

PENENTUAN WAKTU TANGGAP TERMAL BATANG BAHAN BAKAR SELAMA PEMADAMAN REAKTOR NUKLIR DENGAN MENGUNAKAN MODEL ADIABATIK

Suwardi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang

ABSTRAK

WAKTU TANGGAP TERMAL BATANG BAHAN BAKAR SELAMA PEMADAMAN REAKTOR NUKLIR DENGAN MENGGUNAKAN MODEL ADIABATIK. Proses pemadaman reaktor nuklir yang kompleks tergantung dari parameter disain bahan bakar dan parameter dan operasi reaktor. Dalam kaitan dengan analisis RIA dan LOCA, proses pemadaman dicirikan dengan konstanta waktu tanggap termal. Pada makalah ini disajikan konsep konstanta waktu tanggap termal dengan memperhitungkan transfer panas antara batang bahan bakar dan pendingin dengan model adiabatik yang lebih realistis daripada model temperatur permukaan konstan yang saat ini masih digunakan. Model ini diselesaikan secara eksakta ke deret Bessel. Pendekatan numerik menghasilkan rumus perhitungan sederhana sampai 4 suku. Dibandingkan perhitungan dengan menggunakan kode Transuranus yang telah diverifikasi dengan pengukuran eksperimental, waktu tanggap model termal adiabatik untuk tipikal BB PWR sedikit lebih rendah.

Kata kunci : Waktu tanggap termal, batang bahan bakar, nuklir, adiabatic, fungsi Bessel

ABSTRACT

DETERMINATION OF THERMAL TIME CONSTANT OF FUEL PIN DURING NUCLEAR REACTOR SHUT DOWN BY USING ADIABATIC MODEL. A complex shut down process of nuclear reactor depends on different parameters of fuel design and of reactor operation. In correlation to RIA and LOCA analyses of reactor core, the shut down process is characterized by a time constant. In this paper, the concept of time constant by considering adiabatic heat transfer between fuel pin and coolant fluid is analyzed. The concept is more realistic than the model of constant surface temperature that is still used currently. The model has been mathematically solved by Bessel function. The numerical approach obtained a simple formula until 4 significant terms. Comparison between temperature constant of typical PWR fuel obtained by the adiabatic model and by Transuranus calculations that have been verified by experimental measurement shows a slightly lower.

Keyword : Thermal time constant, fuel pin, nuclear reactor, adiabatic, Bessel function.

PENDAHULUAN

Proses pemadaman reaktor nuklir yang kompleks tergantung dari parameter disain bahan bakar seperti geometri pelet, lebar celah, jenis dan tekanan gas pengisi, dan parameter operasi reaktor seperti burn-up dan pembangkitan panas. Dalam kaitan dengan analisis RIA dan LOCA, proses pemadaman dicirikan dengan waktu tanggap termal. Waktu tanggap termal suatu batang bahan-bakar selama pemadaman reaktor telah diukur dengan lebih seksama selama beberapa tahun di dalam Project OECD-HALDEN^[1]. Waktu tanggap termal bahan bakar merupakan karakteristik integral batang bahan bakar yang digunakan dalam analisis keselamatan terhadap kecelakaan diawali dengan masalah reaktivitas (*RIA - Reactivity Initiated Accidence*) dan analisis kecelakaan kehilangan fluida pendingin (*LOCA - Loss Of Coolant Accidence*).

Tujuan penelitian ini untuk dapat menambahkan teknik mengevaluasi karakteristik batang bahan bakar dengan cara lebih mudah atau lebih realistik. Di dalam makalah ini, waktu tanggap termal pusat batang bahan bakar dievaluasi dengan model analitik berdasarkan model perpindahan panas dalam batang secara adiabatik oleh fluida pendingin. Hasilnya dibandingkan dengan data yang dipublikasikan dari pengukuran eksperimental dan komputasi dengan kode termal mekanikal batang elemen bakar Transuranus yang telah diverifikasi dengan data eksperimental. Kode telah Transuranus dikembangkan di Jerman dan banyak digunakan dalam lembaga penelitian pengembangan maupun industri bahan bakar reaktor daya di beberapa negara maju^[2].

Timbul pertanyaan mendasar yaitu apakah pengukuran temperatur di dalam eksperimen pemadaman reaktor dapat mengungkapkan informasi atas evolusi waktu dari sifat termal elemen bahan bakar selama iradiasi. Untuk menjawabnya diperlukan pemahaman mendalam dari suatu

penyelidikan yang terperinci menyangkut perilaku dari sifat termal bahan bakar reaktor selama pemadaman.

