

PERHITUNGAN LEPASAN FRAKSIONAL HASIL BELAH BBN UO_2 REAKTOR DAYA PWR-1000 AKIBAT KEHILANGAN PENDINGIN PRIMER MENGGUNAKAN FRCRL2M1

Pudjijanto MS¹, Amir Hamzah¹, Ardani¹,
Anis Rohanda¹ dan Edi Triyono Budisantosa²

¹Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN), BATAN, Serpong

²Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB), BATAN, Yogyakarta

e-Surat: pudji_ms@batan.go.id

ABSTRAK

PERHITUNGAN LEPASAN FRAKSIONAL HASIL BELAH BBN UO_2 REAKTOR DAYA PWR-1000 AKIBAT KEHILANGAN PENDINGIN PRIMER MENGGUNAKAN FRCRL2M1. Lepas hasil belah bahan bakar reaktor nuklir (BBN UO_2) PWR-1000 dalam keadaan kehilangan pendingin primer yang dipostulasikan telah dihitung dengan program komputer FRCRL2M1 yang telah dikembangkan. Model matematis untuk lepasan hasil belah ini dirumuskan berdasar pada teori difusi volume sederhana dan pendekatan setara bola dari porositas bahan bakar. Baik komponen lepasan sebelum kecelakaan operasional maupun komponen lepasan selama kecelakaan yang disebabkan oleh transien termal, keduanya dihitung. Data suhu teras terinci diperlukan untuk menyusun sederetan perhitungan selanjutnya. Dengan metode ini diperoleh konsentrasi tertinggi lepasan dua hasil belah jenis volatil di celah sempit BBN berturut-turut sebesar $3,617 \times 10^{-1}$ g/cm³ untuk gas Xe dan $4,653 \times 10^{-1}$ g/cm³ untuk Iodium dari 12 jenis hasil belah tertentu pada saat pra kecelakaan dan dihitung pula lepasan dari sejumlah bahan bakar yang meleleh selama 1500 detik pasca kecelakaan. Dalam 500 detik ke-tiga pasca LOCA, ada 38 dari 110 elemen volum teras (34,54%) yang belum meleleh, sedangkan 72 sisanya (65,46%) dengan suhu tertinggi 1622 °C di zona radial ke-2 dan seksi aksial ke-6, meleleh. Pada suhu ini, laju pelepasan massa di dalam daerah elemen volume teras ini sebesar 4,6 gram/detik.

Kata kunci: hasil belah, air pendingin primer, lepasan fraksional, parameter Arrhenius

ABSTRACT

FRACTIONAL RELEASE CALCULATION OF FISSION PRODUCT FROM PWR-1000 NUCLEAR POWER REACTOR FUELED BY UO_2 IN THE LOSS OF COOLANT ACCIDENT CONDITION USING FRCRL2M1. The release of fission products from nuclear reactor fuel UO_2 for PWR-1000 under postulated loss-of-coolant accident conditions has been calculated using developed FRCRL2M1 computer program. The mathematical model for release is based on simple volume diffusion theory and the equivalent-sphere approximation of fuel porosity. Both the operational pre-accident release component and the accident core thermal transient-induced release component are calculated. Detailed core temperature data are needed to make the latter set of computations. The highest concentration of two types of volatiles as fission product releases in the narrow gap of NFE were 3.617×10^{-1} g/cm³ for Xe gas and 4.653×10^{-1} g/cm³ for iodine respectively have been calculated by this method from 12 specific types of fission product at the pre-accident time and a number of releases from the fuel that melts during 1500 seconds after the crash has been also calculated. In the third 500 sec. post-LOCA, there are 38 of the 110 elements of the core volume (34.54%) that has not melted, while the remaining 72 (65.46%) with the highest temperature of 1622 °C in radial zone-2 and axial section-6, melted. At this case, the mass release rate in the core area of the volume element was 4.6 g/sec.

Keywords: fission product, primary cooling water, fractional release, Arrhenius parameter

PENDAHULUAN

Beberapa jenis bahan hasil belah akan lepas dari batang-batang bahan bakar (BBN) apabila batang-batang BBN tersebut retak, pecah atau meleleh selama mengalami transien termal teras dalam kasus kecelakaan kehilangan zalir (zat alir, dalam hal ini adalah air ringan biasa berwujud cairan: H_2O) pendingin primer di sebuah reaktor nuklir pembangkit daya listrik (PLTN). Dalam disain keselamatan reaktor, penggunaan sistem pendingin teras darurat dimaksud untuk mencegah agar kelebihan suhu dari batang-batang BBN dirancang sedemikian sehingga berdasar pada pengalaman, sebagian besar hanya hasil belah jenis volatil (mudah menguap) saja yang dikecualikan untuk bisa/boleh terlepas keluar volume BBN secara cukup bermakna. Hasil belah volatil ini dipertimbangkan mengandung gas mulia, halogen dan kemungkinan juga logam alkali.

Seluruh hasil belah dibangkitkan dalam volume BBN UO_2 padat (pejal atau masif), oleh karena itu langkah pertama dalam proses pelepasan keseluruhan adalah lepas dari batang BBN itu sendiri. Tahap lepasan ini terdiri dari 2 (dua) komponen, yaitu: pertama, komponen lepasan pra kecelakaan dan ke-dua, komponen lepasan selama kecelakaan. Hasil belah berwujud volatil sebagian besar terlepas dari permukaan BBN UO_2 dan terkumpul dalam celah atau rongga gas pada batang BBN atau ruang *plenum*. Laju lepasan volatil ini dikendalikan oleh laju migrasi hasil belah melalui BBN pejal (masif atau padat) dan kemudian secara bermakna bergantung pada keadaan keluaran daya termal BBN. Penggunaan metode teori difusi sederhana digabung dengan pendekatan volume setara bola dari rapat BBN menyajikan nilai taksiran yang berguna dari lepasan volatil hasil belah. Metode ini digunakan sebagai dasar untuk menghitung komponen lepasan pra kecelakaan dalam perangkat lunak FRCRL2M1.[1]

