

ANALISIS AKTIVITAS ^{16}N (NITROGEN-16) DI SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR DAYA PWR-1000

Pudjianto MS

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: pudji_ms@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS AKTIVITAS N-16 DI SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR DAYA PWR-1000.

Reaktor nuklir berpendingin air bertekanan berdaya termal 3400 MW_t penghasil tenaga listrik dengan daya terbangkit neto 1117 MW_e, PWR-1000, adalah salah satu jenis reaktor daya untuk PLTN yang cukup intens dirembug untuk dibangun di Indonesia. PWR menggunakan air ringan biasa bertekanan sebagai pendingin primer yang menyerap bahang langsung dari teras reaktor untuk dikonversi menjadi energi kinetik dalam bentuk tekanan uap di pendingin sekundernya guna memutar turbin dinamo listrik. Isotop oksigen yang terkandung di dalam air pendingin primer akan menjadi radioaktif karena teraktivasi oleh neutron ketika bersirkulasi melewati teras reaktor dan aktivitasnya segera menurun ketika meninggalkannya. Serapan neutron oleh ketiga jenis isotop oksigen alami (^{16}O , ^{17}O dan ^{18}O) yang terikat dalam molekul air ringan biasa (H_2O) menghasilkan radionuklida baru yang ketika meluruh cenderung memancarkan foton gamma (γ). Reaksi $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ yang dihasilkan oleh iradiasi neutron cepat adalah yang paling penting dibanding dengan kedua isotop oksigen alami lainnya. Reaksi ini termasuk reaksi endotermis dengan tenaga ambang 10,2 MeV, yang memancarkan foton- γ bertenaga tinggi [2,739 (0,76), 6,1292 (69,0) dan 7,1151 MeV (5,01%)] dalam peluruhan radioaktif ^{16}N dengan umur paroh 7,13 detik. Proses ini dapat menyebabkan bangkitnya sinar- γ hasil aktivasi dalam jumlah yang cukup bermakna untuk terlepas dalam air pendingin primer. Dalam penelitian ini, dengan metode aktivasi dan peluruhan berulang, tingkat radioaktivitas ^{16}N di outlet teras, outlet bejana tekan, simpang tiga pipa ke pengatur tekanan, inlet dan outlet penukar bahang / pembangkit uap, pompa primer, inlet bejana tekan dan inlet teras terhitung berturut-turut adalah: 171, 157, 155, 152, 88, 87, 79 dan 68 $\mu\text{Ci}/\text{gram}$. Dengan menggunakan data energi foton- γ dan intensitas mutlaknya masing-masing, tingkat konsentrasi radioaktivitas dan volume sumber di berbagai tempat yang ditinjau, maka laju dosis radiasi- γ ^{16}N yang berasal dari tempat tersebut dapat diperhitungkan untuk tujuan desain keselamatan radiasi baik bagi sistem primer maupun personal (pekerja radiasi maupun masyarakat awam).

Kata kunci: PLTN, PWR-1000, fluks neutron cepat, sistem pendingin primer, foton gamma, aktivitas N-16.

ABSTRACT

ANALYSIS OF NITROGEN-16 ACTIVITY ON THE PRIMARY COOLING SYSTEM OF PRESSURIZED WATER REACTOR PWR-1000. Pressurized water-cooled nuclear reactor operated on 3400 MW_t thermal-power producing 1117 MW_e generated net electric power called generally PWR-1000, is one type of nuclear power reactor plants to be discussed and considered intensively enough to be built in Indonesia. PWR uses pressured ordinary light water as the primary coolant that absorbs heat directly from the reactor core to be converted into kinetic energy in the form of vapor pressure in the secondary coolant in order to drive an electric generator gas turbine. Oxygen isotopes contained in the primary cooling water will become radioactive due to neutron field when activated by circulating through the reactor core and decreases its activity when it left out. The neutron absorption by the three type of natural oxygen isotopes, namely ^{16}O , ^{17}O and ^{18}O , are bound in ordinary light water molecules (H_2O), which also dublicately functioned as a moderator, radiation shielding and the primary coolant, tend to emit gamma rays (γ) as the result of activation of the primary cooling water. Reaction of $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ produced by fast neutron to water as irradiation target is the most important compared with the two other natural oxygen isotopes. These reactions are included endothermic reaction with 10.2 MeV energy threshold, which tends to emit high-powered γ -rays [2.739 (0.76), 6.1292 (69.0) and 7.1151 MeV (5.01%)] in the radioactive decay chain of ^{16}N by half-life 7.13 sec. This process can lead to the rising of γ -ray activation results in significant numbers to be released in the primary cooling water. In this research, the results of the calculation of ^{16}N activity at the core outlet, pressure vessel outlet, junction pipe to pressurizer, inlet and outlet of heat exchangers or steam generators, primary pumps, pressure vessels inlet and core inlet are: 171, 157, 155, 152, 88, 87, 79 and 68 $\mu\text{Ci}/\text{gram}$ respectively. By using a set of known γ -photon discreted energies and its absolute intensities respectively, radioactivity concentration and total volume of sources in various places of interest, then the γ -radiation dose-rate of ^{16}N came from these place can be taken into account for purposes of radiation safety design for both the primary system and personal (radiation workers or peoples).

Keywords: NPP, PWR-1000, fast neutron flux, primary cooling system, photon-gamma, N-16 activity.

1. PENDAHULUAN

Sumber radiasi dalam sistem pendingin primer reaktor nuklir, pada umumnya berasal dari hasil belah yang terlepas dari bahan bakar nuklir (BBN) dan hasil aktivasi neutron terhadap zalir pendingin itu sendiri (air, H₂O) dan bahan pengotor dari hasil korosi yang terkikis dan terkandung di dalam zalir serta ikut bersirkulasi bersama di sepanjang sistem saluran yang dilewatinya (teras reaktor, dinding pipa, tabung tekan, pompa primer, dsb.)

Radioisotop nitrogen-16 (ditulis N-16 atau ¹⁶N) sebagai hasil aktivasi oksigen-16 (O-16 atau ¹⁶O) dengan neutron cepat menurut reaksi ¹⁶O(n,p)¹⁶N, adalah penyumbang utama pada aktivitas di pompa-pompa pendingin primer, penukar bahang / pembangkit uap, dan sistem pemipaan pendingin primer selama reaktor beroperasi. Aktivitas ¹⁶N di setiap komponen sistem tergantung pada tingkat daya reaktor / fluks neutron dan waktu transit total ke masing-masing komponen serta waktu tinggal rerata zalir tersebut di dalam komponen tersebut.

Dalam makalah ini, ditinjau sebuah reaktor daya generik jenis *Pressurized Water Reactor* (PWR) untuk PLTN dengan daya listrik terbangkit 1117 MW_e (untuk selanjutnya disingkat PWR-1000) berdaya termal 3400 MW_t, berbahan bakar nuklir (BBN) UO₂ dengan perkayaan rerata teras 3,393% U-235 dalam 157 perangkat elemen bakar nuklir (EBN) yang berisi 17×17=289 tabung BBN seberat total 95,975 ton dalam kelongsong zirkaloi seberat total 19,522 ton, bermoderator dan ber-pendingin air biasa, berperisai beton, & beroperasi nominal 18 bulan antar daur bongkar muat EBN dengan fraksi bakar 21000 MW·hari/ton-U^[4].

