysis and water sample measurement of the primary coolant system has been done by using LSC (*Liquid Scintillation Counter*). The objective of this research is to study the influence of reactor power and its operation duration to ^3H and ^{14}C concentration in coolant system, the correlation of these nuclide concentration with reactor system related to the component ageing, and estimation of receiving RSG-GAS reactor worker radiation for safety in working area and personnel safety. The results showed that ^3H and ^{14}C concentration in RSG-GAS reactor are proportional to the reactor power and its operation time duration. The fast increasing of ^3H and ^{14}C concentration in RSG-GAS reactor primary coolant system after the first five years operation might be caused by high intensity of reactor operation, and the accumulation of long half life nuclides. The results of this research can be used to study the reactor operation safety, personnel and working area safety, and also to study the reactor ageing process.

Key words: primary water reactor, ^3H , ^{14}C , RSG-GAS reactor

PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS adalah reaktor riset dengan daya maksimum 30 MW. Dengan semakin dioptimalkannya operasi reaktor berarti akan semakin banyak penelitian yang dilakukan. Pemanfaatan operasi reaktor di antaranya adalah iradiasi topaz, iradiasi sampel, produksi isotop, pengujian bahan bakar reaktor dan lain-lain. Selama pengoperasian reaktor maka dihasilkan juga berbagai nuklida radioaktif sebagai hasil aktivasi dan fisi. Nuklida radioaktif yang perlu diperhatikan adalah ^3H dan ^{14}C , karena kedua nuklida ini mempunyai umur paro yang panjang dan dampak radiologis yang cukup berarti. Umur paro ^3H adalah 12,26 tahun dan mempunyai energi maksimum 18,6 keV sedangkan umur paro ^{14}C adalah 5568 tahun dengan energi maksimum 456 keV [1,2]. Karena umur paro yang panjang tersebut, maka akan terjadi akumulasi konsentrasi ^3H dan ^{14}C di dalam air pendingin reaktor, sehingga aktivitasnya akan semakin tinggi sebagai fungsi durasi reaktor beroperasi. Oleh karena itu pengamatan dan pengukuran terhadap kedua unsur tersebut secara berkesinambungan sangat diperlukan karena dapat merupakan petunjuk tentang keadaan operasi reaktor. Sumber-sumber produksi ^3H di kolam reaktor adalah [3]:

- Pembelahan bahan bakar tingkat tiga
- Reaksi neutron terhadap unsur berilium yang digunakan sebagai reflektor
- Reaksi neutron dengan detrium yang terdapat dalam air
- Reaksi neutron dengan unsur lithium sebagai impuritas dalam material

Sumber-sumber produksi ^{14}C dalam kolam reaktor adalah :

- Reaksi $^{14}\text{N} (n,p) ^{14}\text{C}$
- Reaksi $^{16}\text{O} (n, ^3\text{He}) ^{14}\text{C}$
- Reaksi $^{17}\text{O} (n,\alpha) ^{14}\text{C}$
- Reaksi $^{235}\text{U} (n,\text{fissi}) ^{14}\text{C}$

Radionuklida ^3H dan ^{14}C adalah pemancar beta lemah, sehingga pengukurannya harus lebih spesifik, tidak bisa menggunakan alat pencacah dengan detektor khusus. Alat yang digunakan untuk mencacah ^3H dan ^{14}C adalah *Liquid Scintillation Counter (LSC)*, yang bekerja berdasarkan proses sintilasi [4]. Bagian dan prinsip kerja alat tersebut adalah detektornya berupa sintilator yang dihubungkan dengan tabung *photo multiplier* yang berfungsi untuk merubah peristiwa sintilasi dalam bentuk foton menjadi pulsa elektronik yang sebanding dengan tenaga foton.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh daya dan durasi operasi reaktor terhadap konsentrasi nuklida ^3H dan ^{14}C di air sistem pendingin primer, korelasi konsentrasi kedua nuklida dengan komponen sistem reaktor yang berkaitan dengan penuaan (*aging*) komponen, dan estimasi penerimaan radiasi terhadap pekerja radiasi di reaktor RSG-GAS dalam kaitan dengan keselamatan daerah kerja dan keselamatan personil. Manfaat dari penelitian ini adalah dapat digunakannya data hasil penelitian untuk mengkaji keselamatan operasi reaktor, keselamatan personil, keselamatan kerja, dan mengkaji proses penuaan reaktor. Dengan diketahuinya konsentrasi ^3H dan ^{14}C diharapkan sebagai masukan untuk penelitian aspek keselamatan bagi pekerja radiasi di reaktor, sehingga para pekerja radiasi dapat bekerja secara aman dan aspek keselamatan kerja dapat dipenuhi.

TEORI

Sebagai suatu hasil tangkapan neutron oleh isotop Hidrogen berat (Deutrium), yang kelimpahannya rendah di air primer, aktivitas Tritium rendah timbul dalam jangka panjang di air sistem primer. Nilai sebesar 1 mCi/m³ dapat diperoleh untuk menghitung konsentrasi aktivitas yang dihasilkan dari reaksi ini [3].