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai Lepas hasil belah dari bahan bakar reaktor nuklir (BBN UO_2) PWR-1000 di dalam keadaan kehilangan pendingin primer yang dipostulasikan. Metode perhitungan komponen lepasan pasca (setelah) kecelakaan justru akan disajikan pertama kali, karena metode ini merupakan dasar teori pokok dari rutin program utama FRCRL2M1 dan perhitungan komponen lepasan pra (sebelum) kecelakaan, akan dilaksanakan oleh subprogram REGAP yang dipanggil oleh program utama FRCRL2M1. Program ini menyajikan gabungan antara 2 (dua) buah program terpisah yang telah ada sebelumnya, yaitu: FRACREL dan REGAP.[3]

TEORI

Masalah konvensional diselesaikan secara analitik dengan menggunakan teori difusi satu dimensi sebuah elemen bola. Untuk keadaan seragam dari komponen lepasan pra kecelakaan diandaikan melampaui daur operasi reaktor. Profil suhu radial parabolik untuk pelet (kapsul) BBN dihitung dan digunakan untuk mendefinisikan 5 (lima) zona atau daerah suhu radial untuk tiap ruas teras. Untuk ini pasangan data yang bersangkutan-paut dengan parameter lepasan nirdimensi, dihitung untuk sisipan dalam penyelesaian secara analitik. Untuk komponen lepasan pasca kecelakaan, perubahan suhu terhadap waktu dipertimbangkan dengan merubah secara bertahap parameter lepasan nirdimensi untuk setiap ruas teras. Perhitungan terkendala pada jumlah maksimum 12 jenis hasil belah, 10 zona teras radial dan 11 seksi teras aksial. Sejumlah data terpisah berupa nilai parameter difusi hasil belah harus dipasok juga sebagai data masukan untuk jangkauan suhu yang berbeda atau keadaan atmosferik yang diandaikan.

Perangkat lunak FRCRL2M1 ini menghitung lepasan fraksional kumulatif hasil belah dari BBN reaktor daya PWR-1000 yang berada di bawah keadaan kecelakaan kehilangan pendingin atau LOCA (*Loss Of Control Accident*). Model matematika untuk lepasan berdasarkan pada teori difusi volume sederhana dan pendekatan setara bola dari porositas BBN. Komponen lepasan pra kecelakaan dan komponen lepasan pasca (yang disebabkan oleh transien termal teras kecelakaan), keduanya dihitung. Data suhu teras terinci diperlukan untuk membuat sekumpulan hasil perhitungan selanjutnya. Sebagai

tambahan, beberapa faktor agihan daya teras spesifik dan sejumlah parameter difusi hasil belah harus dipasok sebagai data masukan pula.

A. Metode Perhitungan Komponen Lepas Hasil Belah pada Saat Kecelakaan

Pelelehan BBN sejak terjadi kecelakaan transien termal, dipertimbangkan sebagai suatu kemungkinan yang terbolejadi. Metode ini mampu menghitung lepasan hasil belah atas rentang suhu yang lebar. Dalam kasus kecelakaan yang dikendali oleh sistem pendingin teras darurat (SPTD), BBN akan segera mencapai suhu puncak yang lebih rendah daripada tanpa menggunakan SPTD.

Program FRCRL2M1 ini dirancang dan dimodifikasi untuk memasok nilai lepasan fraksional kumulatif hingga 12 jenis hasil belah dari setiap 110 elemen daerah teras reaktor (10 zona radial \times 11 seksi aksial) pada selang waktu tertentu. Lepasannya fraksional kumulatif per jenis hasil belah untuk seluruh teras juga dihitung. Sebagai tambahan, laju lepasan fraksional seketika untuk tiap jenis dapat digunakan dan jika data inventori massa dipasok maka laju lepasan massa juga dapat diperoleh.

Model komponen lepasan selama kecelakaan dibagi menjadi 3 (tiga) daerah suhu, yaitu: ①. $T < 1500$ °C, ②. 1500 °C $< T < T_{leleh}$ dan ③. $T > T_{leleh}$. Parameter lepasan hasil belah yang berbeda digunakan dalam setiap dari 110 elemen daerah teras ini dan parameter lepasan alternatif bisa digunakan dalam daerah ① ($T < 1500$ °C) jika reaksi antara BBN dan atmosfer dipostulasi. Difusi volume sederhana yang diandaikan untuk menyajikan mekanisme laju kendali untuk lepasan hasil belah dalam daerah ① dan ② (1500 °C $< T < T_{leleh}$). Secara khusus, digunakan konsep setara bola untuk menghitung harga lepasan fraksional. Dalam daerah ③ ($T > T_{leleh}$), digunakan pernyataan laju lepasan fraksional emperis yang bergayut pada akar dari waktu, ($t^{1/2} = \sqrt{t}$). Berikut di bawah ini disajikan sejumlah persamaan matematis yang merupakan dasar rumusan analitik untuk menaksir lepasan hasil belah yang digunakan dalam FRCRL2M1.

Lepasannya hasil belah di bawah titik suhu leleh ($T < T_{leleh}$) adalah[1]:

$$\text{untuk: } 0,0 < F < 0,9: \quad F_{i,k,l,n} = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\sum_{n=1}^N \tau_{i,k,l,n} \right)^{\frac{1}{2}} - 3 \cdot \left(\sum_{n=1}^N \tau_{i,k,l,n} \right) \quad (1)$$

$$\text{dan untuk: } 0,9 < F < 1,0: \quad F_{i,k,l,n} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\pi^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^N \tau_{i,k,l,n} \right) \right] \quad (2)$$

dengan $F_{i,k,l,n} \equiv$ lepasan fraksional kumulatif radioisotop i untuk seksi aksial k dan zona teras radial l setelah selang antara waktu ke- n dan $\tau_{i,k,l,n} \equiv$ parameter lepasan radioisotop i nir dimensi untuk seksi aksial k dan zona teras radial l setelah selang antara waktu ke- n , yang didefinisikan sebagai:

$$\tau_{i,k,l,n} = \frac{D_{i,k,l} \cdot \Delta t_n}{a^2} \quad (3)$$

dengan $D_{i,k,l} \equiv$ koefisien difusi radioisotop i yang terlokasi dalam seksi aksial k dari zona teras radial l , [cm^2/detik]; $\Delta t_n \equiv$ selang antara waktu ke- n , [detik]; $a \equiv$ jejari setara bola dari partikel, [cm]; dan harga-harga koefisien difusi ($D_{i,k,l}$) diperoleh dari persamaan Arrhenius sbb.[5 – 9]:

$$D_{i,k,l} = D_{0,i} \cdot \exp \left(-\frac{Q_i}{R \cdot T_{k,l}} \right) \quad (4)$$

dengan $D_{0,i} \equiv$ harga batas koefisien difusi untuk hasil belah jenis i , [cm^2/detik]; $Q_i \equiv$ tenaga aktivasi Arrhenius untuk difusi dari hasil belah jenis i , [kalori per gmol]; $R \equiv$ tetapan gas universal = $8,315$ J/(K·mol) = $1,986$ kal/(K·mol) = $0,0821$ (lt·atm)/(K·mol), dan $T \equiv$ suhu mutlak, [K];

Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung lepasan hasil belah dari BBN yang meleleh adalah:

$$F_{i,k,l,n} = F_{i,k,l,n-1} + A \cdot \sqrt{\Delta t_n} + B \quad (5)$$

dengan $F_{i,k,l,n}$ ≡ lepasan fraksional kumulatif radioisotop i untuk seksi aksial k dan zona teras radial l setelah interval waktu ke- $(n-1)$; A ≡ slope, liku atau kecuraman kurva linier F versus penyesuaian data lepasan eksperimen \sqrt{t} ; dan B ≡ nilai F pada titik potong antara kurva dan sumbu F .

Harga-harga D_0 , Q , a , A dan B dalam Persamaan (3-5) tersebut di atas disaripatikan dari hasil kerja eksperimen dan dipasok sebagai data masukan dasar pada program. Data ini harus diyakini sebagai nilai representatif BBN sesungguhnya yang dimungkinkan tertahan dalam komposisi BBN, rapat massa dan fraksi bakar terakumulasi. Sumber informasi data ini harus telah diidentifikasi dahulu sebelumnya. Karena inventori hasil belah untuk teras reaktor diandaikan teragih secara merata sesuai dengan agihan daya operasi dalam teras reaktor, maka agihan daya ini dalam terminologi faktor puncak daya atau PPF (*Power Peaking Factor*) harus dipasok pada program sebagai data masukan.

B. Metode Perhitungan Komponen Lepas Pra Kecelakaan

Komponen lepasan pra kecelakaan bersumber dari lepasan hasil belah yang terjadi selama rentang waktu operasi reaktor secara normal yang menyajikan kasus kecelakaan terpostulasi. Perhitungan ini dilaksanakan dengan mengandaikan bahwa migrasi perpindahan hasil belah melalui bahan bakar oleh proses difusi selama operasi normal reaktor dan terlepas ke celah sempit batang BBN dan plenum dari permukaan pelet BBN, sepanjang retakan permukaan yang terhubung dan dengan parameter yang terkandung satu sama lain ke permukaan. Model difusi untuk komponen lepasan pra kecelakaan mirip dengan pengerjaan untuk komponen lepasan selama kecelakaan dalam hal konsep perandaian setara bola. Penyelesaian untuk persamaan difusi produksi dan peluruhan hasil belah yang sesuai untuk bola di mana diambil ke dalam akumulasi yang telah dilaporkan oleh Beck.[2] Persamaan difusi untuk konsentrasi dalam bola adalah:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial^2 (rC)}{\partial r^2} + B - \lambda C = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \lambda C + B \quad (6)$$

dengan keadaan awal atau syarat batas: $C(a,t) = C(r,0) = 0$, dan dengan C ≡ konsentrasi dalam bola, [atom/cm³]; D ≡ koefisien difusi, [cm²/detik]; B ≡ laju hasil, [atom/(cm³·det)]; λ ≡ tetapan peluruhan radionuklida hasil belah, [detik⁻¹]; t ≡ waktu, [detik]; r ≡ koordinat radial dalam sistem koordinat bola, [cm]; dan a ≡ jejari setara bola, [cm];

Laju lepasan hasil belah (R) diperoleh dari gradien konsentrasi di permukaan yang lebih luar dan untuk satuan volume dari padatan BBN diberikan oleh persamaan:

$$R = \frac{3D}{a} \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=a} \quad (7)$$

Pengumpulan hasil belah eksternal ke padatan BBN dapat dihitung dengan mempertimbangkan laju perubahan konsentrasi dimana ia terlepas dan laju dimana ia meluruh. Jadi:

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N; \quad N = N(t) \quad (8)$$

untuk mana N adalah pengumpulan atom-atom yang tak meluruh yang terlepas dari suatu satuan volume dari bola (atom/cm³). Nisbah (nilai banding) dari laju pengumpulan terhadap laju produksi dapat dinyatakan tanpa dimensi sebagai:

$$G = 3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\mu}} \cdot \coth \sqrt{\mu} - \frac{1}{\mu} \right) \cdot \{1 - \exp(-\mu\tau)\} - \frac{6 \cdot \mu \cdot \exp(\mu\tau)}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left\{-\frac{(n \cdot \pi)^2 \cdot \tau}{\mu}\right\}}{n^2 \cdot \{(n \cdot \pi)^2 + \mu\}} \quad (9)$$

$$\text{dengan } \mu = \frac{\lambda a^2}{D} \quad (10), \quad \tau = \frac{D t}{a^2} \quad (11), \quad \text{dan } D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \quad (12)$$