Oksigen alam yang terkandung di dalam air biasa sebagai pendingin primer reaktor PWR-1000 akan menjadi radioaktif karena teraktivasi oleh neutron ketika unsur ini dalam keterikatan kimiawi dengan unsur hidrogen membentuk molekul air bersirkulasi melewati teras reaktor dan melemah aktivitasnya ketika meninggalkannya. Serapan neutron oleh ketiga jenis isotop oksigen alamiah (¹⁶O, ¹⁷O dan ¹⁸O) yang terikat dalam molekul air ringan biasa (H₂O) yang sekaligus berfungsi rangkap sebagai moderator, perisai radiasi dan pendingin primer dalam teras reaktor nuklir pembangkit daya (PLTN) jenis PWR-1000, cenderung memancarkan sinar gamma (γ) hasil aktivasi dalam air pendingin primer tersebut. Sinar atau foton-γ ini disebut foton-γ sekunder, untuk membedakannya dengan foton-γ primer yang berasal dari proses pembelahan baik seketika maupun kasip dari inti-inti berat yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir sebagai akibat terinduksi oleh neutron (n termal: ²³⁵U fisiil atau n cepat: ²³⁸U fertil) di dalam teras reaktor. Contoh-nya sebagai berikut:

- 1). Reaksi ¹⁶O(n,p)¹⁶N yang dihasilkan oleh iradiasi neutron cepat dari air adalah yang paling penting. Reaksi ini termasuk reaksi endotermis dengan tenaga ambang 10,2 MeV, yang cenderung memancarkan sinar-γ bertenaga tinggi dalam peluruhan radioaktif berantai dari ¹⁶N. Proses ini dapat menyebabkan bangkitnya sinar-γ hasil aktivasi dalam jumlah yang cukup bermakna untuk terlepas dalam air pendingin primer.
- 2). Reaksi ¹⁷O(n,p)¹⁷N adalah juga termasuk reaksi endotermis dengan tenaga ambang 8,5 MeV. Reaksi ini agak sedikit khas, karena cenderung memancarkan neutron. Proses ini terjadi

karena hampir 95 % peluruhan beta dari ^{17}N menuju ke keadaan tereksitasi dari inti ^{17}O yang mempunyai tenaga yang lebih besar daripada tenaga ikat dari neutron terakhir dalam intinya. Karena inti ^{17}O seolah-olah terdiri dari inti ^{16}O yang terikat secara erat dan sebuah neutron yang “terselip secara bebas/leluasa”, maka neutron yang ikatannya seolah-olah “agak longgar” ini akan mudah dan segera terpancar keluar apabila ia mempunyai cukup tenaga untuk berperilaku demikian.

- 3). Reaksi $^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$ adalah termasuk reaksi eksotermis yang terjadi di seluruh rentang spektrum tenaga neutron hasil belah, dari termal sampai cepat. Reaksi ini merupakan sumber radiasi sinar- γ yang tidak begitu cukup bermakna apabila dibandingkan dengan reaksi $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$, karena kelimpahan isotopis dari ^{18}O begitu rendah ($\approx 0,204\%$) jika dibanding dengan ^{16}O ($\approx 99,8\%$). Selain daripada itu, juga disebabkan karena tenaga sinar- γ nya pun kurang begitu energetik^[1].

Aktivitas ^{16}N bukan merupakan faktor penentu dalam sumber radiasi untuk sistem dan komponen yang terletak di luar ruang pengungkung (sungkup, kubah) reaktor. Hal ini karena waktu parohnya yang nisbi singkat / pendek ($T_{1/2}$ hanya $7,13 \pm 0,01$ detik) dan lebih besar dari satu menit waktu transportasinya sebelum ia mengalir keluar dari ruang penyungkup reaktor. Jalur aliran luruh normal sepenuhnya berada di dalam ruang pengungkung. Pendingin primer diarahkan keluar ruang penyungkup hanya jika hendak dialih-pindahkan ke sistem limbah radioaktif cair saja (misalnya, karena operasi pengenceran boron atau untuk pengawasan sebelum reaktor *shutdown*).

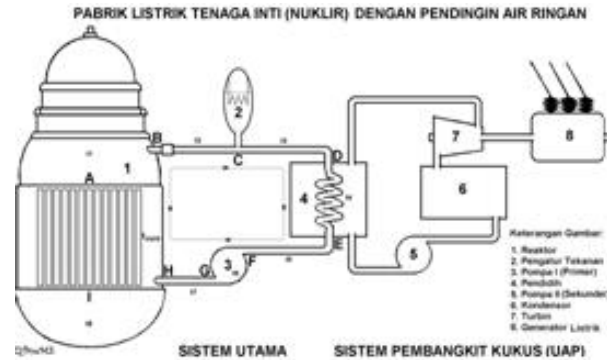
Sumber regeneratif dan sumber luruh dalam pesawat penukar bahang (PB) yang berfungsi sekaligus sebagai pembangkit uap (PU) termasuk sumbangan dari ^{16}N . Karena begitu pendeknya umur paroh radionuklida ini ($\sim 7,13$ detik), maka konsentrasi ^{16}N sangat peka terhadap lokasi pesawat PB/PU ini sehubungan dengan pemipaan simpal pendingin primer reaktor. Konsentrasi ^{16}N di dalam PB/PU ini nilainya diandaikan sama dengan yang ada di dalam pendingin reaktor ketika keluar dari pesawat PB/PU.^[1, 3]

Tujuan dari riset yang hasilnya tersaji dalam makalah ini terutama berkisar pada masalah penyelesaian tingkat konsentrasi radioaktivitas ^{16}N ($\mu\text{Ci/g}$) dalam zalir pendingin primer yang pasti dan takterhindari dibangkitkan oleh reaktor daya jenis PWR-1000 berdaya termal 3400 MW_t untuk PLTN yang menghasilkan daya listrik 1117 MW_e . Konsentrasi radioaktivitas ^{16}N ini dihitung sebagai fungsi waktu transport dalam simpal pendingin primer reaktor di berbagai lokasi tertentu yang dilewatinya, yaitu: 1) outlet teras, 2) outlet bejana tekan, 3) simpang tiga pipa ke pengatur tekanan, 3 inlet dan 4) outlet penukar bahang / pembangkit uap, 5) pompa primer, 6) inlet bejana tekan dan 7) inlet teras.^[1, 4]

Analisis radioaktivitas ^{16}N di sepanjang lajur sistem pendingin primer PWR-1000 ini akan ditentukan dengan metode analitik deterministik menggunakan kode komputer sederhana swakarya (produk lokal) dengan bahasa saintifik Fortran-77.

2. TEORI

Skema sistem sirkulasi ulang zalir pendingin primer dan sekunder untuk reaktor daya generik berpendingin air ringan biasa (H_2O) bertekanan jenis PWR-1000 untuk PLTN, ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skematika aliran pendingin primer dan sekunder tipe sirkulasi ulang tertutup sederhana di reaktor daya jenis PWR.

Gambar 1 melukiskan riwayat zalir pendingin primer yang mengalir dari teras reaktor di dalam tangki tekan (1), keluar dan masuk ke dalam sistem penukar bahang atau pembangkit uap (4) kemudian masuk lagi ke dalam teras setelah melalui pompa primer (3), dan seterusnya.

Perumusan untuk menghitung aktivitas jenis radionuklida ^{16}N (dan yang lain, jika perlu) yang terkandung dalam zalir pendingin primer reaktor daya jenis PWR-1000, dapat diturunkan secara singkat dan runtut dalam Deskripsi Sirkulasi Ulang Zalir Pendingin Primer Reaktor Daya PLTN jenis PWR [persamaan (1) s.d. (10)] sbb.^[1, 2, 3].

Di dalam air pendingin primer ini terkandung atom-atom biasa tipe X_1 tak radioaktif yang mewakili notasi untuk ^{16}O , yang setelah menderita paparan radiasi neutron di dalam teras reaktor berubah menjadi atom-atom radioaktif tipe X_2 yang mewakili notasi untuk ^{16}N . Besarnya aktivitas jenis dari zalir pendingin primer yang berasal dari radioisotop X_2 di titik ujung keluaran dari teras reaktor, setelah zalir pendingin ini menyelesaikan sekian kali daur dari untai simpal primer tertutup (sirkulasi ulang) zalir pendingin, akan ditentukan secara kualitatif dan kuantitatif. Persoalan ini dapat diselesaikan dengan cara langkah maju dengan menerapkan keadaan / syarat awal yang benar untuk sejumlah persamaan beda hingga yang sesuai. Cara / teknik ini mengurangi penggunaan metode matematika yang rumit dan sulit. Untuk melaksanakan perhitungan ini, diadopsi sebuah metode yang dititik-beratkan pada isi fisik dari permasalahan.

Dimisalkan α_i adalah aktivitas jenis total dari zalir pendingin di titik A setelah siklus ke- i , yang tersusun dari 2 (dua) bagian utama, yaitu:

- Pertambahan aktivitas jenis selama siklus ke- i ketika elemen volume zalir melewati teras reaktor karena mengalami iradiasi / aktivasi neutron sekaligus juga mengalami peluruhan.
- Aktivitas jenis total yang tersisa karena hanya mengalami peluruhan yang berada di ujung simpal paling akhir dari siklus ke- $(i-1)$ yang terdahulu (siklus sebelumnya).