Laju reaksi pembentukan ³H dan ¹⁴C dihitung dengan rumus [4]:

$$R = N\sigma\phi \quad (1)$$

$$N = \frac{\rho}{A} N_A = \frac{\rho(\text{gr/m}^3)}{A(\text{gr/mol})} \times N_A (6,023 \times 10^{23}) \text{atom/mol} \quad (2)$$

$$\text{Aktivitas} = R \cdot \lambda \quad (3)$$

dengan,

R = laju reaksi (Ci/m³)

ρ = masa jenis (g/m³)

A = masa atom (atom/mol)

N_A = bilangan Avogadro (g/mol)

Σ = tampang lintang (cm²)

ϕ = fluks neutron termal (n/cm²s)

λ = konstan peluruhan (1/s)

Sumber-sumber produksi ³H di kolam RSG-GAS adalah [3]:

1. Pembelahan bahan bakar tingkat tiga ²³⁵U (n,f)³H
Tritium dihasilkan di *meat* bahan bakar melalui fisi termal. Hasilnya 1,22x10⁻⁴ atoms/fisi. Sebagai nilai empiris, konsentrasi aktivitas Tritium berjumlah sebesar 1 x 10⁻³ /m³.
2. Reaksi neutron dengan unsur lithium sebagai impuritas dalam material ⁶Li (n, α)³H
Pengotor Lithium di dalam teras-Al merupakan akibat dari nilai spesifikasi Al. Tritium yang kemudian terbentuk sebagai hasil dari reaksi ⁶Li(n, α)³H dengan neutron termal. Dengan demikian, laju pembentukan Tritium bergantung pada permukaan-Al yang ditempatkan di daerah fluks neutron, kerapatan fluks dan daerah *recoil*. Dengan mengasumsikan Lithium 10 ppm, konsentrasi aktivitas Tritium di pendingin primer dapat mencapai 5 x 10⁻³ Ci/m³.
3. Reaksi neutron terhadap unsur berilium yang digunakan sebagai reflektor ⁹Be (n,⁸Be)³H. Perhitungan ini menggunakan model perhitungan sederhana, yang dengan perhitungan pengaruh sumber γ menggunakan fraksi lain. Dengan demikian diasumsikan bahwa Tritium dari beryllium memasuki air kolam akibat recoil dan korosi. Nilai rerata laju abrasi materi tersebut adalah sebesar 10⁻⁴ g/dm² x jam. Laju disintegrasi dan hilangnya dari air secara realistis akibat dari penguapan digunakan untuk menghitung aktivitas di air kolam. Menurut model ini, setelah periode operasi yang lama dihasilkan konsentrasi aktivitas ~ 5 x 10⁻² Ci/m³ [3].
4. Reaksi neutron dengan deutrium (²H) yang terdapat dalam air ²H (n, γ)³H
Jumlah total Tritium di pendingin primer yang disebabkan oleh sumber-sumber yang berbeda dapat mencapai 7 x 10⁻² Ci/m³.

Sumber-sumber produksi ¹⁴C di kolam reaktor RSG-GAS adalah [3]:

1. Reaksi ¹⁴N (n,p) ¹⁴C
2. Reaksi ¹⁶O(n,³He,) ¹⁴C
3. Reaksi ¹⁷O(n, α) ¹⁴C
4. Reaksi ²³⁵U (n,fisi) ¹⁴C

Konsentrasi aktivitas C-14 di pendingin primer berjumlah 6 x 10⁻² Ci/m³ [3].

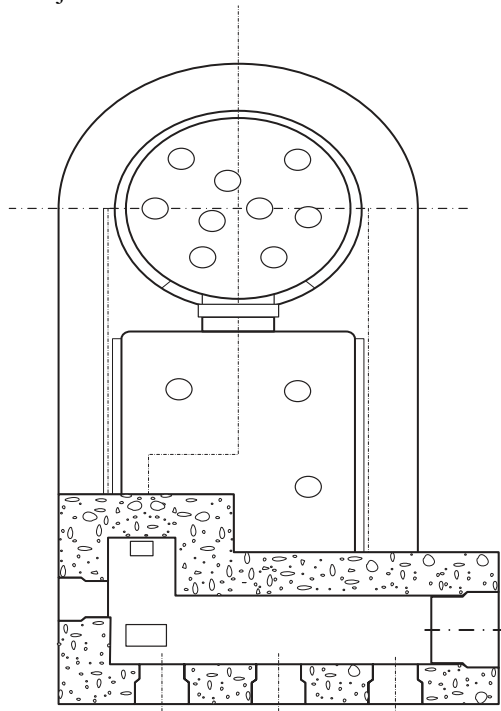
TATA KERJA

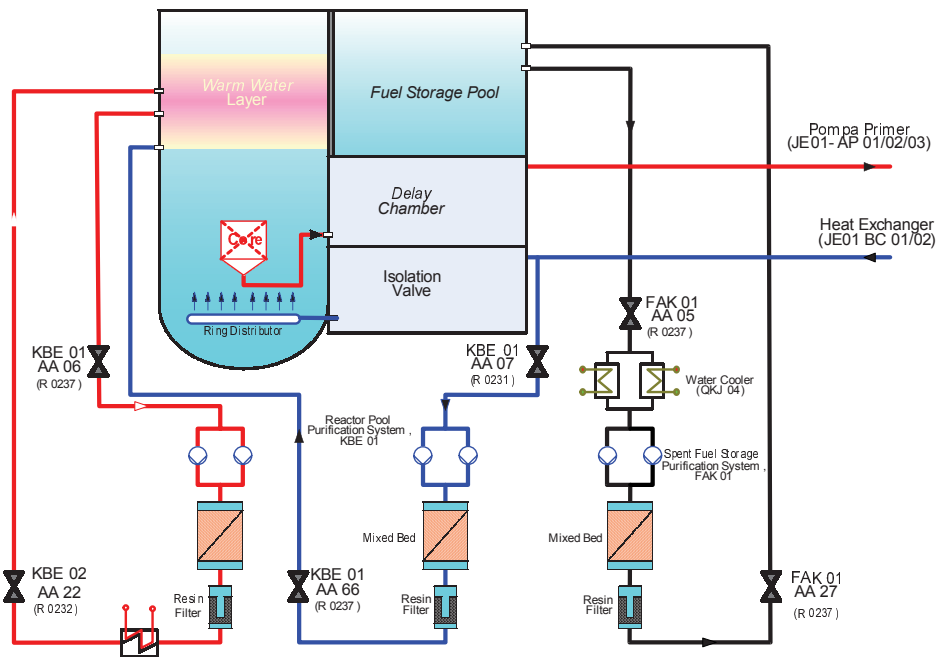
Alat dan Bahan Yang Digunakan [5,6]:

1. Alat yang digunakan untuk mencacah ^3H dan ^{14}C adalah pencacah kerlip cair, *Liquid Scintillation Counter (LSC)*
2. Sintilator digunakan sebagai solven detektor cair adalah *ready olv HP, high performance LSC*
3. Penampungan cuplikan (sampel) dipakai botol khusus vial berupa *poly Q vial*

Penyiapan pengambilan dan pencacahan Cuplikan

1. Pengambilan cuplikan dilakukan di kolam reaktor dan pipa-pipa pengambilan air pendingin primer di RSG-GAS. Pengambilan cuplikan sesuai dengan peta Gambar 1 dan Gambar 2.
2. Larutan sintilator sebanyak 10 ml dimasukkan ke dalam setiap vial yang sudah disiapkan
3. Cuplikan air cuplikan sebanyak 1 ml dimasukkan ke dalam vial yang sudah dituangkan sintilator
4. Vial ditutup dengan erat, kemudian vial dikocok agar larutan air dan sintilator tercampur merata dan homogen. Disimpan minimal 1 jam, kemudian dilakukan pencacahan selama 1 jam





Gambar 2. Peta lokasi pengambilan cuplikan air pendingin RSG-GAS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian meliputi analisis dan pengukuran terhadap *sample* air pendingin primer dan air kolam reaktor RSG-GAS. Pengambilan *sample* air pendingin primer dan air kolam reaktor RSG-GAS mengikuti peta lokasi pengambilan *sample* seperti Gambar 1 dan 2. Hasil perhitungan yang berdasarkan sumber-sumber ^3H dan ^{14}C di sistem pendingin air dan kolam RSG-GAS terdapat pada Tabel 1, korelasi konsentrasi ^3H dan ^{14}C dengan pembangkitan energi dan fluks neutron terdapat pada Gambar 3 sampai Gambar 6, dan korelasi dengan durasi operasi reaktor pada Gambar 7 dan Gambar 8. Hasil pencacahan dan analisis Tritium (^3H) dan ^{14}C untuk air pendingin primer RSG-GAS untuk operasi teras 67 terdapat pada Tabel 2

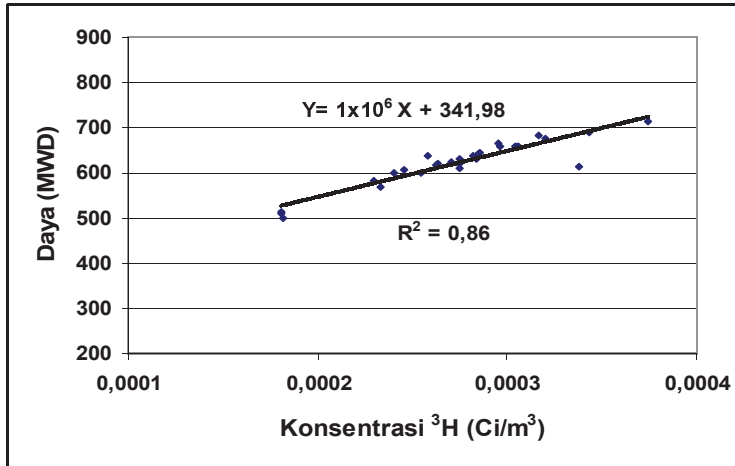
Berdasarkan persamaan (1-3), maka dihitung konsentrasi ^3H dan ^{14}C berdasarkan data riil operasi RSG-GAS dalam rentang waktu tahun 1999-2009 yang mencakup teras 37 sampai teras 67. Dari data riil pengoperasian reaktor selama rentang waktu 10 tahun dan teras 37 sampai teras 67, rata-rata pembangkitan daya dan durasi operasi untuk setiap teras adalah 500-700 MWD dan fluks neutron $\pm 2,3 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Berdasarkan data tersebut maka dihitung produk ^3H dan ^{14}C total untuk seluruh sumber produksi yang memungkinkan terjadi di air kolam RSG-GAS berdasarkan SAR (*Safety Analysis Report*) RSG-GAS untuk setiap teras. Hasil perhitungan terdapat pada Tabel 1. Konsentrasi ^3H dan ^{14}C dari Tabel 1, menghasilkan produksi untuk setiap teras yang berbeda, dipengaruhi oleh besarnya daya yang dibangkitkan dan durasi operasi reaktor serta fluks neutron termal yang dihasilkan untuk setiap operasi reaktor RSG-GAS.