$D_0 \equiv$ harga batas dari koefisien difusi, [cm²/detik]; $Q \equiv$ tenaga aktivasi Arrhenius untuk difusi, [kalori per g mol]; $R \equiv$ tetapan gas universal (lihat nilainya di atas); dan $T \equiv$ suhu mutlak, [°K];

Untuk waktu pengoperasian reaktor yang nisbi lama dengan memperhatikan umur paroh radionuklida hasil belah $T_{1/2}$, harga G di persm. (9) mendekati harga setimbang:

$$G_{\infty} = 3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\mu}} \cdot \coth \sqrt{\mu} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (13)$$

Harga setimbang ini menyajikan batas atas untuk lepasan radionuklida selama operasi reaktor oleh mekanisme yang diandaikan. Hasil penyelesaian numerik persm. (13) telah diberikan oleh Beck.[2]

Untuk jenis hasil belah stabil (tak radioaktif), lepasan dinyatakan dalam terminologi nisbah (nilai banding) dari jumlah yang terlepas terhadap jumlah yang dihasilkan. Jadi:

$$G = F = \frac{N}{B \cdot t} = 1 - \frac{1}{15 \cdot \tau} + \frac{6}{\pi^4 \cdot \tau} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left\{-\frac{(n \cdot \pi)^2 \cdot \tau}{n^4}\right\}}{n^4} \quad (14)$$

Di dalam rutin subprogram REGAP yang dipanggil oleh program utama FRCRL2M1, 5 (lima) suku pertama dari jumlahan tersebut dalam persamaan (14) di atas digunakan untuk nilai τ yang cukup kecil, dalam hal mana kasus pendekatan satu suku sebagai:

$$G = F \approx 4 \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \quad (15)$$

dianggap cukup akurat.

Profil suhu radial di dalam pengoperasian BBN diambil dalam jumlah dengan membagi pelet-pelet BBN menjadi 5 (lima) ruas radial dari volume yang hampir sama. Suhu di setiap jejari dihitung dimulai dari permukaan sisi sebelah luar menggunakan konduktivitas termal κ (daya hantar panas) konstan dari UO₂ dan pengoperasian harga fluks bahang permukaan yang sesuai dengan persamaan:

$$T_r = T_s + \frac{q'' \cdot \alpha}{2 \cdot \kappa} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{r}{\alpha} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

dengan $T_r = T(r) \equiv$ suhu pada jejari r , [°F]; $T_s = T(a) \equiv$ suhu di permukaan BBN (jejari a), [°F]; $q'' \equiv$ fluks bahang permukaan BBN, [BTU/(inci²·detik)]; $\kappa \equiv$ konduktivitas termal, [BTU/(inci·detik·°F)]; dan $\alpha \equiv$ jejari sisi luar dari pelet BBN, [inci];

Suhu permukaan BBN T_s dihitung secara takgayut dengan mengandaikan suhu ini terhubung secara linier pada fluks bahang permukaan q'' . Sekali profil suhu radial diperoleh (terhitung), maka suhu rerata diumpun ke setiap dari 5 (lima) ruas radial menggunakan proses pererataan aritmetika sederhana.

METODOLOGI

Perhitungan profil suhu untuk seluruh 110 daerah teras dibuat dalam acuan ke suatu daerah tunggal melalui sejumlah faktor puncak daya (PPF) yang disiapkan sebagai data masukan. Hanya unjuk kerja termal dan faktor puncak daya untuk daerah acuan ini saja yang diperlukan untuk memasok dalam masukan ke program.

Data suhu terinci yang dibangkitkan digunakan untuk menghitung koefisien difusi hasil belah yang diperlukan dalam model lepasan. Sejumlah parameter persamaan Arrhenius digunakan untuk

menghitung koefisien-koefisien difusi pra kecelakaan, yang mungkin tak perlu identik dengan parameter-parameter fisika yang digunakan dalam perhitungan koefisien difusi komponen hasil belah selama kecelakaan. Oleh karenanya, program komputer FRCRL2M1 ini menyiapkan untuk menspesifikasi secara terpisah dari parameter difusi ini. Penataan yang sama juga diterapkan pada spesifikasi harga untuk jejari setara bola dari BBN.

Metode yang diuraikan di sini mendasari penyusunan rutin subprogram bernama panggilan REGAP dari program utama FRCRL2M1. Harga lepasan fraksional hasil belah untuk komponen pra kecelakaan yang dihitung di sini ditransfer kembali ke program utama pemanggil untuk menepatkan pembobotan sesuai dengan agihan dari inventori dan untuk urutan yang termasuk dalam perhitungan lepasan kecelakaan total (pra kecelakaan dan selama kecelakaan). Beberapa tampilan (luaran) dari hasil perhitungan disisipkan dalam *subroutine* ini. Pengoperasian suhu BBN yang dibangkitkan dicetak keluar dalam *subroutine* dan harga lepasan pra kecelakaan hasil belah juga dipasok untuk setiap 10 "batang bahan bakar".

TATA KERJA

Data siapan utama (tipe-1) yang akan dibaca masuk oleh program FRCRL2M1, meliputi: Jumlah *spesies* hasil belah yang dihitung, Banyaknya seksi aksial teras ekivolume, Banyaknya zona radial teras ekivolume, Kode tipe atmosfer dalam teras reaktor, Banyaknya tahap waktu dalam perhitungan, Jumlah *spesies* hasil belah pra aksiden, Suhu retak/pecah kelongsong bahan bakar, Suhu leleh/lebur "daging" bahan bakar, Kenaikan undak (tahap) waktu (Δt) dan Jejari setara bola dari porositas BBN. Data Koefisien difusi batasan Arrhenius (D_0) [cm^2/det] dan tenaga aktivasi Arrhenius (Q_{Ar}) [kalori/gram_atom], dibaca oleh program FRCRL2M1. Data Faktor puncak daya teras reaktor (PPF) dalam arah AKSIAL; ($VIAX = P_{\max} / P_{\text{avg_axi}}$), dibaca oleh FRCRL2M1. Data Faktor puncak daya teras reaktor (PPF) dalam arah RADIAL; ($VIRA = P_{\max} / P_{\text{avg_rad}}$), dibaca oleh FRCRL2M1. Data Inventori massa BBN total dalam teras reaktor dari setiap *spesies* hasil belah (GRAMS) [gram], dibaca oleh FRCRL2, meliputi: Massa total hasil belah *spesies*-1, Massa total hasil belah *spesies*-2, Massa total hasil belah *spesies*-3, dst.