2.1. Pembangkitan aktivitas jenis selama transit di dalam teras reaktor

Di dalam teras reaktor PWR-1000, ditinjau dari sudut pandang aktivitas yang semakin bertambah, hubungan antara atom-atom X_1 dan X_2 secara pasti dapat ditemukan sebagai berikut:

Dimisalkan $X_1(t)$ adalah konsentrasi atau banyaknya atom mantap X_1 (chi.: ^{16}O) yang berada di suatu waktu t per satuan volum dari zalir pendingin primer dengan tampang aktivasi neutron mikroskopis σ_{act} , dan tampang serapan neutron mikroskopis σ_1 .

Uraian mengenai cara yang akan dipakai antara lain adalah penggambaran metode eksperimen, perhitungan, sumber dan teknik pengumpulan data dan analisis data untuk memecahkan masalah yang akan diteliti, bila perlu diuraikan cara evaluasi data yang akan diperoleh (model matematik, rancangan atau statistik). Dengan metodologi ini dapat diperkirakan hasil penelitian yang akan diperoleh secara utuh.

2.2. Pengurangan aktivitas jenis karena peluruhan per siklus dari sistem.

a. Keadaan di luar teras reaktor (untai luar):

- Di sini atom-atom X_2 radioaktif dengan umur paroh $T_{1/2} = \ln 2/\lambda$ akan meluruh dengan faktor $\exp(-\lambda t_{out})$, di mana $t_{out} = t_1 + t_2 + \dots = T - t_{core}$ adalah waktu yang diperlukan bagi zalir pendingin primer untuk transit di luar teras reaktor, sedangkan jumlah atom-atom X_1 yang tak radioaktif sudah barang tentu tetap tak berubah (terhadap waktu). Jadi, di sini hanya ada proses peluruhan bagi radionuklida X_2 saja.

b. Keadaan di dalam teras reaktor (untai dalam):

- Pertama ditinjau atom-atom X_1 yang tak radioaktif: Selama tiap kali keluar dari teras reaktor, jumlah atom-atom X_1 yang tak radioaktif ini akan menurun dengan faktor $\exp(-\sigma_1 \phi t_{core})$. Di sini hanya terjadi proses aktivasi saja.
- Berikutnya, ditinjau atom-atom X_2 yang radioaktif: Selama tiap kali mengalir lewat teras reaktor, jumlah atom-atom X_2 yang masih ada (tersisa) dari siklus yang terdahulu $\{ke-(i-1)\}$ akan berkurang dengan faktor $\exp\{-(\lambda + \sigma_2 \phi) t_{core}\}$. Tampak bahwa di sini terjadi kedua proses secara berbarengan, yaitu baik aktivasi maupun peluruhan.

Ringkasan efek penurunan konsentrasi aktivitas pada kedua simpal primer di atas untuk X_1 dan X_2 yang diketahui bahwa selama satu daur lengkap dari untai pendingin (misalnya: dari titik A bersirkulasi sampai ke titik A lagi), atom-atom mantap X_1 berkurang dengan faktor:

$$f_1 = \exp(-\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}) \quad (1)$$

dan atom-atom radioaktif X_2 yang dihasilkan terdahulu pada siklus ke-($i-1$) juga berkurang dengan faktor:

$$f_2 = \exp\{-(\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core})\} \quad (2)$$

di mana $T = T_{sirk} = t_{core} + t_{out}$, adalah waktu satu daur atau perioda sirkulasi. Untuk reaktor daya jenis PWR, besarnya periode sirkulasi T dan waktu transit di setiap ruas simpal primer (t_1, t_2, \dots, t_n) diberikan dan dapat dilihat dalam Tabel 1, dengan catatan: nomer titik bisa berubah (bertambah atau berkurang), bergantung pada banyaknya titik pengamatan.^[1]

Tabel 1. Waktu transit zalir pendingin primer PWR-1000 per siklus sirkulasi ulang.

No. titik	Simpal Sistem Pendingin Primer pada PWR yang Dilewati Zalir	Notasi simbol
1.	Di dalam teras reaktor / reflektor (tong teras) yang berada di dalam tangki tekan (I → A)	t_{core}
2.	Di dalam tangki tekan, dari outlet teras dalam tangki tekan hingga ke outletnya (A → B)	t_1
3.	Di dalam pipa, dari outlet tangki tekan ke pesawat pengatur tekanan zalir (B → C), tidak masuk (hanya numpang lewat)	t_2
4.	Di dalam pipa, dari pesawat pengatur tekanan (PT) ke inlet pesawat penukar bahang (HE)/pembangkit uap (PU) (C → D)	t_3
5.	Di dalam pesawat penukar bahang HE/pembangkit uap (PU) (D → E)	t_4
6.	Di dalam pipa, dari outlet pesawat HE/PU ke inlet pompa primer (E → F)	t_5
7.	Di dalam pompa primer, dari inlet ke outletnya (F → G), tetapi waktunya nisbi amat singkat	t_6
8.	Di dalam pipa, dari outlet pompa primer ke inlet tangki tekan (G → H)	t_7
9.	Di dalam tangki tekan, dari inlet tangki ke inlet teras di dalam tangki tekan (H → I)	t_8
10.	Waktu transit di simpal eksternal sistem pendingin primer (A → I)	t_{out}
11.	Waktu total per siklus sirkulasi ulang (A → A lagi)	$T_{sirkulasi}$

Fluks neutron cepat ϕ_c diturunkan dari agihan fluks neutron termal ϕ_t untuk teras kerja tipikal (TWC) PWR-1000 dapat ditelusur atau dihitung.^[2]

Aktivitas jenis yang bertambah selama proses sirkulasi siklus pertama, dapat ditulis kembali di sini sebagai:^[1]

$$a = \alpha_1 = \frac{N_1^{(0)}(0) \cdot \sigma_{act} \cdot \phi \cdot \lambda}{\lambda + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \phi} \times \left[e^{-\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} - e^{-(\lambda + \sigma_2 \cdot \phi) \cdot t_{core}} \right] \quad (3)$$

dimana:

$N_1^{(0)}(0) = N_1^{(m=0)}(t=0) \equiv$ konsentrasi atau rapat cacah atom X_1 ($= {}^{16}\text{O}$) dalam air pendingin pada saat $t = 0$ di siklus awal ($m = 0$). Saat $t = 0$ ini diukur tepat ketika zalir pendingin keluar dari kisi teras reaktor, yaitu di titik lokasi A (lihat Gambar 1).

$\sigma_{act} \equiv$ Tampang aktivasi mikroskopis inti ${}^{16}\text{O}$;
 $= 0,000019$ barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) = nilai rerata terhadap spektrum fisi;^[1]

$\sigma_1 \equiv$ tampang serapan total mikroskopis inti ${}^{16}\text{O}$;
 $= 0,039$ barn, rerata terhadap spektrum fisi;^[6]

$\sigma_2 \equiv$ tampang serapan total mikroskopis inti ${}^{16}\text{N}$;
 $\approx 0,000000$ barn (kecil sekali, dianggap nol);

$t_{core} \equiv$ waktu iradiasi kolom air pendingin primer ketika berada di dalam teras aktif;
 $= t_{A\text{lagi}} - t_1 = 0,8$ detik (lihat Tabel 3).