METODA PENYELESAIAN ANALITIK

Solusi Analitik yang diperoleh dari acuan^[3,4] digunakan untuk mendapatkan beberapa pengertian. Bahan bakar dianggap sebagai suatu silinder padat tanpa batas dengan suatu radius sebelah luar yang dikepong oleh suatu pendingin pada temperatur tertentu. Pemindahan kalor antara bahan bakar dan pendingin ditentukan oleh suatu tetapan / koefisien alih bahang keseluruhan, *h*, yang telah meliputi pemindahan kalor melalui celah, *hgap*, dan juga dari salut kepada pendingin. Lebih lanjut diasumsikan bahwa sifat material keterhantaran termal, panas jenis dan kepadatan pada tekanan tetap adalah tetap dan rapat daya adalah ditentukan sebagai fungsi waktu saja, *q(t)*. Solusi distribusi temperatur menurut bagan umum dapat ditulis sebagai impitgabung dari suatu fungsi deret tak berhingga Bessel order nol :

$$\mathcal{G}(r, t) = \mathcal{G}_{cool} + \sum_{n=1}^{\infty} (\mathcal{G}_{1n} + \mathcal{G}_{2n}) J_0(r\alpha_n) \dots\dots\dots(1)$$

di mana jika di bawah daftar kondisi-kondisi tersebut di atas *a_n* menjadi akar positif dari

$$\alpha J_1(r_0 \alpha) + \frac{h}{\lambda} J_0(r_0 \alpha) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

dan *G_{1n}*, *G_{2n}*, muncul dari distribusi temperatur awal pada *t = 0* dan dari sumber daya, yang berturut-turut:

$$\mathcal{G}_{1n}(r, t) = \beta_n \left(\int_0^{r_0} \mathcal{G}(r, t=0) r J_0(r\alpha_n) dr \right) e^{-a\alpha_n^2 t} \dots\dots\dots(3)$$

$$\mathcal{G}_{2n}(r,t) = \left(\frac{r_0 \beta_n}{c\rho \alpha_n} J_1(r_0 \alpha_n) q^m \int_0^t F(s) e^{a\alpha_n^2 s} ds \right) e^{-a\alpha_n^2 t} \dots\dots\dots(4)$$

Di sini \mathcal{G} notasi temperatur, J_n fungsi Bessel orde n , r_0 jari-jari batang, $\alpha = (\lambda/cp.\rho)$ mewakili koefisien difusi termal, cp kapasitas panas, ρ densitas, ketiganya mudah diukur, sementara λ adalah koefisien keterhantaran panas biasa ditentukan dari definisi α . β_n diperoleh dari normalisasi fungsi-fungsi Bessel :

$$\beta_n = \frac{1}{\int_0^{r_0} [J_0(\alpha_n r)]^2 dr} = \frac{2\alpha_n^2}{r_0^2 J_0^2(r_0 \alpha_n) \left\{ \alpha_n^2 + \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right\}} \dots\dots\dots(5)$$

Analisis suatu pemadaman (*shutdown*) reaktor dimulai dari suatu distribusi temperatur posisi mantap berbentuk parabola di dalam bahan bakar dan reaktor

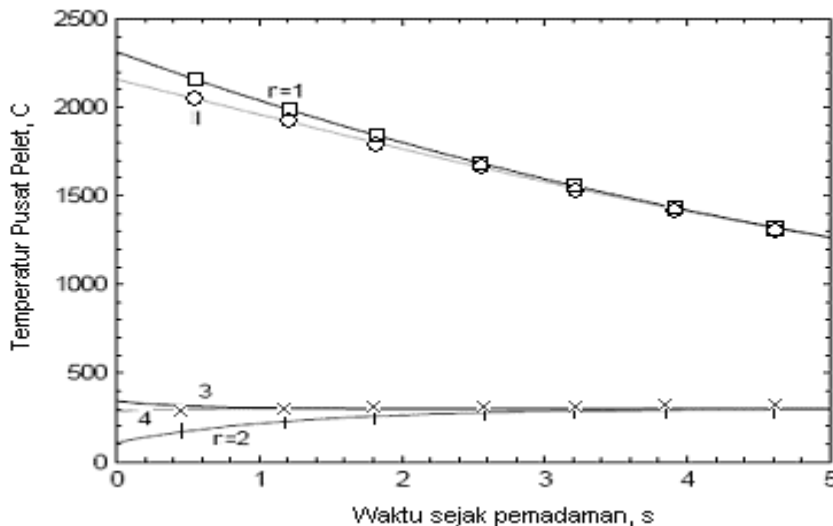
dimatikan pada $t = 0$. Oleh karena itu, solusi meliputi 1n saja. Untuk syarat awal

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(r,t=0) &= \mathcal{G}_{cool} + \frac{q^m r_0}{2h} + \frac{q^m (r_0^2 - r^2)}{4\lambda} = \mathcal{G}_{cool} + \mathcal{G}_i - k r^2 \\ q^m &= const \quad \text{for } t = 0 \\ q^m &= 0 \quad \text{for } t > 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(6)$$

Akan didapatkan

$$\mathcal{G}_1(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n}{\alpha_n^2} J_0(r \alpha_n) \left(\alpha_n J_1(r_0 \alpha_n) (\mathcal{G}_i - k r_0^2) + 2k r_0 J_2(r_0 \alpha_n) \right) e^{-a\alpha_n^2 t} \dots\dots\dots(7)$$

Adalah menarik untuk dicatat bahwa akar α_n persamaan-2 tergantung pada \mathcal{G}_i , r_0 , dan h . dengan Panas suatu batang bahan-bakar realistik melalui keseluruhan koefisien alih bahang h antara 3000 W/m2/K (gap besar) dan 9000 W/m2/K (gap kecil).