REGAP adalah subprogram *routine* untuk menghitung inventori hasil belah di celah bahan bakar reaktor, digunakan untuk menentukan lepasan bahan radioaktif seketika pada kasus retak atau pecahnya kelongsong bahan bakar. *Subroutine* ini akan menghitung konsentrasi radioaktivitas dari sejumlah hasil belah, baik yang stabil maupun yang radioaktif.

Program membagi teras reaktor berbahan bakar oksida uranium (UO_2) dalam 10 (sepuluh) "batang" BBN, dimana setiap batangnya dapat dianggap mewakili sejumlah "pin". Setiap batang dibagi lagi menjadi 11 (sebelas) potong elemen aksial. Faktor pandang agihan daya arah radial (10) dan aksial (11) diperlukan sebagai data masukan.

Data suhu dan faktor puncak daya, untuk dibaca *subroutine* REGAP, meliputi: Suhu luar kelongsong BBN dalam teras, Suhu permukaan BBN dalam teras, Suhu sumbu sentral BBN dalam teras, Suhu tengah (*middle*) BBN dalam teras, Faktor puncak daya teras arah aksial, dan Faktor puncak daya teras arah radial. Data fluks bahang, suhu air, jejari BBN, daya hantar bahang tinggi aksial BBN untuk dibaca oleh *subroutine* REGAP, meliputi: Fluks bahang permukaan rerata teras, Suhu air pendingin teras reaktor, Jejari BBN dalam batang bahan bakar, Konduktivitas termal bahan bakar, dan Panjang kenaikan aksial bahan bakar. Penyiapan data *spesies* hasil belah tertentu dibaca oleh *subroutine* REGAP, meliputi: Identifikasi nama *spesies* hasil belah, Koefisien Difusi Arrhenius ($T < 1500$ °C), Tenaga Aktivasi Arrhenius ($T < 1500$ °C), Koefisien Difusi Arrhenius ($T > 1500$ °C), Tenaga Aktivasi Arrhenius ($T > 1500$ °C), Tetapan peluruhan *spesies* hasil belah, dan Nomor Identifikasi *spesies* hasil belah. Jika isotopnya stabil, maka diandaikan terjadi suatu akumulasi selama 30 bulan (= 2,5 tahun). Data waktu operasi jejari dan jejari BBN setara bola untuk dibaca oleh REGAP, meliputi: Lamanya waktu pengoperasian reaktor, dan Jejari setara bola dari BBN.

Untuk kasus ini, data masukan agihan suhu teras reaktor daya PWR-1000 dalam °C yang diadaptasi dari AP1000[4] sebagai fungsi jejari (R) dan tinggi teras (Z) yang nilai-nya disajikan dalam Tabel 1, 2 dan 3 berturut-turut untuk tahap waktu ke-1, 2 dan 3, harus dikonversi terlebih dahulu ke °F dan hanya untuk zona 2* saja yang dibahas.

Tabel 1. Agihan suhu BBN teras reaktor dalam °C di setiap zona radial (r 1 – 10) dan seksi aksial (a 1 – 11) Tahap 1 (500 detik pertama pasca LOCA).

	r 1	2*	3	4	5	6	7	8	9	10
a 1	446	599	434	462	412	504	394	402	347	393
2	617	667	601	556	513	551	496	464	396	417
3	771	842	746	681	619	672	592	547	448	478
4	932	1028	897	810	729	797	692	632	502	541
5	1033	1154	988	887	793	869	751	682	533	578
6	1124	1263	1072	957	853	936	804	727	562	611
7	1035	1179	990	888	794	871	751	682	533	578
8	941	1039	906	818	735	803	698	636	504	544
9	750	819	727	664	605	656	579	535	440	469
10	568	611	554	516	479	511	463	436	378	396
11	458	561	447	439	414	477	399	386	348	378

Tabel 2. Agihan suhu BBN teras reaktor dalam °C di setiap zona radial (r1–10) dan seksi aksial (a1–11) Tahap-2 (500 detik ke-dua pasca LOCA).

	r 1	2*	3	4	5	6	7	8	9	10
a 1	465	598	444	420	436	513	403	379	363	407
2	720	771	697	639	591	626	564	524	444	467
3	923	982	882	799	729	768	686	631	517	546
4	1151	1209	1077	964	873	911	806	737	591	625
5	1322	1372	1207	1071	962	997	877	799	635	670
6	1447	1482	1306	1155	1036	1063	936	851	672	708
7	1304	1356	1194	1060	953	988	871	793	631	666
8	1129	1188	1061	951	862	901	798	728	585	619
9	863	921	828	752	688	728	650	598	494	522
10	626	669	609	561	523	554	503	469	405	424
11	493	561	473	409	445	483	417	368	367	386

Tabel 3. Agihan suhu BBN teras reaktor dalam °C di setiap zona radial (r1–10) dan seksi aksial (a1–11) Tahap-3 (500 detik ke-tiga pasca LOCA).

	r 1	2*	3	4	5	6	7	8	9	10
a 1	489	607	461	431	460	527	416	387	378	418
2	782	824	754	689	638	667	603	559	474	496
3	1013	1046	966	874	798	821	738	681	560	584
4	1268	1277	1195	1069	967	974	871	799	647	671
5	1480	1461	1369	1207	1078	1068	950	870	699	721
6	1673	1622	1487	1304	1162	1135	1009	925	741	760
7	1538	1507	1347	1185	1061	1054	938	859	691	713
8	1278	1285	1163	1039	942	953	853	783	635	660
9	937	978	890	806	739	767	690	636	527	552
10	661	702	642	588	549	577	525	489	422	441
11	515	569	490	421	463	492	429	377	379	394

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil keluaran utama dari perhitungan program FRCRL2M1 dengan data masukan yang disiapkan pengguna meliputi: Transportasi hasil belah ke celah sempit (*gap*) BBN dan prediksi lepasan hasil belah dari BBN selama reaktor kehilangan pendingin. Mengenai transportasi hasil belah ke celah sempit (*gap*) BBN diberikan pada Tabel 4.