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \equiv$ tetapan peluruhan radionuklida ${}^{16}\text{N}$ hasil aktivasi;
 $= \ln 2 / (7,13 \text{ detik}) = 0.0972156 \text{ detik}^{-1}$;

ϕ \equiv fluks neutron (d.h.i. yang cepat) yang akan ditentukan nilainya (dalam n/cm²/detik);

2.3. Perumusan rapat atom ¹⁶O

Konsentrasi atom $X_1 = {}^{16}\text{O}$ dalam molekul air (H₂O) murni pada suhu lokasi setempat, tepatnya dengan rapat massa ρ_{air} yang sesuai dengan suhu lingkungan yang ditinjau (d.h.i. suhu rerata teras reaktor), dihitung dengan formula:

$$N_1^{(0)}(0) = N_{\text{O-16}} = \epsilon_{\text{O-16}} \times n_{\text{O}} \times \frac{\rho_{\text{air}}}{M_{\text{air}}} \times N_{\text{Avo}} \quad (4)$$

dimana:

$\epsilon_{\text{O-16}} \equiv$ persen perkayaan alami isotop ¹⁶O;
= 99,762% (sisanya 0,038% ¹⁷O & 0,2% ¹⁸O)

$n_{\text{O}} \equiv$ banyaknya atom O dalam molekul air = 1;

$M_{\text{air}} \equiv$ berat molekul air = 2 $A_{\text{H-alam}}$ + 1 $A_{\text{O-alam}}$
= (2·1,00794+15,9994) = 18,01528 gmol;

$N_{\text{Avo}} \equiv$ Bilangan Avogadro;
= 0,602252 × 10²⁴ molekul/gmol;

2.4. Perumusan konsentrasi ¹⁶N di outlet TR

Aktivitas jenis radionuklida X_2 total di titik A, setelah tiap kali siklus dapat ditentukan secara rekursif dalam diagram blok pada Tabel 2.^[1]

Jadi, dengan tata-cara yang sama, konsentrasi aktivitas radionuklida X_2 di titik posisi A setelah mengalami sirkulasi ulang s.d. siklus ke- m adalah:

$$\alpha_m = a \cdot f_1^{m-1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 + (f_2 / f_1) + (f_2 / f_1)^2 \\ + (f_2 / f_1)^3 + ((f_2 / f_1)^4 \\ + \dots + (f_2 / f_1)^{m-1} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Deret di dalam tanda kurung kurawal {...} di ruas kanan dari persamaan (5) di atas dikenal sebagai sebuah “deret geometri progresif” dengan jumlah yang diketahui; oleh karenanya maka:

$$\alpha_m = a \cdot f_1^{m-1} \cdot \frac{1 - (f_2 / f_1)^m}{1 - (f_2 / f_1)} = a \cdot \frac{f_1^m - f_2^m}{f_1 - f_2} \quad (6)$$

Tabel 2. Diagram blok tingkat aktivitas jenis terubah dari radionuklida X2 (¹⁶N) di titik A per daur.^[1]

Akhir siklus sirkulasi	Notasi Aktivitas X ₂ (¹⁶ N)	Aktivitas "baru"	Aktivitas "lama"
pertama	α_1	$= a f_1^0$ $= a$	$+ 0 \cdot f_2$ (belum aktif)
ke-dua	α_2	$= a f_1$ $= a f_1$ $= a f_1^1 \times \{1 + (f_2/f_1)\}$	$+ \alpha_1 \cdot f_2$ $+ a f_2$
ke-tiga	α_3	$= a f_1^2$ $= a f_1^2$ $= a f_1^2 + a f_1 \cdot f_2 + a f_2^2$	$+ \alpha_2 \cdot f_2$ $+ (a f_1 + a f_2) \cdot f_2$

Akhir siklus sirkulasi	Notasi Aktivitas X_2 (^{16}N)	Aktivitas "baru" +	Aktivitas "lama"
		$= a f_1^2 \times \{1 + (f_2/f_1) + (f_2/f_1)^2\}$	
ke-empat	α_4	$= a f_1^3$ $= a f_1^3 + a f_1^2 \cdot f_2 + a f_1 \cdot f_2^2 + a f_2^3$ $= a f_1^3 \times \{1 + (f_2/f_1) + (f_2/f_1)^2 + (f_2/f_1)^3\}$	$+ \alpha_3 \cdot f_2$ $+ (a f_1^2 + a f_1 \cdot f_2 + a f_2^2) \cdot f_2$
ke-lima	α_5	$= a f_1^4$ $= a f_1^4 + a f_1^3 \cdot f_2 + a f_1^2 \cdot f_2^2 + a f_1 \cdot f_2^3 + a f_2^4$ $= a f_1^4 \times \{1 + (f_2/f_1) + (f_2/f_1)^2 + (f_2/f_1)^3 + (f_2/f_1)^4\}$	$+ \alpha_4 \cdot f_2$ $+ (a f_1^3 + a f_1^2 \cdot f_2 + a f_1 \cdot f_2^2 + a f_2^3) \cdot f_2$
... ke-enam dan seterusnya hingga ke- m (jenuh)			

adalah aktivitas jenis total dari zalir pendingin primer di titik ujung keluar dari teras reaktor setelah siklus ke- m . Persamaan ini dapat disajikan sebagai:

$$\alpha_m = \frac{N_1^{(0)}(0) \cdot \sigma_{act} \cdot \phi \cdot \lambda}{\lambda + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \phi} \times \left[e^{-\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} - e^{-(\lambda + \sigma_2 \cdot \phi) t_{core}} \right] \times \left[\frac{e^{-m \cdot \sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} - e^{-m \cdot (\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core})}}{e^{-\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} - e^{-(\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core})}} \right] \quad (7)$$

Dari sini dapat diperoleh sebuah rumusan kuantitatif untuk menyatakan aktivitas jenis maksimum bagi radionuklida tertentu khususnya ^{16}N , yang terkandung dalam zalir pendingin primer di untai eksternal setelah tercapai keadaan jenuh (untuk harga m yang cukup besar) jika serapan neutron oleh atom-atom X_1 dan X_2 diabaikan dibandingkan dengan peluruhan radioaktif dari X_2 .

2.5. Perumusan jumlah siklus optimal

Besaran α_m yang dinyatakan oleh persamaan (7) di atas, akan mencapai harga jenuh dan juga maksimum untuk siklus optimal ke- m , apabila turunan pertamanya terhadap m sama dengan nol. Jadi,

$$\alpha'_m = \frac{d\alpha_m}{dm} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dm} \left[e^{-m \cdot \sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} - e^{-m \cdot (\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core})} \right] = 0 \quad (8)$$

Setelah dijabarkan, ini terpenuhi untuk:

$$m_{max} = \frac{\ln \left(\frac{\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core}}{\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core}} \right)}{(\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core}) - (\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core})} = \frac{\ln(\lambda \cdot T + \sigma_2 \cdot \phi \cdot t_{core}) - \ln(\sigma_1 \cdot \phi \cdot t_{core})}{\lambda \cdot T + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \phi \cdot t_{core}} \quad (9)$$

2.6. Perumusan konsentrasi ^{16}N di berbagai titik lokasi yang ditinjau

Dengan mengkombinasi persamaan-persamaan di atas, maka aktivitas maksimum di outlet teras dapat ditentukan. Demikian pula (dengan memper-hitungkan lamanya waktu penundaan di setiap

ruas untai luar) seperti tertera pada Tabel 3, aktivitas di setiap titik ujung simpal yang lain dapat dihitung secara beruntun, dimulai dari titik A hingga ke A lagi sebagaimana dirumuskan secara gampang dan sederhana dengan metode peluruhan biasa sebagai:

$$A_i = \alpha_m \times \exp(-\lambda \cdot t_i) \quad (10)$$

dimana:

$\alpha_m \equiv$ aktivitas ^{16}N dalam zalir pendingin primer di titik ujung keluar dari teras reaktor setelah siklus ke- m , seperti dinyatakan oleh persm. (5) – (7) (cukup jelas);

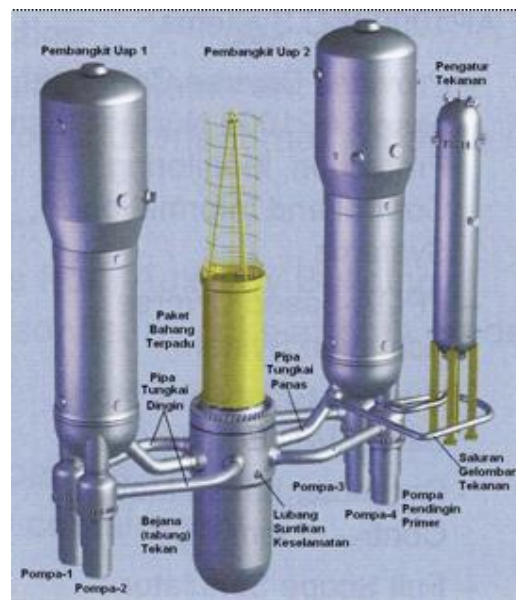
$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0,0972156 \text{ det}^{-1}$ (cukup jelas);

$t_i \equiv$ waktu transit zalir pendingin primer sejak keluar dari teras reaktor, seperti dinyatakan oleh Tabel 1 dan 3 (cukup jelas);

3. TATA KERJA (BAHAN & METODE)

Ditinjau pandangan isometrika simpal zalir pendingin primer reaktor PWR-1000 yang disulih dari AP1000 buatan Westinghouse Electric Co. seperti terlukis pada Gambar 2^[5].