Gambar 1. Solusi persamaan-6 untuk suatu tangkai gap besar ditunjukkan oleh suku ke $n=1,2, 3$

Memecahkan persamaan-2 menghasilkan konstanta untuk celah lebar :

$$\alpha_1 = \frac{1.989815}{r_0}, \alpha_2 = \frac{4.713142}{r_0}, \alpha_3 = \frac{7.617708}{r_0},$$

Dan untuk celah sempit :

$$\alpha_1 = \frac{2.250880}{r_0}, \alpha_2 = \frac{5.177253}{r_0}, \alpha_3 = \frac{8.142228}{r_0},$$

Jika h mendekati takhingga , maka solusinya menjadi

$$\vartheta_1(r,t) = \vartheta_{cool} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n^2 t} \frac{J_0(r\alpha_n)}{\alpha_n^2 J_1^2(r_0\alpha_n)} k J_2(r_0\alpha_n) \dots\dots\dots(8)$$

Dalam hal ini α_n adalah akar positif fungsi $J_n(r,a)$, bernilai 2.404825, 5.520078, 8.653728,...

$$\alpha_1 = \frac{2.404825}{r_0}, \alpha_2 = \frac{5.520078}{r_0}, \alpha_3 = \frac{8.653728}{r_0}, \dots$$

Hubungan ini memungkinkan untuk belajar masalah itu. Gambar 1 menunjukkan bahwa n=1 hanya penting sepanjang 2-3 detik yang pertama menyangkut pemadaman transien. Oleh karena itu, persamaan-6 dapat diberlakukan bagi temperatur pusat bahan bakar pada r = 0 dan disederhanakan menjadi

$$\vartheta(r=0,t) \approx \vartheta_{cool} + a_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \dots\dots\dots(9)$$

Dengan,

$$\tau = \frac{c_p \rho}{\lambda \alpha_1^2} = \frac{1}{a \alpha_1^2} \dots\dots\dots(10)$$

mungkin diperlakukan sebagai tetapan-waktu dari proses pemadaman transien ini. Untuk

batang bahan-bakar “khas” telah diperoleh suatu tetapan-waktu 6.8 s untuk tangkai gap yang besar dan 5.3 s untuk tangkai gap yang kecil.

Persamaan-2 dapat dipecahkan kira-kira untuk α_1 :

$$\alpha_1 \approx \frac{2.404825}{r_0} \left(1 - \frac{\lambda}{h r_0} \right) \dots\dots\dots(11)$$

yang mengarah pada :

$$\tau \approx \frac{c_p \rho r_0^2}{5.8 \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{h r_0} \right)^2} \dots\dots\dots(12)$$

Bila $\lambda/h.r_0 = 1$ pendekatan-12 dapat tulis sebagaimana pendekatan-13

$$\tau \approx \frac{c_p \rho r_0 \left(r_0 + \frac{2\lambda}{h} \right)}{5.8 \lambda} \dots\dots\dots(13)$$

yang sangat serupa pada solusi yang disampaikan dalam acuan [5].

$$\tau \approx \frac{c_p \rho r_0 \left(r_0 + \frac{4\lambda}{h} \right)}{8 \lambda} \dots\dots\dots(14)$$

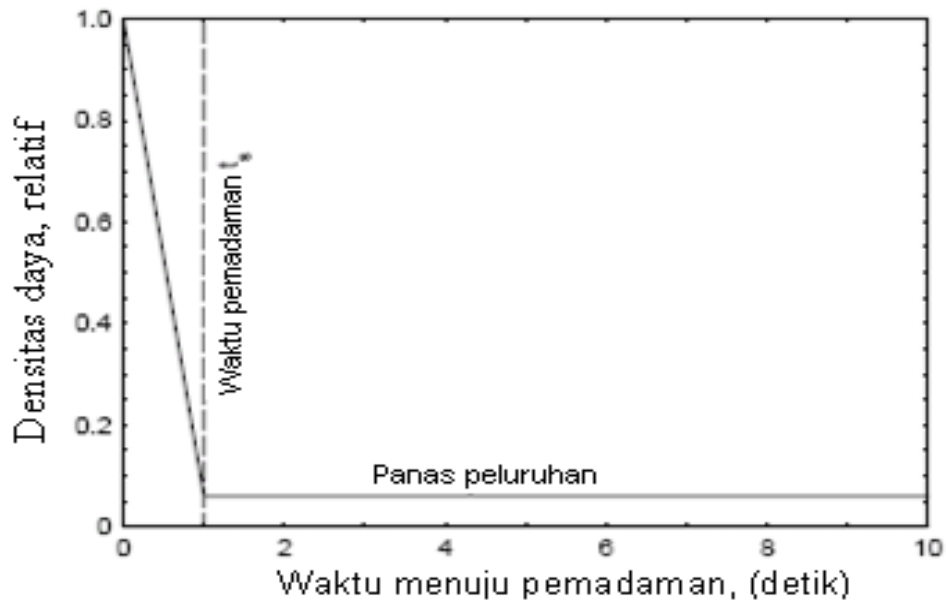
Bagi suatu model parameter yang *lumped*, El-Wakil memberi penyelesaian [6] :