Dalam makalah ini, perkiraan lepasan hasil belah dari batang BBN selama kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA) hanya akan disajikan untuk tahap waktu 500 detik ke-tiga saja atau 1500 detik sejak saat dimulai LOCA khusus untuk teras radial ke-2 saja yang memuat suhu BBN tertinggi, diberikan pada Tabel 5. Sementara hasil perhitungan untuk tahap ke-1 dalam tempo 500 detik pertama dan tahap ke-2 dalam tempo 500 detik berikutnya atau 1000 detik sejak saat LOCA tidak ditampilkan, karena nilainya dapat dipastikan lebih rendah daripada hasil perhitungan untuk tahap ke-3).

Tabel 4. Lepasn Hasil Belah Volatil gas Xenon dan Iodium dari Batang BBN ke celah sempit Pra Kecelakaan.

Batang BBN di zona ke-	Konsentrasi Spesies, g/cm ³	
	Gas Xenon	Gas Iodium
1	2.552E-01	3.670E-01
2	3.617E-01	4.653E-01
3	2.741E-01	3.864E-01
4	1.726E-01	2.797E-01
5	1.015E-01	2.087E-01
6	2.035E-01	3.107E-01
7	1.197E-01	2.280E-01
8	3.756E-02	1.195E-01
9	4.850E-03	2.380E-02
10	2.125E-02	8.124E-02

Tabel 5. Prediksi lepasan hasil belah radioaktif fraksional dari batang BBN selama kecelakaan kehilangan pendingin (Pasca LOCA).

Tahap Waktu Kalkulasi ke- 3 :				
Waktu = 1503.0 detik.				
LEPASAN BAHAN RADIOAKTIF FRAKSIONAL:				
~~~~~				
No. Pin teras radial = 2				
No. Daerah teras aksial = 1      Suhu = 607.2 derajat C.				
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	1.4468E-04	5.0340E-11	5.2054E-02	1.8122E-05
2	6.6495E-04	3.2930E-10	7.4104E-02	5.2688E-06
3	3.2992E-05	1.4283E-08	5.1073E-02	2.5710E-03
No. Daerah teras aksial = 2      Suhu = 824.4 derajat C.				
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	1.4889E-04	5.2058E-09	5.2203E-02	1.8741E-03
2	6.8715E-04	2.6825E-08	7.4791E-02	4.2920E-04
3	2.3511E-04	2.1023E-07	5.1309E-02	3.7842E-02
No. Daerah teras aksial = 3      Suhu = 1045.6 derajat C.				
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	3.0066E-03	1.1375E-07	5.5209E-02	4.0949E-02
2	5.3939E-03	4.9766E-07	8.0185E-02	7.9626E-03



3	1.6079E-03	1.3022E-06	5.2916E-02	2.3440E-01
	No. Daerah teras aksial = 4		Suhu = 1276.7 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	8.7249E-03	1.0556E-06	6.3934E-02	3.8000E-01
2	1.4008E-02	3.8189E-06	9.4193E-02	6.1102E-02
3	6.3597E-03	4.3839E-06	5.9276E-02	7.8910E-01
	No. Daerah teras aksial = 5		Suhu = 1460.6 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	1.4504E-02	3.9705E-06	7.8438E-02	1.4294E+00
2	1.8760E-02	1.0473E-05	1.1295E-01	1.6757E-01
3	1.2583E-02	7.8644E-06	7.1859E-02	1.4156E+00
	No. Daerah teras aksial = 6		Suhu = 1622.2 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	2.1000E-02	1.2791E-05	9.9438E-02	4.6048E+00
2	2.1000E-02	8.5994E-06	1.3395E-01	1.3759E-01
3	1.9884E-02	1.2420E-05	9.1743E-02	2.2356E+00
	No. Daerah teras aksial = 7		Suhu = 1507.2 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	1.6515E-02	7.9661E-06	1.1595E-01	2.8678E+00
2	1.8900E-02	9.7873E-06	1.5285E-01	1.5660E-01
3	1.4637E-02	1.2291E-05	1.0638E-01	2.2125E+00
	No. Daerah teras aksial = 8		Suhu = 1285.0 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	9.2298E-03	1.2839E-06	1.2518E-01	4.6220E-01
2	1.4675E-02	4.6303E-06	1.6753E-01	7.4084E-02
3	6.4965E-03	5.0035E-06	1.1288E-01	9.0063E-01
	No. Daerah teras aksial = 9		Suhu = 978.3 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	2.6015E-03	5.2863E-08	1.2778E-01	1.9031E-02
2	4.8230E-03	2.4210E-07	1.7235E-01	3.8735E-03
3	1.0665E-03	8.4516E-07	1.1394E-01	1.5213E-01
	No. Daerah teras aksial = 10		Suhu = 702.2 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	4.8042E-05	5.2409E-10	1.2783E-01	1.8867E-04
2	2.5274E-04	3.0319E-09	1.7260E-01	4.8511E-05
3	6.9944E-05	5.3741E-08	1.1401E-01	9.6735E-03
	No. Daerah teras aksial = 11		Suhu = 569.4 derajat C.	
No. Unsur :	F_daerah	Laju lepas	F_teras	Laju massa
1	4.7575E-05	1.7727E-11	1.2788E-01	6.3817E-06
2	2.4999E-04	1.2204E-10	1.7285E-01	1.9527E-06
3	1.7425E-05	7.5754E-09	1.1403E-01	1.3636E-03

Keterangan:  
~~~~~

1. F\_daerah = lepasan fraksional kumulatif dari daerah teras tertentu;
2. Laju lepas = laju lepas fraksional dalam selang waktu dari tiap daerah;
3. F\_teras = lepasan fraksional kumulatif total atas seluruh teras;
4. Laju massa = laju lepasan massa dari hasil belah.