Dari Tabel 1, dapat diketahui jumlah total pembentukan ^3H di kolam reaktor dari berbagai sumber untuk pengoperasian reaktor pada teras 37 sampai teras 67 (tahun 1999-2009), untuk kondisi pengoperasian rata-rata 13 MW mencapai $8,779 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$, dengan rata-rata untuk setiap teras $0,2926 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$. Menurut SAR pembentukan ^3H di kolam reaktor dari berbagai sumber bisa mencapai $7 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$ untuk kondisi pengoperasian reaktor sesuai desain dengan energi yang dibangkitkan mencapai 30 MW. Pembentukan ^{14}C didalam pendingin primer kolam reaktor RSG-GAS dari berbagai sumber untuk kondisi yang sama, mencapai $2,493 \times 10^{-1} \text{ Ci/m}^3$, dengan rata-rata setiap teras menghasilkan $0,8779 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$

Tabel 1. Hasil perhitungan produksi ^3H dan ^{14}C di kolam reaktor RSG-GAS pada rentang waktu operasi 1999-2009

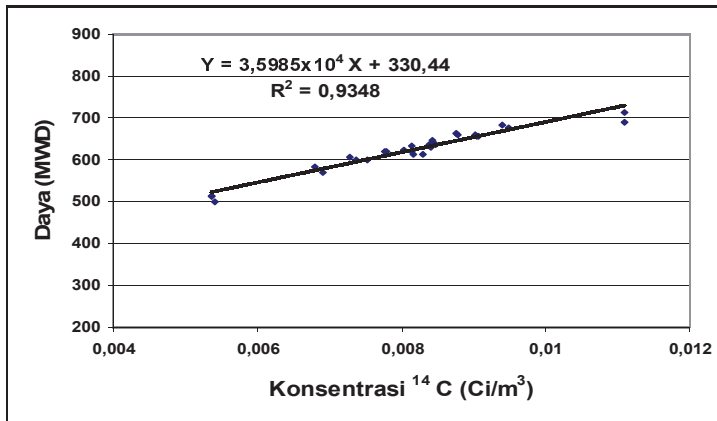
Teras rentang waktu Operasi [7]	Fluks neutron ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Energi (MWD)[7]	Aktivitas total ^3H (Ci/m^3)	Aktivitas total ^{14}C (Ci/m^3)
TERAS 37 (17/11/99 s/d 14/07/00)	$2,2937 \times 10^{14}$	612,690	$0,3380 \times 10^{-3}$	$0,8430 \times 10^{-2}$
TERAS 38 (15/07/00 s/d 12/12/00)	$2,2884 \times 10^{14}$	611,920	$0,2750 \times 10^{-3}$	$0,8175 \times 10^{-2}$
TERAS 39 (13/12/00 s/d 31/03/01)	$2,2512 \times 10^{14}$	601,435	$0,2400 \times 10^{-3}$	$0,7366 \times 10^{-2}$
TERAS 40 (01/04/01 s/d 06/07/01)	$1,8732 \times 10^{14}$	500,380	$0,1820 \times 10^{-3}$	$0,5418 \times 10^{-2}$
TERAS 41 (07/07/01 s/d 29/09/01)	$1,9191 \times 10^{14}$	512,630	$0,1809 \times 10^{-3}$	$0,5367 \times 10^{-2}$
TERAS 42 (30/09/01 s/d 22/01/02)	$1,9317 \times 10^{14}$	512,010	$0,1808 \times 10^{-3}$	$0,5364 \times 10^{-2}$
TERAS 43 (22/01/02 s/d 06/05/02)	$2,3516 \times 10^{14}$	623,290	$0,2705 \times 10^{-3}$	$0,8025 \times 10^{-2}$
TERAS 44 (07/05/02 s/d 13/08/02)	$2,1813 \times 10^{14}$	582,680	$0,2292 \times 10^{-3}$	$0,6799 \times 10^{-2}$
TERAS 45 (17/08/02 s/d 06/02/03)	$2,3821 \times 10^{14}$	636,320	$0,2826 \times 10^{-3}$	$0,8383 \times 10^{-2}$
TERAS 46 (07/02/03 s/d 06/06/03)	$2,1342 \times 10^{14}$	570,100	$0,2331 \times 10^{-3}$	$0,6915 \times 10^{-2}$
TERAS 47 (07/06/03 s/d 10/10/03)	$2,3166 \times 10^{14}$	618,820	$0,2621 \times 10^{-3}$	$0,7775 \times 10^{-2}$
TERAS 48 (04/10/03 s/d 10/02/04)	$2,3223 \times 10^{14}$	620,354	$0,2630 \times 10^{-3}$	$0,7801 \times 10^{-2}$
TERAS 49 (11/02/04 s/d 11/05/04)	$2,3857 \times 10^{14}$	632,338	$0,2745 \times 10^{-3}$	$0,8141 \times 10^{-2}$
TERAS 50 (12/05/04 s/d 03/08/04)	$2,3868 \times 10^{14}$	637,584	$0,2583 \times 10^{-3}$	$0,8464 \times 10^{-2}$
TERAS 51 (04/08/04 s/d 09/11/04)	$2,3757 \times 10^{14}$	629,671	$0,2836 \times 10^{-3}$	$0,8413 \times 10^{-2}$
TERAS 52 (10/11/04 s/d 08/03/05)	$2,2945 \times 10^{14}$	608,163	$0,2456 \times 10^{-3}$	$0,7286 \times 10^{-2}$
TERAS 54 (08/06/05 s/d 06/09/05)	$2,6882 \times 10^{14}$	712,508	$0,3739 \times 10^{-3}$	$1,1091 \times 10^{-2}$
TERAS 55 (07/02/05 s/d 20/12/05)	$2,4912 \times 10^{14}$	660,300	$0,3040 \times 10^{-3}$	$0,9016 \times 10^{-2}$
TERAS 56 (21/12/05 s/d 11/04/06)	$2,4189 \times 10^{14}$	641,136	$0,2848 \times 10^{-3}$	$0,8449 \times 10^{-2}$
TERAS 57 (12/04/06 s/d 14/07/06)	$2,5545 \times 10^{14}$	677,067	$0,3202 \times 10^{-3}$	$0,9497 \times 10^{-2}$
TERAS 58 (12/07/06 s/d 07/11/06)	$2,6076 \times 10^{14}$	691,139	$0,3435 \times 10^{-3}$	$1,0197 \times 10^{-2}$
TERAS 59 (08/11/06 s/d 09/02/07)	$2,2624 \times 10^{14}$	599,664	$0,2541 \times 10^{-3}$	$0,7536 \times 10^{-2}$
TERAS 60 (11/02/07 s/d 09/05/07)	$2,3257 \times 10^{14}$	621,263	$0,2745 \times 10^{-3}$	$0,8141 \times 10^{-2}$
TERAS 61 (10/05/07 s/d 28/08/07)	$2,5731 \times 10^{14}$	682,002	$0,3168 \times 10^{-3}$	$0,9397 \times 10^{-2}$
TERAS 62 (29/08/07 s/d 18/12/07)	$2,4834 \times 10^{14}$	658,221	$0,3057 \times 10^{-3}$	$0,9067 \times 10^{-2}$
TERAS 63 (19/12/07 s/d 25/03/08)	$2,4822 \times 10^{14}$	657,921	$0,3052 \times 10^{-3}$	$0,9053 \times 10^{-2}$
TERAS 64 (26/03/08 s/d 01/07/08)	$2,4079 \times 10^{14}$	638,245	$0,2835 \times 10^{-3}$	$0,8409 \times 10^{-2}$
TERAS 65 (02/07/08 s/d 28/10/08)	$2,5069 \times 10^{14}$	664,455	$0,2951 \times 10^{-3}$	$0,8752 \times 10^{-2}$
TERAS 66 (29/10/08 s/d 18/02/09)	$2,4337 \times 10^{14}$	645,060	$0,2853 \times 10^{-3}$	$0,8433 \times 10^{-2}$
TERAS 67 (19/02/09 s/d 26/05/09)	$2,4874 \times 10^{14}$	659,278	$0,2959 \times 10^{-3}$	$0,8779 \times 10^{-2}$
Total			$8,779 \times 10^{-3}$	$2,4393 \times 10^{-1}$
Rata-rata	$2,3023 \times 10^{14}$		$0,2926 \times 10^{-3}$	$0,8131 \times 10^{-2}$