$$\tau \approx \frac{c_p \rho r_0}{2 h} \dots\dots\dots(15)$$

Persamaan 8 digunakan oleh Slovacek [7], di dalam makalahnya, ketergantungan utama dari tetapan-waktu dievaluasi. Kesimpulan Yang penting adalah bahwa dengan menentukan tetapan-waktu secara eksperimen dari eksperimen pemadaman, banyak detail tangkai bahan bakar seperti penurunan

konduktivitas termal dan/atau variasi dari konduktansi gap (ukuran gap) dengan tingkat

bakaran dapat diungkapkan.



Gambar 2. Model penyederhanaan rapat (densitas) daya mulai saat pemadaman

Ketika mempertimbangkan suatu pemadaman-segera daya yang realistis sumber $q''F(t)$ harus diperhitungkan mendorong ke arah ungkapan tidak nol untuk $2n$. Dengan menerapkan suatu evolusi waktu yang disederhanakan seperti digambarkan di atas dapat diuraikan dengan persamaan berikut :

untuk $0 < t < t_s$,
 $Ft = b.t$

dengan notasi

$$b = 1 - \frac{q''_d}{q''_{op}} \quad t_s \quad \dots\dots\dots(16a)$$

untuk $t_s < t$

$$F(t) = 1 - bt_s = \frac{q''_d}{q''_{op}} \quad \dots\dots\dots(16b)$$

Di sini q menjadi rapat daya reaktor yang operasional sebelum padam. Perilaku setelah penyelesaian dari padam cepat didekati oleh suatu rapat daya tetap dq yang timbul dari panas peluruhan.

Selama waktu 0 sampai $< t_s$ detik, dapat ditulis dari

$$\vartheta_2(r,t) = \frac{q''_{op}}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\beta_n}{\alpha_n^3} r_0 J_1(r_0 \alpha_n) \left[1 - bt + \frac{b}{a\alpha_n^2} - \left(1 + \frac{b}{a\alpha_n^2} \right) e^{-a\alpha_n^2 t} \right] J_0(r\alpha_n) \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

dan untuk waktu setelah t_s itu menjadi

$$\vartheta_2(r,t) = \frac{q''_{op}}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\beta_n}{\alpha_n^3} r_0 J_1(r_0 \alpha_n) \left[1 - bt_s + \left(\frac{b(e^{a\alpha_n^2 t_s} - 1)}{a\alpha_n^2} - 1 \right) e^{-a\alpha_n^2 t} \right] J_0(r\alpha_n) \right\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

Karenanya, sebagai tambahan terhadap suku eksponensial yang telah ada $1n$, suatu tetapan dan suatu suku linier muncul, yang belakangan menghilang untuk t_s . Setelah penjumlahan 1 dan 2, total solusi dapat dinyatakan sebagai berikut:

Selama 0 sampai t_s :

$$\vartheta(r,t) = \frac{q''_{op}}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\beta_n}{\alpha_n^3} r_0 J_1(r_0 \alpha_n) \left[1 - bt + \frac{b}{a\alpha_n^2} \right] J_0(r\alpha_n) \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} w_n J_0(r\alpha_n) e^{-a\alpha_n^2 t}$$

.....(19)

dengan :

$$w_n = \frac{\beta_n}{\alpha_n^2} r_0 \left\{ \left(\alpha_n J_1(r_0 \alpha_n) (\theta_i - kr_0^2) + 2kr_0 J_2(r_0 \alpha_n) \right) - \frac{q_{op}^m}{\lambda \alpha_n} J_1(r_0 \alpha_n) \left(1 + \frac{b}{a \alpha_n^2} \right) \right\}$$

Untuk $t > t_s$

$$\theta(r,t) = \frac{q_{op}^m}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\beta_n}{\alpha_n^2} r_0 J_1(r_0 \alpha_n) [1 - bt_n] J_0(r \alpha_n) \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} w_n J_0(r \alpha_n) e^{-a \alpha_n^2 t}$$

.....(20)