Setiap unit reaktor daya PLTN ini mempunyai sebuah teras reaktor (TR) yang berada di dalam tangki atau bejana tekan (BT), dua buah sistem penukar bahang (PB) yang sekaligus berfungsi rangkap pula sebagai pembangkit uap (PU) dan sebuah pengatur atau penyeimbang tekanan (PT).



Gambar 2. Pandangan isometrika simpal (*loop*) zalir pendingin primer PWR-1000, dengan mengambil contoh AP1000.

Setiap unit PB/PU mempunyai sistem sirkulator air yang terdiri dari sebuah pipa penyalur air panas dari TR ke PB/PU, dua buah pipa penyalur air “dingin” dari PB/PU ke TR yang masing-masing didukung oleh sebuah pompa primer (PP). Jadi, seluruh sistem termohirolika reaktor PWR-1000 jenis ini didukung oleh empat buah pompa primer.

Suku-suku sumber regeneratif yang meningkat dan suku-suku sumber degeneratif yang meluruh dalam pesawat PB/PU ini termasuk sumbangan dari ^{16}N . Karena begitu pendeknya umur paroh radionuklida ini ($\sim 7,13$ detik), maka konsentrasi ^{16}N sangat peka terhadap lokasi PB/PU ini dalam hubungannya dengan pemipaan simpal pendingin primer reaktor. Seperti ditunjukkan dalam Tabel 3, konsentrasi ^{16}N di dalam pesawat PB/PU ini untuk sementara nilainya diandaikan, dianggap sama atau hampir sama dengan nilai yang semestinya dalam pendingin reaktor ketika keluar dari pesawat ini.^[4]

Beberapa nilai parameter PLTN penting untuk PWR-1000 ditinjau dari segi fisika / neutronika teras dan termohidrolika zalir yang diperlukan untuk memprediksi tingkat radioaktivitas ^{16}N di berbagai titik posisi diberikan dalam Tabel 4.^[4, 5]

Dalam penelitian ini, tingkat radioaktivitas ^{16}N di outlet teras, outlet bejana tekan, simpang tiga pipa ke pengatur tekanan, inlet dan outlet penukar bahang / pembangkit uap, pompa primer, inlet bejana tekan dan inlet teras dihitung menggunakan metode aktivasi dan peluruhan berulang dengan tahapan sebagai berikut:

3.1. Fluks neutron cepat rerata teras

Agihan rapat daya pembelahan di dalam teras aktif pada umumnya ditentukan dengan menerapkan kode / program komputer berdasar teori difusi banyak (> 4) atau sedikit (≤ 4) kelompok, yang ketelitian dari analisisnya diverifikasi dengan cara pengukuran langsung dalam teras pada saat reaktor beroperasi. Sementara agihan fluks neutron dan spektrum di berbagai variasi komponen struktur bervariasi secara bermakna dari teras hingga ke bejana tekan. Nilai representatif dari agihan fluks neutron dan spektrum energi 4 (empat) kelompok, termasuk fluks cepat yang akan digunakan untuk perhitungan aktivasi $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ disajikan pada Tabel 5.^[4] Dalam Tabel 5 ini ditunjukkan besarnya fluks neutron semua (keempat) kelompok energi, termasuk kelompok 1 (cepat) ditinjau dalam arah sumbu-z (aksial) di ujung atas teras tidak sama (sedikit lebih besar, kecuali kelompok termal) dengan di ujung bawah.

Dengan menganggap bentuk agihan fluks neutron khususnya kelompok 1 (cepat) arah aksial mengikuti pola cosinusoida dengan berpusat di $O(0,0)$ dan besarnya di kedua ujung atas teras (A) dan bawah teras (I) sama dengan nilai rerata dari keduanya, yaitu: $\frac{1}{2} \cdot (3,02+2,92) \cdot 10^{13}$ n/cm²/det = $2,97 \cdot 10^{13}$ n/cm²/det, maka posisi kedua titik ujung ini identik dengan panjang busur garis lintang yang besarnya adalah:

$$\begin{aligned}\zeta &= \arccos(\phi_{A=I}/\phi_{\text{maks}}) = \arccos(2,97/11,2) \\ &= \arccos(0.26517\dots) = 1,302407\dots \text{ rad} < \pi/2\end{aligned}$$

Jadi, fluks cepat rerata teras arah aksial-z dapat diperoleh dengan menghitungnya secara integral memakai rumus sederhana sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\bar{\phi}_{\text{cepat,z}} &= \frac{\int_0^{\zeta} \cos \varphi \, d\varphi}{\zeta} \times \phi_{\text{maks}} = \frac{\sin \varphi \Big|_0^{\zeta}}{\zeta} \times \phi_{\text{maks}} \\ &= \{\sin(1,3024\dots) / 1,3024\dots\} \times 11,2 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}\end{aligned}$$

$$= 0,7403209... \times 11,2 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}$$

$$= 8,2915... \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det} \text{ (di sepanjang sumbu-z)}$$

Berdasar nilai ζ dan panjang aktif elemen bakar nuklir (EBN) setinggi 14 ft (426,72 cm),^[4] maka tinggi teras aktif terekstrapolasi dengan adanya fluks cepat ini menjadi:

$$h = [(\pi/2)/\zeta] \times 426,72 \text{ cm} = 1,206... \times 426,72 \text{ cm}$$

$$= 514,65 \text{ cm}$$

Dengan langkah yang sama untuk arah radial sepanjang jejari r , posisi busur radialnya seyogyanya menggunakan pola polinomial Bessel derajat minimum 3, tetapi dalam hal ini secara pendekatan bisa menggunakan pola cosinusoida, yaitu:

$$\xi = \arccos(\phi_R/\phi_{\text{maks}}) = \arccos(3,86/11,2)$$

$$= \arccos(0,34464 \dots) = 1,21893... \text{ rad} < \pi/2$$

sehingga fluks reratanya dalam arah radial, $\bar{\phi}_{\text{cepat},r}$

$$= \{\sin(1,2189...)/1,2189...\} \times 11,2 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}$$

$$= 0,770124... \times 11,2 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}$$

$$= 8,6253... \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det} \text{ (di sepanjang sumbu-r)}$$

Berdasarkan kedua nilai rerata fluks cepat (arah aksial dan arah radial) ini, maka fluks cepat rerata teras diambil dengan menarik akar dari perkalian antara kedua nilai fluks masing-masing, yaitu:

$$\bar{\phi}_{\text{cepat}} = \sqrt{(8,2915... \times 8,6253...) \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}}$$

$$= 8,4567... \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}$$

Nilai fluks cepat rerata teras inilah yang akan digunakan untuk mengaktivasi ^{16}O menjadi ^{16}N .