Korelasi antara konsentrasi ^3H dengan daya yang dibangkitkan pada Gambar 3 menghasilkan persamaan korelasi linier dengan daya = $1,026 \times 10^6$ dan konsentrasi $^3\text{H} + 341,98$, dengan tingkat korelasi sebesar 86 %



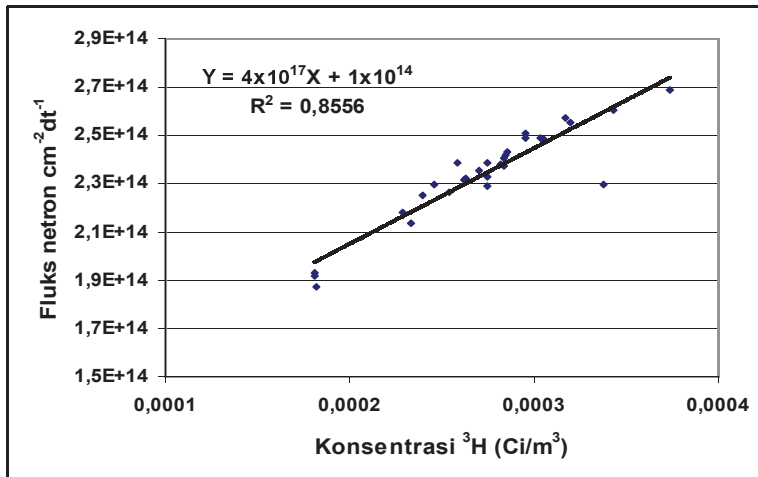
Gambar 3. Korelasi daya yang dibangkitkan dengan konsentrasi ³H

Korelasi ¹⁴C dengan daya operasi pada Gambar 4, memenuhi persamaan korelasi linier dengan daya = $3,5985 \times 10^4$ konsentrasi ¹⁴C + 330,44, dengan tingkat korelasi menghasilkan 93,5 %