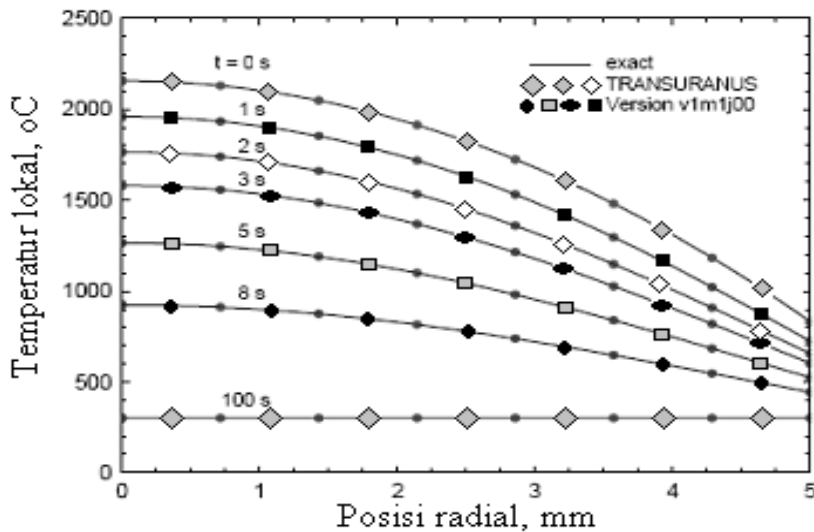
Dengan notasi

$$w_n = \frac{\beta_n}{\alpha_n^2} r_0 \left\{ \left(\alpha_n J_1(r_0 \alpha_n) (\theta_i - kr_0^2) + 2kr_0 J_2(r_0 \alpha_n) \right) + \frac{q_{op}^m}{\lambda \alpha_n} J_1(r_0 \alpha_n) \left(\frac{b(e^{a \alpha_n^2 t_s} - 1)}{a \alpha_n^2} - 1 \right) \right\}$$

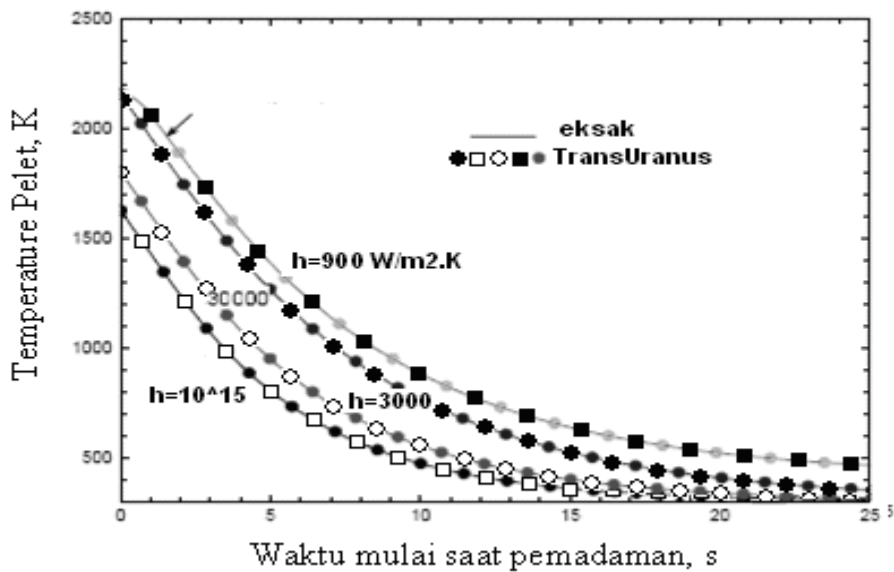
HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi numerik untuk persamaan-6, 7, 18 dan 19 telah dilakukan dengan menggunakan data dalam tabel data. Plotting hasil disajikan pada Gambar 3 dan 4.

digunakan untuk mengoreksi dan membuat perlakuan numerik yang benar menyangkut analisa termal dengan kode Transuranus. Dua contoh ditunjukkan di dalam Gambar 3 dan 4. Ordinat Gambar 3 menyatakan temperatur lokal dalam pelet, absis menyatakan posisi radial dari pusat pelet hingga radius 5 mm, kurva biru menunjukkan korelasi temperatur loka dengan posisi radial untuk 7 saat berbeda: 1, 2, 3, 5, 8, 100 detik, sementara noktah merah menyatakan hasil dengan menggunakan Transuranus. Noktah-noktah tidak ada yang di luar kurva. Garis, berarti kesesuaian yang bagus. Pada Gb.4 absis menyatakan temperatur pada poros pelet sementara ordinat menyatakan waktu dimulai saat pelaksanaan pemadaman. Kurva solusi evolusi temperatur poros pelet paling atas diperoleh dengan menggunakan $h = 9000 \text{ W/m}^2/\text{K}$, kemudian berturut-turut kurva di bawahnya untuk nilai h berbeda dan makin besar. Temperatur pusat terhitung lebih rendah dengan transfer panas yang lebih baik. Data perhitungan dengan solusi eksak disajikan sebagai noktah. Semua noktah berada dalam kurva, jadi diperoleh kesesuaian cukup baik antara solusi eksakta dan solusi Transuranus, untuk kasus sederhana.