3.2. Konsentrasi ^{16}O dalam teras

Dengan memperhatikan laju zalir total, rapat massa dan suhu air di inlet (kondisi dingin) dan di outlet (kondisi panas) BT seperti yang ditunjukkan oleh butir 3 s.d. 10 khususnya untuk bagian yang diarsir (butir 6 & 10) pada Tabel 4, yaitu:

1. Mulai dari outlet PB/PU hingga inlet BT:

$$Q_i = 19,87341 \text{ m}^3/\text{det}, \text{ dengan rapat massa}$$

$$\rho_i = 0,7507 \text{ g/cm}^3, \text{ pada suhu}$$

$$T_i = 280,67 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ dan}$$

2. Mulai dari outlet BT hingga inlet PB/PU:

$$Q_o = 22,514317 \text{ m}^3/\text{det}, \text{ dengan rapat massa}$$

$$\rho_o = 0,6671 \text{ g/cm}^3, \text{ pada suhu}$$

$$T_o = 321,11 \text{ }^\circ\text{C},$$

maka debit, rapat massa dan suhu di dalam teras untuk perhitungan aktivitas ^{16}N bisa diperkirakan besarnya dengan mengambil harga antaranya, yaitu rerata antara harga-harga di inlet dan outlet untuk besaran yang sesuai, yaitu:

$$Q_{rata} \approx \frac{1}{2} \cdot (Q_i + Q_o) = 21,1938635 \text{ m}^3/\text{det.}$$

$$\rho_{rata} \approx \frac{1}{2} \cdot (\rho_i + \rho_o) = 0,7089 \text{ g/cm}^3.$$

$$T_{rata} \approx \frac{1}{2} \cdot (T_i + T_o) = 300,89 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Pada suhu rerata ini (T_{rata}), tepatnya dengan rapat massa rerata ini (ρ_{rata}), konsentrasi isotop ^{16}O alam yang tak radioaktif dalam molekul air (H_2O) murni pendingin primer dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4).

$$\begin{aligned} N_{\text{O-16}} &= \epsilon_{\text{O-16}} \times \frac{P_{\text{air}}}{M_{\text{air}}} \times N_{\text{Avo}} \\ &= 99,762\% \cdot \frac{0,7089}{18,01528} \cdot 0,602252 \cdot 10^{24} \frac{\text{inti}}{\text{cm}^3} \\ &= \underline{\underline{2,36421712 \dots \times 10^{22} \frac{\text{inti}}{\text{cm}^3}}} \end{aligned}$$

3.3. Daur capaian aktivitas maksimum

Pertama, disajikan 4 parameter penting, yaitu:

1. Suku luruh (ingat, $T_{1/2}^{16\text{N}} = 7,13$ detik):

$$\begin{aligned} F_1 &= \lambda_{16} \cdot T_{\text{sirk}} \text{ (nir dimensi)} \\ &= (0,0972156 \text{ det}^{-1}) \cdot (10,3 \text{ det}) \\ &= 1,00132 \end{aligned}$$

2. Suku fluens:

$$\begin{aligned} F_2 &= \phi_{\text{cepat}} \cdot t_{\text{core}} \text{ (berdimensi zarah per luasan)} \\ &= (8,4567 \dots \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{det}) \cdot (0,8 \text{ det}) \\ &= 6,7654 \dots \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \end{aligned}$$

3. Tampang serapan total mikroskopis inti ^{16}O :

$$\sigma_1 = (0,039 \pm 0,004) \text{ barn (1 barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

4. Tampang serapan total mikroskopis inti ^{16}N :

$$\sigma_2 \approx 0,000000 \text{ barn (takterukur, dianggap nol)}$$

Dengan menerapkan persamaan (9), banyaknya daur sirkulasi tertutup air pendingin primer untuk mendapatkan nilai aktivitas ^{16}N maksimum, m_{max} , dapat diperoleh. Jadi,

$$\begin{aligned} m_{\text{max}} &= \frac{\ln\left(\frac{F_1 + \sigma_2 \cdot F_2}{\sigma_1 \cdot F_2}\right)}{F_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot F_2} \quad ; \quad \sigma_2 \approx 0 \\ &= \frac{\ln\left(\frac{1,00132}{0,039 \cdot 10^{-24} \cdot 6,7654 \cdot 10^{13}}\right)}{1,00132 - 0,039 \cdot 10^{-24} \cdot 6,7654 \cdot 10^{13}} \\ &= \frac{26,662 \dots}{1,00132 \dots} = 26,627 \approx \underline{\underline{27 \times \text{daur}}} \end{aligned}$$

3.4. Konsentrasi ^{16}N di berbagai titik lokasi pengamatan

Sebagai hasil akhir, dengan menggunakan pers. (7) dan (10), tingkat konsentrasi radioaktivitas ^{16}N di berbagai titik pengamatan dapat diperoleh dari perhitungan dan hasilnya disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 3. Posisi dan waktu transit kolom air pembawa ¹⁶N dalam simpal (loop) sirkulasi pendingin primer PWR-1000.^[5]

No. Titik	Posisi dalam Simpall primer	Waktu Transit (detik)
A	Keluar dari teras reaktor (TR)	0,0
B	Keluar dari bejana tekan reaktor (BT)	0,9
C	Sampai di simpang tiga PT	1,0~1,1
D	Masuk ke PB/PU	1,2
E	Keluar dari PB/PU	6,8
F	Masuk ke inlet PP	~ 6,9
G	Keluar dr outlet PP	~ 7,0
H	Masuk ke BT	8,0
I	Masuk ke TR	9,5
A _{lagi}	Keluar dari TR	10,3

Catatan:

Pada Tabel 3 ini, waktu ketika sampai di pipa simpang-3 pengatur tekanan (PT) tidak disebutkan eksakta tetapi hanya diperkirakan dan waktu ketika zalir masuk ke dalam dan keluar lagi dari dalam pompa primer (PP) dianggap sangat singkat dan sama dengan waktu ketika ia masuk ke dalam BT. Hal ini karena PP dan BT menjadi satu kesatuan yang tak terpisahkan oleh pipa penyalur zalir.

Tabel 4. Parameter penting di PWR-1000.^[4, 5]

No.	Parameter	Nilai besaran	Satuan
1.	Daya listrik “bersih” terbangkit	1117	MW _e
2.	Daya termal reaktor	3400	MW _t
3.	Suhu zalir di dalam pipa tungkai dingin, (1, 2, 3 & 4 sama) T _i	537,2 (280,67)	°F (°C)
4.	Rapat massa zalir dingin, ρ _i	0,7507 (fungsi suhu)	g/cm ³
5.	Laju zalir di dalam pompa primer dan pipa tungkai dingin, (1, 2, 3 & 4 sama)	78750 (17886,07) (4,968352987)	gpm (m ³ /jam) (m ³ /det)
6.	Laju zalir dingin total di inlet bejana tekan, Q _i	315000 (71544,28) (19,87341)	gpm (m ³ /jam) (m ³ /det)
7.	Suhu zalir di dalam pipa tungkai panas, (1 dan 2 sama) T _o	610,0 (321,11)	°F (°C)
8.	Rapat massa zalir panas, ρ _o	0,6671 (fungsi suhu)	g/cm ³
9.	Laju zalir di dalam pipa tungkai panas, (1 dan 2 sama)	177645 (40347,57) (11,2076583)	gpm (m ³ /jam) (m ³ /det)
10.	Laju zalir panas total di outlet bejana tekan, Q _o	355290 (80695,14) (22,514317)	gpm (m ³ /jam) (m ³ /det)

© 2011 Westinghouse Electric Co. LLC. All Right Reserved.

Catatan: beberapa konversi satuan asing penting

1 ft (feet, kaki) = 12 inch (inci); 1 inci = 2,54 cm;

1 gallon US = $3,7854118 \cdot 10^3 \text{ cm}^3 = 231 \text{ inci}^3 = 0,1336806 \text{ ft}^3$;

$^{\circ}\text{Celsius (C)} = 5/9 [x - 32]$, dimana x dalam $^{\circ}\text{Fahrenheit (F)}$.

Tabel 5. Aras fluks neutron tipikal (n/cm²/det) PWR-1000 pada daya penuh.^[4]

Lokasi Tinjauan	Klpok-1 (cepat)	Klpok-2 (menengah)	Klpok-3 (epitmal)	Klpok-4 (termal)
Pusat TR, di O(0,0)	$1,12 \cdot 10^{14}$	$1,76 \cdot 10^{14}$	$1,28 \cdot 10^{14}$	$5,47 \cdot 10^{13}$
Jejari luar TR, $\frac{1}{2} \cdot H$	$3,86 \cdot 10^{13}$	$6,08 \cdot 10^{13}$	$4,42 \cdot 10^{13}$	$1,83 \cdot 10^{13}$
Atas TR, di sumbu-z	$3,02 \cdot 10^{13}$	$4,75 \cdot 10^{13}$	$3,46 \cdot 10^{13}$	$2,17 \cdot 10^{13}$
Bawah TR, di sumbu-z	$2,92 \cdot 10^{13}$	$4,59 \cdot 10^{13}$	$3,34 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Lingkar ϕ_{in} BT	$4,71 \cdot 10^{10}$	$8,40 \cdot 10^{10}$	$5,56 \cdot 10^{10}$	$5,32 \cdot 10^{10}$

Catatan:

Rentang energi kinetik neutron hasil belah didefinisikan sbb.:

- i. Kelompok-1 (cepat): $1 \text{ MeV} \leq E < 10 \text{ MeV}$;
- ii. Kelompok-2 (menengah) : $5,53 \text{ keV} \leq E < 1 \text{ MeV}$;
- iii. Kelompok-3 (epitermal) : $0,625 \text{ eV} \leq E < 5,53 \text{ keV}$;
- iv. Kelompok-4 (termal) : $0 \leq E < 0,625 \text{ eV}$;

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Baris terakhir di Tabel 3 menunjukkan bahwa waktu total $1 \times$ daur (siklus) sirkulasi ulang tertutup zalir pendingin primer PWR-1000 ini lamanya hanya 10,3 detik, atau sekira 1/10 kali lebih kecil dibanding dengan 104 detik, yaitu waktu $1 \times$ daur sirkulasi zalir pendingin RSG-GAS berdaya penuh 30 MW_t di Puspipstek, Serpong, Tangerang Sel., Banten, Indonesia, yang beroperasi normal dengan debit $Q = 860 \text{ kg/detik}$.^[7, 8, 9]

Dengan menggunakan data parameter utama untuk PWR-1000 yang diperoleh dari penelusuran pustaka acuan dan data dukung lain yang dihitung ulang secara terpisah, dapat ditentukan besarnya konsentrasi tingkat radioaktivitas ¹⁶N dalam zalir pendingin primer di setiap titik lokasi pengamatan tertentu yang dirancang dan dituju dari awal. Sebagai hasil akhir, hasil perhitungan analisis ini tertera dalam Tabel 6.B dan 6.C, berdasar pada parameter pendukung yang tertera pada Tabel 6.A.

Tabel 6.B menunjukkan bahwa hasil analisis konsentrasi aktivitas ¹⁶N di setiap titik lokasi yang dimaksud ternyata nilainya 1,63 kali lebih rendah dibandingkan dengan data dari pustaka acuan. Hal ini disebabkan oleh nilai fluks neutron cepat yang mengaktivasi ¹⁶O hanya menggunakan kelompok 1 (cepat) saja dengan rentang energi $E \leq 821 \text{ keV} < 10 \sim 15 \text{ MeV}$ (letargi $0,4 \sim 0,0 < u \leq$

2,5), sementara kelompok 2 (menengah: $5,53 \leq E < 821$ keV atau $2,5 < u \leq 7,5$) dan kelompok 3 (epitermal: $0,625 \text{ eV} \leq E < 5,53$ keV atau $7,5 < u \leq 16,5581$) tidak diperhitungkan dalam analisis.

Tabel 6. Hasil perhitungan analisis aktivitas nitrogen-16 di berbagai titik pengamatan pada simpal pendingin primer reaktor daya PWR-1000.

A. Parameter fisika nuklir / reaktor yang diperlukan untuk perhitungan aktivitas ¹⁶N.

No.	Besaran / parameter fisika yang digunakan untuk menganalisis aktivitas radionuklida ¹⁶ N	Simbol besaran & rumusan fisika	Nilai besaran terhitung (I):	Nilai besaran terhitung (II):	Satuan ukur besaran
1.	Tingkat daya termal teras reaktor PWR-1000,	P_t	3400	= kasus I	Megawatt
2.	Fluks neutron cepat pukul rata teras,	$\phi_{c,bar}$	8,4567E+13	1.38E+14	n/(cm ² -det)
3.	Konsentrasi atom target (¹⁶ O) pra iradiasi,	$N_1 = N_{O-16}$	2,3642E+22	= kasus I	atom/cm ³
4.	Tampang serapan total mikroskopis inti ¹⁶ O,	σ_1	0,039 ± 0,004	= kasus I	barn
5.	Tampang aktivasi mikroskopis inti ¹⁶ O,	σ_{act}	0,000019	= kasus I	barn
6.	Tampang serapan total mikroskopis inti ¹⁶ N,	σ_2	≈ 0 (anggap)	= kasus I	barn
7.	Umur paroh radionuklida ¹⁶ N hasil aktivasi,	$T_{1/2}^{16N}$	7,13 ± 0,01	= kasus I	detik
8.	Tetapan luruh radionuklida ¹⁶ N hasil aktivasi,	$\lambda = \lambda_{N-16}$	9,7216E-02	= kasus I	per detik
9.	Fluens per siklus sirkulasi ulang,	$\phi_{c,bar} t_c$	6,7654E+13	1,1040E+14	neutron/cm ²
10.	Serapan neutron oleh ¹⁶ O per siklus,	$\sigma_1 \phi_{c,bar} t_c$	2,6385E-12	4,3056E-12	nondim
11.	Luruhan ¹⁶ N dalam teras per siklus,	λt_c	7,7772E-02	= kasus I	nondim
12.	Luruhan ¹⁶ N total per siklus,	λT_{sir}	1,0013E+00	= kasus I	nondim
13.	Serapan neutron oleh inti ¹⁶ N per siklus,	$\sigma_2 \phi_{c,bar} t_c$	0,0000E+00	≈ 0	nondim
14.	Luruhan + serapan inti ¹⁶ N per siklus,	$\sigma T_{sir} + \sigma_2 \phi_{c,bar} t_c$	1,0013E+00	1,0013E+00	nondim
15.	Siklus untuk mencapai aktivitas maksimum,	m_{max}	27	26	siklus
16.	Laju pertumbuhan radionuklida ¹⁶ N per siklus,	A_0	3,7988E+07	6,1990E+07	inti/(cm ³ -det)
17.	Faktor pengaktifan neutron,	f_0	7,4825E-02	7,4825E-02	nondim
18.	Faktor perlipatan siklus maksimum,	f_m	1,5808	1,5808	nondim
19.	Aktivitas maksimum ¹⁶ N di outlet teras,	$A_{max} = A_0 f_0 f_m$	4,4932E+06	7,3322E+06	Bq/cm ³
20.	Rapat massa air primer pada suhu ~300 °C	ρ_{air}	0,7089	= kasus I	gram/cm ³

B. Hasil perhitungan yang diperoleh.

No.	Titik Posisi	Posisi pengamatan aktivitas ¹⁶ N dalam air pendingin primer untuk $\phi_c = 8,4567 \cdot 10^{13}$ n/cm ² /det (kasus I)	Aktivitas, dalam Ci/m ³	μCi/gram, analisis	μCi/gram, acuan ^[4]
1.	A	Di outlet keluar dari TR, kisi bagian atas	1,2144E+02	171	280
2.	B	Di outlet keluar dari Bejana Tekan (BT)	1,1126E+02	157	256
3.	C	Di simpang-3 Pengatur Tekanan (PT), diperkirakan	1,1019E+02	155	-

4.	D	Di inlet masuk ke dalam pesawat PB / PU	1,0807E+02	152	249
5.	E	Di outlet keluar dari pesawat PB / PU	6,2698E+01	88	144
6.	F & G	Di inlet dan outlet pompa primer (PP), diperkirakan	6,1491E+01	87	–
7.	H	Di inlet masuk ke dalam BT	5,5795E+01	79	128
8.	I	Di inlet masuk ke dalam TR, kisi bagian bawah	4,8224E+01	68	122

C. Hasil perhitungan yang disesuaikan (untuk dibandingkan).

No.	Titik Posisi	Posisi pengamatan aktivitas ^{16}N dalam air pendingin primer bila $\phi_c = 1,38 \times 10^{14}$ n/cm ² /det (kasus II)	Aktivitas, dalam Ci/m ³	$\mu\text{Ci}/\text{gram}$, analisis	$\mu\text{Ci}/\text{gram}$, acuan ^[4]
1.	A	Di outlet keluar dari TR, kisi bagian atas	1,9817E+02	280	280
2.	B	Di outlet keluar dari Bejana Tekan (BT)	1,8157E+02	256	256
3.	C	Di simpang-3 pengatur tekanan (PT), diperkirakan	1,7981E+02	254	–
4.	D	Di inlet masuk ke dalam pesawat PB / PU	1,7635E+02	249	249
5.	E	Di outlet keluar dari pesawat PB / PU	1,0231E+02	144	144
6.	F & G	Di inlet dan outlet pompa primer (PP), diperkirakan	1,0034E+02	142	–
7.	H	Di inlet masuk ke dalam BT	9,1048E+01	128	128
8.	I	Di inlet masuk ke dalam TR, kisi bagian bawah	7,8694E+01	111(?)	122

Jika fluks neutron kelompok 2 (menengah) ikut diperhitungkan dalam analisis, yang setelah diubah dengan suatu faktor koreksi tertentu kemudian dijumlahkan bersama dengan kelompok 1 (cepat) sampai sebesar $1,38 \times 10^{14}$ n/cm²/det seperti tertera pada Tabel 6.C, maka hasil analisis pasti dan jelas akan sama dengan data acuan (kecuali di posisi I yang sedikit berbeda, meski ralatnya < 10 %).