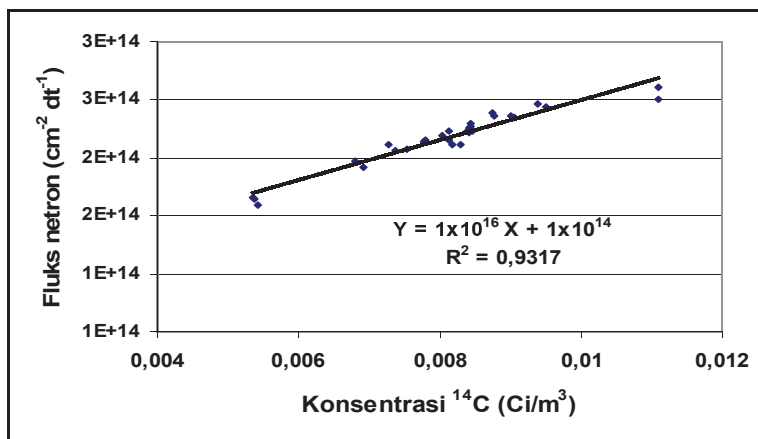


Gambar 4. Korelasi daya yang dibangkitkan dengan konsentrasi ¹⁴C

Korelasi antara konsentrasi ³H dengan fluks neutron pada Gambar 5 menghasilkan persamaan korelasi linier : Fluks neutron = $3,95 \times 10^{17}$, konsentrasi ³H + $1,26 \times 10^{14}$, dengan nilai korelasi sebesar 86,5 %. Sedangkan korelasi konsentrasi ¹⁴C dengan fluks neutron : fluks neutron = $1,38 \times 10^{16}$ dan konsentrasi ¹⁴C + $1,22 \times 10^{14}$, dengan korelasi 93 % seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.

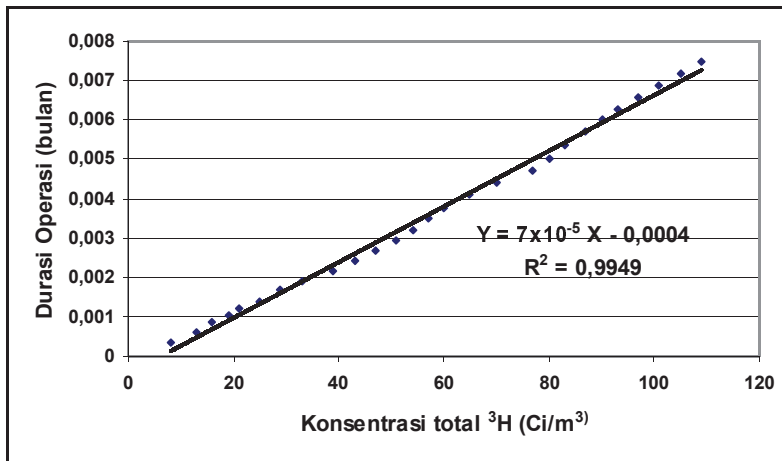


Gambar 5. Korelasi fluks neutron dengan konsentrasi ^3H

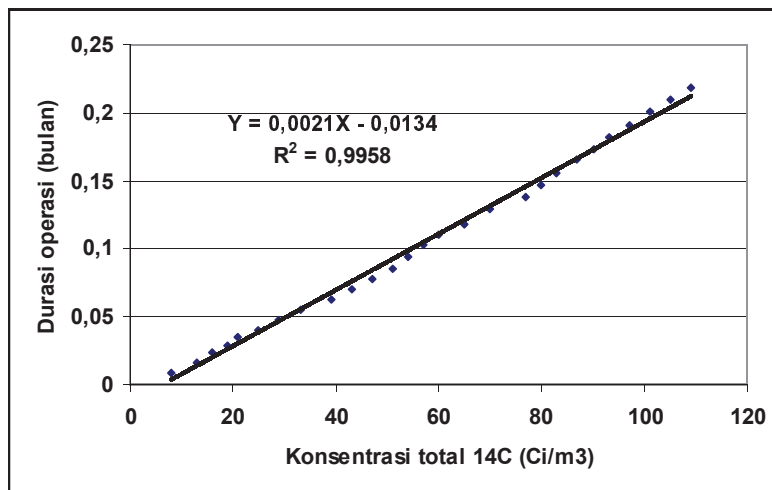


Gambar 6. Korelasi fluks neutron dengan konsentrasi ^{14}C

Korelasi antara konsentrasi ^3H dan ^{14}C dengan durasi operasi menghasilkan korelasi linier yang sangat tinggi, selain karena pengaruh lama operasi, juga karena akumulasi aktivitas umur paro yang panjang.



Gambar 7. Korelasi durasi operasi reaktor dengan konsentrasi ³H



Gambar 8. Korelasi durasi operasi reaktor dengan konsentrasi ¹⁴C

Pada Gambar 7 menghasilkan persamaan : durasi operasi = 7×10^{-5} dan konsentrasi total ³H - 0,0004, dengan nilai korelasi 99,5 %. Pada Gambar 8 memenuhi persamaan durasi operasi = 0,0021 dan konsentrasi total ¹⁴C - 0,0134 dengan korelasi 99,6 %.

Dari Gambar 3 sampai Gambar 8, konsentrasi ³H dan ¹⁴C bervariasi untuk setiap teras, terdapat korelasi linier yang kuat antara pembentukan ³H dan ¹⁴C dengan kondisi operasi reaktor untuk setiap teras (daya yang dibangkitkan, fluks neutron, dan durasi operasi reaktor). Korelasi aktivitas sebanding dengan daya yang dibangkitkan, durasi operasi reaktor, dan fluks neutron. Dari Tabel 1 pembentukan ³H terendah pada operasi reaktor teras 40 dengan kondisi daya yang dibangkitkan 500,380 MWD dan fluks neutron $1,8732 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dan pembentukan ³H tertinggi yaitu $0,3739 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$ pada operasi reaktor teras 54 dengan kondisi energi yang dibangkitkan sebesar 712,5078 MWD. Hal yang sama berlaku pada pembentukan ¹⁴C.