Gambar 3. Distribusi temperatur radial di dalam pelet bahan bakar pada berbagai waktu setelah eksekusi pemadaman



Gambar 4. Temperatur garis pusat suatu batang bahan-bakar selama pemadaman dihitung dengan data koefisien perpindahan panas (alih bahang) konveksi

Untuk perbandingan dari data percobaan terhadap kalkulasi Transuranus digunakan prosedur pengepasan yang sama dari seperti diuraikan di dalam [7], yaitu. suatu penjumlahan suatu konstanta dan dua fungsi exponen:

$$\vartheta(t) - \vartheta_{cool} = A + B e^{-\frac{t}{\tau_1}} + C e^{-\frac{t}{\tau_2}} \dots\dots\dots (21)$$

di mana jika $\vartheta(t)$ adalah menjadi temperatur pusat bahan bakar pada waktu t setelah start padam dan dingin menandakan temperatur pendingin. Persamaan-20 meliputi total lima parameter bebas yang dievaluasi secara sistematis, yaitu: tetapan temperatur A , amplitudo B dan C , dan tetapan waktu τ_1 dan τ_2 , yang biasa disebut secara berturut-turut tetapan-waktu pelengkap dan utama. Parameter C dan pelengkap tetapan-waktu τ_2 meringkas penjumlahan dari semua terminologi yang timbul dari akar yang lebih tinggi a_n di dalam persamaan -2 [1]. Asumsi ini

dibenarkan oleh pengurangan cepat amplitudo ke terminologi yang lebih tinggi (Gambar 2). Istilah menyangkut studi pelengkap tetapan-waktu juga meliputi detil dari pemadaman sebagai disampaikan dalam persamaan-16 selama waktu dari 0 sampai t_s .

Dalam rangka mengkonfirmasi kesimpulan ini satu set eksperimen kuantitatif dilakukan dengan menerapkan kode Transuranus kepada bentuk wujud reaktor Halden TF-18-562 [2] dengan suatu waktu iradiasi singkat 2 jam. Di bawah kondisi-kondisi ini pengaruh dari evolusi waktu menyangkut rapat daya sepanjang pemadaman atas parameter pengepasan yang tersebut di atas diteliti. Rapat daya dq setelah penyelesaian pemadaman dianggap tetap dalam rentang waktu dari 0 hingga 20 detik. Berangkat dari waktu tipikal pada eksperimen sungguhan ($t_s = 1$ s; $qd/qp = 6\%$) kedua level peluruhan panas dan waktu berlangsungnya scram divariasikan secara sistematis dalam asupan Transuranus Tabel 1 menampilkan kombinasi pilihan yang diteliti.

Tabel 1. Analisis pengaruh kondisi pemadaman pada hasil pengepresan dua eksponensial

t_s [s]	q_d''' / q_{op}''' [%]	τ_1 [s]	τ_2 [s]	A [K]	B [K]	C [K]
1	6	3.78 ± 0.03	0.85 ± 0.02	34.7 ± 0.5	669 ± 4	-169 ± 4
1	2	3.76 ± 0.03	0.85 ± 0.02	15.4 ± 0.6	696 ± 4	-177 ± 4
0.1	6	3.85 ± 0.03	0.81 ± 0.04	34.2 ± 0.5	585 ± 4	-82 ± 4
0.1	2	3.80 ± 0.03	0.83 ± 0.04	15.0 ± 0.5	611 ± 4	-89 ± 4

Perilaku dari temperatur pusat bahan bakar yang dihitung ditunjukkan di dalam Tabel 1. Jangka waktu padam cepat mempunyai dampak penting hanya pada beberapa detik awal, sedangkan panas peluruhan menentukan perilaku jangka panjang yang cocok diwakili oleh parameter A. Analisis mengkonfirmasi pengaruh kedua kondisi ternyata tidak berarti dibandingkan tetapan-waktu utama.

Seperti diharapkan dari solusi tertutup, pengaruh padam cepat pada tetapan-waktu pelengkap 2 hanyalah kecil, namun istilah menyangkut tetapan-waktu pelengkap tetap berlaku walaupun tidaklah jelas perbedaannya dalam Gambar 5. Yang jelas antara kurva untuk 1 s dan 0.1 s muncul dari amplitudo berbeda dari terminologi yang lebih tinggi menyangkut penjumlahan eksponensial.

Pertimbangan sebelumnya tidak memperhitungkan dampak dari tanggapan waktu pengukuran temperatur termokopel yang dipengaruhi oleh proses perpindahan kalor dari bahan bakar kepada termokopel, dan mendorong ke arah suatu penundaan sinyal itu. ini dapat diuraikan di dalam suatu perkiraan pertama oleh suatu perubahan bentuk waktu menggunakan waktu t mematuhi ($t < t_s$), untuk penjumlahan tanpa batas manapun dari terminologi bersifat eksponen.