Lepasan tambahan hasil belah BBN UO<sub>2</sub> PWR-1000 terjadi secara beruntun pada kasus yang memicu kecelakaan pada batang BBN melalui proses transien pemanasan dan pendinginan. Lepasan ini berpangkal tolak pada komponen kecelakaan. Transien termal selama waktu tertentu (500 detik) diperlukan oleh sistem pendingin darurat guna mendinginkan teras reaktor. Selama daur ini, yang bisa berakhir untuk beberapa menit atau lebih, sejumlah BBN dapat mencapai suhu yang lebih tinggi daripada suhu yang lazim dialaminya selama operasi normal. Keadaan terlepasnya hasil belah di sini sangat mirip dengan percobaan pemanasan iradiasi dengan BBN kompak. Hasilnya sering ditaksir menggunakan teori difusi volume, bahkan dikira laju lepasan biasanya tidak mengikuti kinetika difusi. Pendekatan yang sama telah dipilih untuk model program komputer yang digunakan, yaitu FRCRL2M1. Baik komponen lepasan pra kecelakaan maupun komponen lepasan selama kecelakaan, keduanya dihitung berdasarkan pada model difusi volume sederhana.

Tampak pada Tabel 1 yang menyajikan agihan suhu BBN dalam °C di dalam teras reaktor dalam 500 detik pertama pasca LOCA, berdasarkan suhu retak/leleh kelongsong BBN TCLADM = 650 °C, di sini ada 60 dari 110 elemen volum (54,55%) yang tidak (belum) meleleh, sedangkan 50 sisanya (45,45%) dengan suhu tertinggi 1263 °C di zona radial 2 dan seksi aksial 6 meleleh. Tabel 2 yang menyajikan agihan suhu BBN dalam 500 detik kedua pasca LOCA, ada 48 elemen volum (43,64%) yang tidak (belum) meleleh, sedangkan 62 sisanya (56,36%) dengan suhu tertinggi 1482 °C di zona radial dan seksi aksial s.d.a., meleleh. Sedangkan Tabel 3 yang menyajikan agihan suhu BBN dalam 500 detik ke-tiga pasca LOCA, ada 38 elemen volum (34,54%) yang tidak (belum) meleleh, sedangkan 72 sisanya (65,46%) dengan suhu tertinggi 1622 °C di zona radial dan seksi aksial s.d.a., meleleh. Pada suhu ini, laju pelepasan massa di dalam daerah elemen volume teras ini sebesar 4.605E+00 gram/detik

Koefisien difusi hasil belah diperlukan dalam perhitungan yang bisa diperoleh dari laporan-laporan studi / penelitian mengenai iradiasi akhir sebagai fungsi dari suhu, rapat BBN, fraksi bakar (*burn-up*) BBN, *stoichiometri* BBN dan tekanan atmosfer udara luar, jejari setara bola dari BBN yang adalah merupakan suatu parameter penting yang berhubungan dengan rapat massa BBN, bisa diperoleh dari kurva-kurva yang menghubungkan antara dua besaran yang pernah atau telah dipublikasi / diterbitkan dalam prosiding. Informasi mengenai laju daya BBN yang diperlukan untuk menghitung profil suhu teras guna perhitungan komponen lepasan pra kecelakaan dapat diperoleh dari data disain unjuk kerja teras reaktor yang ditinjau. Suhu teras selama kecelakaan yang disebabkan oleh transien termal yang diperlukan untuk perhitungan komponen lepasan selama kecelakaan harus dipasok dari sumber terpisah / tersendiri yang takgayut, sebagai suatu program komputer terinci untuk analisis perpindahan bahang teras reaktor.

Program FRCRL2M1 menggabungkan komponen lepasan pra kecelakaan (dihitung oleh *subroutine* REGAP) dan komponen lepasan selama kecelakaan untuk mendapatkan harga lepasan hasil belah total di setiap daerah teras. Apabila suhu dari setiap daerah teras melampaui suatu suhu retak kelongsong BBN yang dispesifikasikan sebelumnya, maka inventori yang terlepas dari seluruh bagian aksial dari zona radial yang mengandung daerah khusus ini diandaikan lepas dari batang-batang BBN.

Sebagai tambahan, setelah kasus ini terjadi dalam daerah-daerah zona radial yang terpengaruh diandaikan terpapar pada tekanan atmosfer eksternal dan lepasan terus-menerus oleh difusi dihitung untuk setiap daerah ini menggunakan parameter-parameter lepasan yang bersesuaian (seperti koefisien difusi D dan tenaga aktivasi Arrhenius Q) yang dipasok sebagai data masukan.[5-9] Walaupun persamaan matematik dalam model ini diselesaikan secara kenaikan bertahap terhadap waktu t , namun hanya data suhu T saja yang dapat divariasikan secara kenaikan bertahap dalam program. Peubah-peubah yang dispesifikasikan lainnya seperti suhu retak kelongsong, suhu leleh BBN dan jejari setara bola ditentukan pada harga masukan awal walaupun harga-harga ini bisa divariasikan di antara penjelmaan program yang berbeda.