Tabel 2. Hasil pengukuran ^3H air kolam reaktor RSG pada teras 67

NO	Lokasi cuplikan	Konsentrasi ^3H Ci/m^3	Konsentrasi ^{14}C Ci/m^3
1	Kolam Reaktor Tengah	$1,0347 \times 10^{-2}$	$3,2109 \times 10^{-4}$
2	Kolam Reaktor Timur	$1,1075 \times 10^{-2}$	$5,3642 \times 10^{-4}$
3	Kolam Reaktor Barat	$1,1441 \times 10^{-2}$	$4,4599 \times 10^{-4}$
4	KBE 01 CR001 (sebelum filter)	$1,1276 \times 10^{-2}$	$4,8419 \times 10^{-4}$
5	KBE 01 CR001 (setelah filter)	$1,0723 \times 10^{-2}$	$5,1749 \times 10^{-4}$
6	KBE 02	$1,1125 \times 10^{-2}$	$5,3769 \times 10^{-4}$
7	KBE 02 AA 06	$1,1170 \times 10^{-2}$	$2,7899 \times 10^{-4}$
8	FAK 01 (kolam)	$1,186 \times 10^{-2}$	$4,8094 \times 10^{-4}$
9	FAK 01 AA 05	$1,0678 \times 10^{-2}$	$4,6355 \times 10^{-4}$
10	FAK 01 AA 27	$1,0598 \times 10^{-2}$	$4,9521 \times 10^{-4}$

Pengukuran ^3H dan ^{14}C pada operasi reaktor teras 67, dengan kondisi operasi reaktor untuk pembangkitan daya 659,278 MWD tercantum di Tabel 2. Pengukuran ^3H dan ^{14}C dilakukan pada posisi yang menginterpretasikan sebagai sumber-sumber penghasil ^3H dan ^{14}C di reaktor RSG GAS yang meliputi air pendingin primer KBE01 sebelum dan sesudah filter pemurnian, air pendingin primer KBE02 yang mewakili sistem lapisan air hangat (*warm water layer*) sebelum dan sesudah filter pemurnian, air kolam permukaan, air kolam di daerah penyimpanan bahan bakar sementara FAK 01 sebelum dan sesudah pemurnian. Lokasi pengambilan cuplikan sesuai dengan Gambar 1 dan 2.

Dari Tabel 2, konsentrasi rata-rata ^3H mencapai $1,1183 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$. Konsentrasi ini mewakili kondisi operasi RSG-GAS sampai teras 67, yang merupakan akumulasi dari ^3H selama reaktor RSG-GAS beroperasi. Sifat akumulasi terjadi karena umur paro dari ^3H cukup panjang yaitu : 12,36 tahun. Dari hasil perhitungan pada Tabel 1, pembentukan ^3H dari berbagai sumber pada kondisi operasi reaktor teras 67 sebesar $0,2959 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$, maka kondisi ^3H sebelum teras 67 (teras 1 sampai teras 66) mencapai $1,08871 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$. Jumlah total pembentukan ^3H dari teras 37 sampai teras 66 (rentang waktu 1999-2009) yang mencapai $8,4831 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$, maka pembentukan ^3H dari teras 1 - teras 36 (rentang waktu 1987-1999) mencapai $0,2699 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$. Dari penelitian sebelumnya diketahui bahwa konsentrasi ^3H sebelum komisioning RSG-GAS yang diukur pada bulan Juli 1987 kondisi ^3H sebesar $0,55 \times 10^{-8} \text{ Ci/m}^3$, dan konsentrasi setelah 5 tahun operasi (tahun 1992 pada teras 12) mencapai $1,9 \times 10^{-6} \text{ Ci/m}^3$ [8].

Dari perjalanan waktu pengoperasian RSG-GAS, penambahan ^3H sangat tinggi untuk setiap rentang waktu tertentu. Dari data yang terpapar dan sejarah pengoperasian reaktor RSG-GAS, penambahan ^3H sebanding dengan daya yang dibangkitkan, durasi operasi reaktor, dan kondisi sistem atau peralatan yang terpapar neutron menghasilkan ^3H .

Selain itu adanya efek akumulasi dari umur paro ^3H yang panjang, juga mempengaruhi konsentrasi ^3H di air kolam RSG-GAS. Kondisi peralatan dan sistem yang menghasilkan ^3H juga harus diperhatikan, karena kondisi ^3H dari beryllium memasuki air kolam akibat recoil dan korosi. Nilai rerata laju abrasi materi tersebut adalah sebesar $10^{-4} \text{ g/dm}^2 \times \text{jam}$. Laju disintegrasi dan hilangnya dari air secara realistis akibat dari penguapan digunakan untuk menghitung aktivitas di air kolam. Menurut model ini, setelah periode operasi yang lama dihasilkan konsentrasi aktivitas $^3\text{H} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$ [3], padahal jumlah total di pendingin primer yang disebabkan oleh sumber-sumber yang berbeda yang dapat mencapai $7 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$. Hal itu berarti 71 % pembentukan ^3H berasal dari beryllium memasuki air kolam akibat recoil dan korosi.