Jelas bahwa koreksi ini tidak mempengaruhi tetapan-waktu dari suku

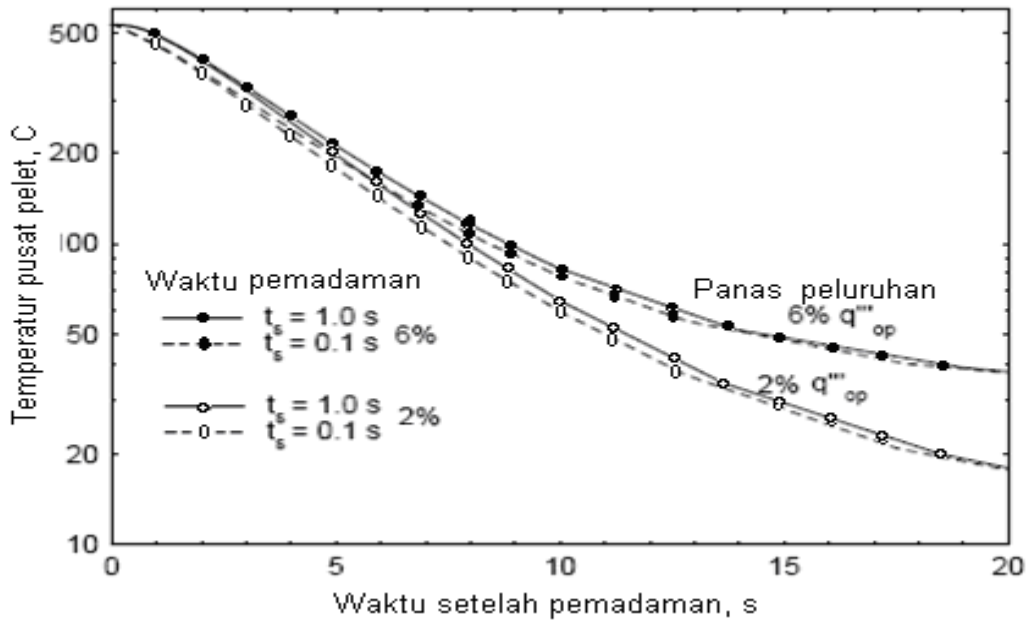
individu. Akan tetapi, amplitudo atau faktor kekuatan ditingkatkan dan semakin kecil tetapan-waktu individu semakin tinggi dampak amplitudo yang bersesuaian. Perlu dicatat bahwa suatu waktu tanggap 0,5 s menyebabkan efek pada parameter B dan C yang dapat dibandingkan untuk perpanjangan waktu pemadaman dari 0.1 s ke 1 s.

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-\frac{t-\Delta t}{\tau_n}} = \sum_{n=1}^{\infty} a'_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

dengan notasi:

$$a'_n = a_n e^{\frac{\Delta t}{\tau_n}}$$

Dampak dari pengukuran temperatur diteliti lebih lanjut dengan dua perkiraan berbeda yang menggambarkan perpindahan kalor kepada *termokopel* itu. Beberapa temperatur garis pusat terhitung dikoreksi dengan cara ini. Konfirmasi pertimbangan matematikal di atas itu ditemukan bahwa efek dari *termokopel* hanya tercakup di amplitudo dari yang bersifat eksponen kedua. Tetapan-waktu Yang utama 1- seperti diperoleh dengan pengepresan- tidaklah terpengaruh oleh koreksi *termokopel*. Oleh karena itu, tidak ada koreksi untuk tanggapan temperatur yang perlu diperhitungkan dalam analisis lebih lanjut. Untuk evaluasi manapun menyangkut bukti eksperimental selama suatu reaktor padam cepat tetapan-waktu yang utama harus digunakan sebagai dasarnya.



Gambar 5. Evolusi temperatur pusat batang bahan bakar dihitung dengan 2 kondisi panas peluruhan bahan bakar berbeda.

Dalam rangka menarik kesimpulan lebih lanjut dari evolusi temperatur bahan bakar selama dan setelah reaktor padam adalah diperlukan perbandingan kalkulasi model yang terperinci dengan data bersifat percobaan. Analisis ini didasarkan dari sebagian kumpulan eksperimen pemadaman yang dilakukan di dalam reaktor riset berpendinginan air mendidih OECD di Halden/Norway [7] di mana temperatur pusat bahan bakar dari suatu total 52 padam cepat yang telah diteliti sejak 1979. Pada penelitian

ini dipilih eksperimen di mana hanya digunakan He sebagai gas pengisi dan menurut [7] temperatur bahan bakar selamanya dijaga di bawah ambang pelepasan gas pembelahan menurut kriteria Vitanza [9]. Tabel 2 memuat data disain dasar tersedia yang bersesuaian dengan bahan bakar [8]. Konfigurasi ini dipilih untuk memungkinkan suatu studi optimum menyangkut dampak dari disain bahan bakar walaupun adalah mustahil memisahkan pengaruh dari parameter individu.

Tabel 2. Data batang *pin* elemen bakar

Experiment ID	Fuel outer radius [mm]	Fuel inner radius [mm]	Radial gap size [mm]	Cladding thickness [mm]	He fill gas pressure [MPa]	²³⁵ U initial enrichment [w/o]
TF-18-562	5.295	1.02	0.036	0.80	0.1	3.95
TF-2-552	4.045	0.90	0.065	0.64	1.0	3.5
TF-2-553.1	5.2265	1.0	0.0995	0.81	0.5	4.45
TF-2-567	5.22	1.0	0.115	0.79	0.5	4.023