KESIMPULAN

Dengan dapat dijalankannya program FRCRL2 terubah versi 1, yaitu FRCRL2M1, maka besarnya lepasan fraksional hasil belah bahan bakar reaktor (BBN) UO<sub>2</sub> Reaktor Daya untuk PLTN jenis yang setara dengan PWR-1000 dalam kondisi kecelakaan akibat kehilangan cairan pendingin primer dapat ditentukan / diperkirakan nilainya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Larik dek sumber program FRCRL2 asli yang kini telah dimodifikasi menjadi FRCRL2M1, dahulu diperoleh dari seorang kolega lama, yaitu Ir. Senthot Bambang Sumarsono, mantan Ka Sub Bid Fisika Reaktor, Bidang Reaktor, PPNY (kini PTAPB) Batan Yogyakarta. Kepada mas Bambang

Sumarsono yang kini tengah menikmati masa pensiun di hari tuanya dimana pun keberadaannya, kami mengucapkan banyak terima kasih atas segala bantuan dan jasanya. Terima kasih juga saya sampaikan kepada mas Surip Widodo, Ka BFTR, PTRKN BATAN Serpong yang telah membantu secara converhensif dalam pembuatan aplikasi gafis pada kode FRCRL2M1 (terubah versi 1) dengan bahasa pemrograman saitifik Fortran-77 dan Fortran-90.

Sebelumnya penulis telah maklum bahwa pasti ada kekurangan dan kesalahan pada dokumen teknis ini. Oleh karenanya, penulis tak segan untuk mohon bahan masukan dari pembaca dalam bentuk apapun yang dapat dijadikan petunjuk baik berupa kritik atau saran yang bersifat membangun, baik lesan maupun tertulis demi lebih sempurnanya lagi makalah ini. Untuk itu tak lupa penulis ucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- Jurnal acuan utama / pokok mengenai kode komputer FRCRL2M1
1. R. L. Ritzman dan D. L. Morrison, "FRCRL2: A Computer Code for Calculating Fission-Product Release in Reactor Accident Analyses", BMI-1915 (Aug. 1971).
 2. BECK, S. D., "The Diffusion on Radioactive Fission Products from Porous Fuel Elements", BMI-1433 (April, 1960).
 3. R. L. Ritzman, at al, "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400 (NUREG-75/014), Appendices VII, VIII, IX and X, October 1975, U.S. NRC, Sumber inter-jejaring: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0706/ML070600376.pdf>, 33672 kb, 682 hlm.
 4. J. L. Whiteman, D. M. Popp, R. B. Sisk, J. A. Speer & P. A. Russ, "AP1000 European Design Control Document", EPS-GW-GL-700 Revision-1, Chapter 1-21, ©2009 Westinghouse Electric Company.
Internet / acuan pendukung mengenai pengertian dan perhitungan "Energi Aktivasi Arrhenius" yang digunakan sebagai data masukan dan dalam menulis makalah ini.
 5. Athinoula L. PETROU, Maria ROULIA and Konstantinos TAMPOURIS, "The Use of the Arrhenius Equation in the Study of Deterioration and of Cooking of Foods Some Scientific and Pedagogic Aspects", CERPE 2002, Vol. 3, No. 1, pp. 87-97, [http://www.uoi.gr/ceerp/2002\\_February/pdf/08Petrou.pdf](http://www.uoi.gr/ceerp/2002_February/pdf/08Petrou.pdf), PDF-Filename: 08Petrou.pdf, #Memori: 379 kb (11 hlm).
 6. Rob Lewis and Wynne Evans, "The Graphical determination of Arrhenius Activation Energy", 2001, 2006, 2011, Chemistry, Palgrave Macmillan, <http://www.palgrave.com/foundations/lewis/students/appendices/14lewisappendix.pdf>, PDF-Filename: 14lewisappendix.pdf, #Memori: 306 kb (4 hlm).
 7. A. van de Runstraat, J. van Grondelle, and R. A. van Santen, "On the Temperature Dependence of the Arrhenius Activation Energy for Hydro-isomerization Catalyzed by Pt/Mordenite", Journal of Catalysis 167, 460–463 (1997) Article No. CA971603, Filename: 591274.pdf, #Mem.: 101 kb (4 hlm), <http://alexandria.tue.nl/repository/freearticles/591274.pdf>.
 8. Bor Yann Liaw, E. Peter Roth, Rudolph G. Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L. Case, Daniel H. Doughty, "Correlation of Arrhenius behaviors in power and capacity fades with cell impedance and heat generation in cylindrical lithium-ion cells", Journal of Power Sources 119–121 (2003) 874–886, Filename: 1607538.pdf, #Memori: 842 kb (13 hlm), <http://144.206.159.178/ft/641/92454/1607538.pdf>.
 9. Chrles R. Toye, "Computerized Arrhenius Reliability Extrapolation Techniques", NASA TN D-4902, Filename: 1969004036.pdf, #Memo: 947 kb (16 hlm), [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19690004036\\_1969004036.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19690004036_1969004036.pdf).

DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Tukiran, PTRKN-BATAN)

- Apakah hasil perhitungan bapak sudah dibandingkan dengan perhitungan lain ? atau ada tidak referensinya ?

JAWABAN : (Pujiyanto M. S., PTRKN-BATAN)

- Hasil perhitungan sudah dibandingkan dengan hasil output ORIGEN 2.1, khususnya untuk hasil fisi kelompok Xenon dan kelompok Iodium. Acuan referensi bisa dilihat pada daftar pustaka no 1 sampai dengan 3 dimakalah ini.

PERTANYAAN : (Jupiter Sitorus, PTRKN-BATAN)

- Apa yang dimaksud lepasan fraksional dalam presentasi ini ? apakah ada kaitannya dengan nodalisasi ?
- Apakah Code yang digunakan sudah divalidasi ?

JAWABAN : (Pujiyanto M. S., PTRKN-BATAN)

- Yang dimaksud dengan lepasan fraksional adalah lepasan hasil belahan dari bahan bakar nuklir fisi uranium dalam bahan bakar nuklir UO<sub>2</sub> berupa Xe dan I dalam bentuk gas masuk kedalam celah (gap) antara selongsong dan bahan bakar nuklir, dan tidak ada kaitannya dengan nodalisasi.
- Code yang digunakan FRCRL2M1, aslinya adalah FRCRL2 produk NESC No. 500 yang telah digunakan sejak tahun 1971 dan sudah valid dalam arti telah tervalidasi.