Meskipun konsentrasi ^3H masih di bawah kondisi maksimum yang diijinkan oleh SAR dan BAPETEN, tetapi perlu diperhatikan hal-hal yang mempengaruhi pembentukan ^3H di reaktor dikaitkan dengan kesiapan operasi reaktor, perencanaan waktu operasi yang akan datang, sistem pemurnian, sistem lapisan air hangat, dan kondisi peralatan seperti reflektor *beryllium*. Hal penting yang harus diperhatikan adalah lepasnya ^3H ke udara Balai Operasi Reaktor [9]. Seperti diketahui reaktor RSG-GAS adalah reaktor kolam terbuka, sehingga lepasnya gas-gas radioaktif dari air kolam terlepas ke udara permukaan kolam. Besarnya ^3H yang terlepas dari air kolam ke udara Balai Operasi RSG-GAS mencapai 17-20 % dalam kondisi lapisan air hangat beroperasi [10]. Jika kondisi saat ini konsentrasi ^3H pada air kolam reaktor $1,1183 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$, maka konsentrasi ^3H yang terlepas ke udara Balai Operasi dalam bentuk HTO (10) mencapai $0,1968 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$. Padahal batas maksimum yang diperbolehkan untuk para pekerja radiasi di Balai Operasi RSG-GAS adalah $2,96 \times 10^{-6} \text{ Ci/m}^3$ untuk penyinaran selama 2000 jam/tahun [11] Tritium adalah pemancar beta lemah yang masuk secara interna (imersi, inhalasi, dan ingesti), yang berbahaya bagi manusia. Bentuk Tritium dalam HTO adalah sangat berbahaya dibandingkan berbentuk terikat dengan air.^[12,13]

Sedangkan konsentrasi terukur rata-rata ^{14}C di dalam air pendingin primer RSG-GAS saat ini mencapai $4,5128 \times 10^{-4} \text{ Ci/m}^3$. Sifat akumulasi terjadi karena umur paro dari ^{14}C sangat panjang yaitu: 5568 tahun. Konsentrasi ^{14}C hasil perhitungan pada Tabel 1, sebesar $0,8779 \times 10^{-2} \text{ Ci/m}^3$, konsentrasi ^{14}C yang terukur masih di bawah laju reaksi pembentukan ^{14}C . Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, dengan konsentrasi ^{14}C sebelum komisioning RSG-GAS yang diukur pada bulan Juli 1987 sebesar $0,12 \times 10^{-7} \text{ Ci/m}^3$, dan konsentrasi setelah 5 tahun operasi (tahun 1992 pada teras 12) mencapai $0,95 \times 10^{-7} \text{ Ci/m}^3$ [8] maka konsentrasi ^{14}C terukur saat ini mengalami kenaikan yang tinggi. Konsentrasi ^{14}C sampai teras 67 tahun 2009 sudah melebihi batas kemungkinan terjadi di reaktor RSG-GAS menurut SAR ($6 \times 10^{-7} \text{ Ci/m}^3$), tetapi secara radiologis ^{14}C kurang berbahaya dibandingkan ^3H .

KESIMPULAN

Besarnya konsentrasi ^3H dan ^{14}C di air sistem pendingin primer reaktor RSG-GAS berkorelasi linier dengan dengan daya yang dibangkitkan, fluks neutron dan durasi operasi reaktor. Besarnya daya yang dibangkitkan sebanding fluks neutron yang terjadi di teras reaktor. Pertambahan konsentrasi ^3H dan ^{14}C di kolam reaktor RSG-GAS setelah lima tahun pertama operasi reaktor karena intensitas pengoperasian reaktor yang tinggi, disamping itu karena adanya proses akumulasi nuklida ^3H dan ^{14}C yang mempunyai umur paro yang panjang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Argonne National Laboratory, EVS. Tritium (Hydrogen-3), Human Health Fact Sheet; August 2005
2. Checev, V. P and Egorov, A. G. Search for an optimum approach to the evaluation of data of varying consistency: half-live evaluations for ^3H , ^{35}S , ^{55}Fe , ^{99}Mo , and ^{111}In . Appl. Radiat. Isot. 2000; 52: 601-608.
3. BATAN, Multipurpose Reactor GA Siwabessy. Safety Analisis Report Rev.9 2005

4. Oldenberg O., Rosmussen. *Modern Physics for Engineers*. New York: Mc. Graw-Hill; 1986.
5. Unterweger, M. P. and Lucas, L. L. Calibration of the national institute of standards and technology tritiated-water standards. *Appl. Radiation Isotop* 2000; 52: 527-531.
6. Verzezen, V. and Hurtgen, C. A multiple window deconvolution technique for measuring low-energy beta activity in samples contaminated with high-energy beta impurities using liquid scintillation spectrometry. *Appl. Rad. and Isotopes* 2000; 53: 289-296.
7. PRSG-BATAN. *Laporan Operasi RSG-GAS*, Serpong; 2009
8. Pande, M.U. Konsentrasi h3 dan c14 pada air sistem pendingin primer rsg-gas selama 5 tahun pertama operasi reaktor. *Proseding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. Yogyakarta; 1993
9. National research council. Board on radiation effects research, health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. The National Academies Press. Washington DC; 2006.
10. Pande, M.U., Bunawas, Budi R. Pengukuran konsentrasi tritium di udara reaktor Serbaguna G.A. Siwabessy. *Proseding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan*. Jakarta; 1994.
11. BAPETEN. *Ketentuan Keselamatan Kerja*. S.K. Ka.BAPETEN no.1. Jakarta; 2003
12. Cardis, E., et al. Risk of cancer after low doses of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *BMJ*. 2005 Jul 9; 331
13. Harrison J.D., Khursheed, A., Lambert, B.E. Uncertainties in dose coefficients for intakes of tritiated water and organically-bound forms of tritium by Members of the Public. *Radiat. Prot Dosim* 2002; Vol 98 No. 3 pp 299-311.