Untuk mendiskusikan kecenderungan umum dari informasi percobaan yang tersedia [7] semua tetapan-waktu utama 1 yang berhubungan dengan eksperimen dicantumkan di dalam Tabel 2 yang dikompilasi dari sebagai fungsi bakaran. Data percobaan tidak memperlihatkan ketergantungan lebih rumit pada bakaran, ini terbukti ketika dicoba dengan suatu garis lurus dan membuat normal ke 1 (*burnup* 0). Gambar 4 menunjukkan suatu kecenderungan yang umum dan jelas dari semua data. Itu dapat dibandingkan dengan perilaku faktor koreksi bagi waktu tanggap bila diasumsikan kontak perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin adalah sempurna, dengan h amat besar $1.0E+35$

Dibandingkan dengan persamaan-11:

$$\tau_1^{norm} = \frac{\tau_1(bu)}{\tau_1(bu=0)} = \frac{\lambda_0 \left(1 - \frac{\lambda_0}{hr_o}\right)^2}{\lambda \left(1 - \frac{\lambda}{hr_o}\right)^2}$$

Di sini, r_o adalah radius luar pelet, h koefisien perpindahan panas total antara bahan bakar dan pendingin dan λ rerata konduktivitas termal bahan bakar. Agar lebih jelas, pada Gambar 5 digunakan nilai rerata $h_{ro}=20$ W/(mK). Ini sesuai dengan nilai $h=4000$ W/(mK) untuk $r_o=5$ mm). Perilaku terkait dibandingkan dengannya guna menganggap perpindahan panas tak terhingga sehingga mengakibatkan fungsi menjadi sederhana untuk inversi konduktivitas termal. Kecenderungan ditunjukkan dengan temperatur rerata bahan bakar sebesar 900 K atau 1000 K memberi konfirmasi bahwa ketepatan temperatur rerata bahan bakar hanyalah berpengaruh kecil pada perilaku umum bahan bakar. Gambar 6 menunjukkan bahwa konduktivitas termal dengan jelas mendominasi ketergantungan menyeluruh dari waktu tanggap bahan bakar terhadap *burn up*.

SIMPULAN

Dari pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

Evolusi temperatur pusat bahan bakar selama reaktor padam dapat dengan baik didekati oleh penjumlahan suatu tetapan dan dua suku eksponensial, darinya suatu tetapan-waktu utama dapat disimpulkan. Telah ditunjukkan bahwa suku eksponensial dari tetapan-waktu pelengkap meliputi pengaruh jangka waktu pemadaman (waktu padam-cepat) dan pengukuran waktu tanggap. Suku eksponensial yang berisi tetapan-waktu utama mengungkapkan detail batang bahan-bakar, dirata-rata atas waktu padam-cepat .

Untuk kasus yang disederhanakan, solusi analitik bersesuaian dengan kalkulasi Transuranus.

Tetapan-waktu utama pada bakaran adalah linier dan laju bahang linier dapat ditentukan, dan direproduksi oleh Transuranus dengan model kalkulasi yang menggunakan suatu koefisien alih bahang tetap antara bahan bakar dan salut. Hasil penentuan tetapan waktu dengan model adiabatik dibandingkan dengan model standar yang diterapkan di dalam sistem Transuranus ternyata lebih rendah.

Perbandingan langsung yang lebih terperinci antara temperatur terukur dan yang terhitung perlu dilakukan dalam rangka memecahkan pertentangan yang signifikan antara eksperimen dan ramalan diperoleh dengan model standar. Analisis seperti ini harus memperhitungkan sejarah iradiasi dan disain tangkai bahan bakar yang terperinci.

DAFTAR PUSTAKA

1. W. WIESENACK et al., "Review of Halden Reactor Project high burnup fuel data that can be used in safety analyses", Nucl. Eng. and Design 172 (1997) 83
2. K. LASSMANN, "TRANSURANUS : A Fuel Analysis Code Ready for Use",

- Journal of Nuclear Materials 188 (1992) 295
3. I.N. BRONSTEIN, K. A. SEMANDJE-JEW, "*Taschenbuch der Mathematik*", BSB Teubner Leipzig 1979, Chap. 3.3.2
 4. H.S. CARSLAW, J.C. JAEGER, "Conduction of heat in solids", Oxford University Press 1959, Chap. VII
 5. K. LASSMANN, "*Die Transiente Version des Rechenprogramms URANUS*", Internationale Zeitschrift fur Kernenergie (ATW) XXII (1977)
 6. M.M. EL-WAKIL, "*Nuclear Heat Transport*", International Textbook Co. (1971).
 7. M. SLOVACEK, "*Utilisation of Transient Data for Assessment of Fuel Thermal Properties*", report HWR-414 (1994).
 8. H. DEVOLD, "*An Updated Compilation of Test Fuel Data Sheets in The 500 Series*", Report HWR-273 (1990).
 9. C VITANZA, U Graziani, N T Fødestrømmen and K O Vilpponen: "*Fission Gas Release from In-Pile Pressure Measurements*", HPR-221.10 paper 38, presented at the EHPG Loen, 1978.
 10. R J WHITE, "A New Mechanistic Model for the Calculation of Fission Gas Release", ANS International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, West Palm Beach, Florida, USA, 17-21 April 1994.