5. KESIMPULAN

- Radioaktivitas tinggi yang terkandung di dalam semua sistem pendukung pendingin primer selain teras reaktor sendiri (yang semua juga bertekanan tinggi), tak semata-mata bersumber dari bocoran hasil belah inti berat di dalam teras, melainkan tak terhindari pasti ada dan muncul dari hasil aktivasi air pendingin primer itu sendiri dengan neutron yang berasal dari ^{16}N radioaktif sebagai hasil aktivasi ^{16}O tak aktif dengan neutron cepat yang menempati porsi terbesar dalam molekul air murni.
- Agihan aktivitas ini akan meluruh di sepanjang untai luar sistem primer sebagai fungsi waktu, debit dan daya reaktor dan meningkat kembali secara berulang ketika masuk ke dalam teras.
- Oleh karenanya, keselamatan operasi sistem primer PWR-1000 ini harus selalu terkendali dan dijaga dengan baik, benar, dan sinambung sesuai Protap, Juklak dan Juknis baku yang ada agar jangan sampai terjadi bencana / musibah yang tak diharapkan seperti pada kasus di Fukushima – Jepang beberapa waktu yang lalu. Semoga!

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Drs. Amir Hamzah, M.Si. yang telah membantu memberi informasi data PWR-1000 yang bersumber dari AP1000 Westinghouse

dan membantu pula dalam memberi dukungan moril dan materiil dalam mengatasi gangguan teknis dari perangkat keras (HD) dan lunak (kode) komputer yang digunakan untuk menyelesaikan makalah ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. James WOOD, Department of Nuclear Engineering, Queen Mary College, University of London, United Kingdom, Great Britain, "Computational Methods in Reactor Shielding", 1st edition, Pergamon Press, (1982), p.70-74, 188-190.
- [2]. John R. LAMARSH, Formerly of the Polytechnics Institute of New York Univ., United States of America, "Introduction to Nuclear Reactor Theory", 2nd edition, Addison Wesley Publ. Co, Inc., (1966), p.15-16.
- [3]. John R. LAMARSH, Formerly of the Polytechnics Institute of New York Univ., United States of America, "Introduction to Nuclear Engineering", 2nd edition, Addison Wesley Publ. Co, Inc., (1983), p.520-525, 530-531.
- [4]. J. L. WHITEMAN, et al, "AP1000 European Design Control Document", Chapter 4, 5 & 12, EPS-GW-GL-700, Rev- 1, Westinghouse Electric Company LLC, Nuclear Plant Projects, (2009).
- [5]. Yoneo SUZUMEGANO (General Manager New Plant Business, Japan & SEA), Larry CONWAY (Fellow Engineer), Rick SMITH (Business Development Manager), Gary URQUHART [Vice President & MD, India, SEA (Asia) and Taiwan], "AP1000 Technology Seminar by Westinghouse Electric Company and Toshiba Leading Innovation", Jakarta, Indonesia, July 13 (Wednesday), (2011), p.21 (Fig. 40 & 41).
- [6]. Editing Group of the ANL, "Reactor Physics Constants", ANL-5800, 1st edition, Argonne National Laboratory, PO Box 299, Lemont, Illinois, (July 1st, 1958), p.467-473.
- [7]. PUDJIJANTO MS, Unggul HARTOYO, Tukiyat, Sukino, Royani ABDULLAH, A. Lilik WINDARSIH, "Penentuan Paparan Radiasi di Permukaan Pipa Inlet / Outlet Aliran Pendingin Primer RSG-GAS Sebagai Fungsi Daya", Prosiding Hasil Penelitian PRSG 1995/1996, ISSN 0854-5278.
- [8]. PUDJIJANTO MS, "Penentuan Waktu Transport ^{16}N (Nitrogen-16) di Kolam Reaktor Serba Guna "G. A. Siwabessy", Prosiding Hasil-hasil Penelitian P2TRR tahun 1999/2000, ISSN-0854-5278.
- [9]. ANONAME (Interatom, GmbH), Dokumen MPR-30: "Penjelasan Umum Mengenai Sistem Pendingin Primer JE01 di Reaktor Serba Guna "G. A. Siwabessy", Revisi-0 (*preliminary draft*), OS Doc. Nr. 0075, ID Doc. Nr. 39.035.33, (1985).

DISKUSI/TANYA-JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Johnny Situmorang, PTRKN-BATAN)

- Apa alasan Anda dalam menghitung aktivitas N-16 di sistem pendingin primer PLTN PWR-1000 menggunakan istilah tahapan "siklus" (*#loop*, kalang, daur atau simpal tertutup) dan tidak menggunakan satuan waktu (misalnya: detik, menit, jam, hari, dst.)?

JAWABAN: (Pudjianto MS., PTRKN-BATAN)

- *Sebenarnya kalau dicermati, keduanya digunakan dan ada korelasinya antara satu dan yang lain; baik tahapan atau jumlah siklus, maupun waktu sesungguhnya dalam satuan yang sesuai. Siklus yang dimaksud di sini adalah kasus atau peristiwa perpindahan tampang irisan lintang cairan setebal Δx cukup tipis searah aliran air (pendingin) primer untuk berpindah (bersirkulasi) melalui kalang tertutup sampai kembali ke posisi semula. Lihat Gambar 1 dan Tabel 3, tampak elemen cairan keluar dari teras reaktor di titik A sampai kembali ke A lagi setelah menempuh jalur sistem primer dengan melewati terminal demi terminal (titik B, C, D, dst.), adalah satu siklus yang membutuhkan waktu hanya 10,3 detik. Cukup singkat memang menurut intuisi kita. Siklus demi siklus, detik demi detik, akan meningkatkan aktivitas radionuklida apa pun termasuk N-16 di titik-titik terminal manapun, sampai tercapai kondisi optimal ($\#siklus > 27$, aktivitas N-16 cukup ajêg, maksudnya tak miningkat &/ menurun secara signifikan).*

2. PERTANYAAN: (Sumijanto, PTRKN-BATAN)

- *Perhitungan aktivitas N-16 di sistem pendingin primer PLTN PWR-1000 yang Anda lakukan adalah berdasar teori formulasi matematik semata (bukan eksperimen). Kira-kira seberapa besar penyimpangan (ralat)-nya jika hal ini dihitung secara empirik (diukur secara riil di lapangan)?*

JAWABAN: (Pudjianto MS., PTRKN-BATAN)

- *Setiap fasilitas reaktor nuklir, baik untuk tujuan riset, penghasil radioisotop, diklat maupun pembangkit daya listrik (PLTN) khususnya PWR-1000 yang kita bahas di sini, jelas dan harus dilengkapi dengan piranti ukur apapun termasuk flowmeter dan monitor radiasi di setiap lokasi penting yang teramati dari jarak jauh yang aman dan selamat (secara remote sensing) baik di Ruang Kendali Utama, Darurat atau pun jauh di luar fasilitas. Kendalanya, piranti ukur dimaksud harus rutin dikalibrasi dengan baik dan benar. Di samping itu, harus memperhatikan kondisi anomali di lapangan yang bisa terjadi yang perlu diasumsikan perubahannya dengan metode pendekatan (bisa linier, kuadratis, eksponensial dsb.) yang dapat dirumuskan secara matematis dengan tetapan parameter yang diperoleh secara uji coba. Misalnya, dalam perhitungan teoretis, lempeng cairan setebal Δx dengan konsentrasi aktivitas yang sama dalam saluran manapun berbentuk datar (linier), padahal realita atau mestinya berbentuk lengkung gunung (kuadratis). Namun toh demikian, saya kira ralat /penyimpangan/perbedaan antara hasil perhitungan teoretis dan pengukuran eksperimen di lapangan tak lebih dari 3%.*