

PENDAHULUAN

Adanya gap antara pelet dengan kelongsong pada elemen bakar PWR memberikan kemungkinan besar terjadi ketidaksentrisan posisi pelet terhadap kelongsongnya sehingga ada bagian yang merapat ke sisi dalam kelongsong dan pada sisi sebaliknya merenggang. Karena gap berisi gas dengan konduktivitas termal yang relatif rendah dibandingkan pelet bahan bakar itu sendiri, maka ketidaksimetrisan gap tersebut menimbulkan ketidaksimetrisan pula pada distribusi temperatur maupun fluks termal dalam arah azimutal. Pada kondisi tunak pengaruh ketidaksimetrisan tersebut telah diteliti dan diketahui meningkatkan variasi azimutal temperatur dan fluks pada kelongsong^[1,2] sehingga menurunkan nilai DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*) yang menjadi salah satu tolok ukur keselamatan PLTN tipe PWR dari 2,4 pada kondisi simetris ke 1,6 jika tak simetris^[1]. Diamati juga terjadinya perbedaan gradien temperatur gap dan besar fluks yang signifikan antara sisi renggang dan sisi rapat^[1,2]. Dengan lebih tingginya nilai fluks kalor di sisi rapat dibanding nilai fluks pada kondisi sentrisnya, maka nilai DNBR juga menurun sehingga pada kondisi tertentu bisa berdampak pada keselamatan elemen bakar. Pada kondisi stedi tersebut, hingga lebar gap 4% dari diameter luar kelongsong, nilai DNBR turun ke angka 1,6 yang berarti batas keselamatan elemen bakar, yaitu dengan DNBR minimal 1,3 (menurut NRC) masih belum terlampaui. Belum terlampauinya batas keselamatan pada kondisi tunak tidak berarti demikian juga pada kondisi kecelakaan atau kondisi transien sehingga diperlukan investigasi pada kondisi kecelakaan tersebut.

Dalam penelitian ini investigasi pengaruh ketidaksimetrisan pelet tersebut pada kondisi transien dilakukan khususnya ketika reaktor mengalami kecelakaan kehilangan aliran akibat matinya seluruh pompa primer. Data yang digunakan adalah data tipikal PWR 1000 MWe^[3,4], sedangkan model transien penurunan laju alir menggunakan data disain dari PLTN AP1000 ketika seluruh pompa pendingin primer mati akibat padamnya sumber listrik^[5]. Daya peluruhan dimodelkan menggunakan formula yang diusulkan Todreas dan Rust sebagai pendekatan terhadap data American Nuclear Society (ANS)^[6]. Investigasi dibatasi pada 100 detik pertama saja untuk menghindari rejim pendidihan yang bisa mengubah secara drastis nilai daya maupun sifat-sifat air pendingin yang digunakan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana batas-batas keselamatan elemen bakar dengan pelet yang eksentris belum terlampaui jika mengalami kecelakaan kehilangan aliran akibat matinya seluruh pompa pendingin primer yang beroperasi. Untuk mendapatkan hasil

yang konservatif, daya pembangkitan yang dipilih adalah daya maksimum yang memberikan fluks kalor maksimum, baik dalam arah radial maupun aksial.

Metodologi yang digunakan adalah dengan menyusun terlebih dahulu suatu paket program perhitungan numerik untuk mencari solusi persamaan konduksi kalor pada kondisi transien.

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah diperolehnya data transien parameter yang menjadi indikator keselamatan, seperti temperatur maksimum kelongsong, temperatur maksimum pelet, dan nilai DNBR minimumnya. Dengan data tersebut dapat diprediksi secepat apa tindakan antisipatif sebaiknya dilakukan.

TEORI DAN TATA KERJA

Metode yang digunakan adalah dengan menyusun program perhitungan numerik beda hingga dalam skema implisit dengan menggunakan bahasa pemrograman sekaligus program aplikasi Matlab untuk memecahkan persamaan konduksi dalam koordinat silindris pada kondisi transien^[7,8,9,10] seperti pada persamaan (1)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{q'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

dengan: r : posisi radial (m)

θ : posisi azimutal (radian)

T : temperatur (°C)

q''' : daya volumik yang dibangkitkan (W/m³), diasumsikan konstan pada kondisi tunak

k : konduktivitas termal (W/mK), diasumsikan konstan.

α : difusivitas kalor (m²/detik)

Penggunaan skema implisit dalam hal ini lebih menguntungkan karena bisa menggunakan jarak antar simpul yang kecil tanpa resiko terjadi ketidakstabilan perhitungan. Jarak simpul yang sangat kecil pada umumnya dijumpai dalam penggunaan koordinat silindris, terutama di daerah dekat sumbu silinder.

Ketika terjadi kecelakaan kehilangan aliran yang diikuti dengan padamnya reaktor, daya pembangkitan menurun drastis mengikuti formula pendekatan pada persamaan (2) berikut:

$$\frac{P}{P_0} = 0,1 \left[(t + 10)^{-0,2} - 0,87 (t + 2 \times 10^7)^{-0,2} \right] \quad (2)$$

dengan P adalah daya reaktor selama transien (W), P₀ adalah daya reaktor sebelum padam (W), t adalah waktu yang dihitung mulai saat pemadaman (detik).

Antara permukaan luar kelongsong dengan air pendingin, perpindahan kalor berlangsung secara

konveksi paksa karena air pendingin di PWR dialirkan secara paksa oleh pompa primer. Nilai koefisien perpindahan kalor dalam analisis ini diasumsikan konstan sebagai fungsi dari bilangan Nusseltz (Nu), diameter ekivalen aliran (De) dan konduktivitas air k_f yang dihitung berdasarkan persamaan

$$h = \frac{Nu.k_f}{D_e} \quad (3)$$

Bilangan Nusseltz merupakan fungsi dari Reynold ($Re = \frac{D_e G}{\mu}$ dengan G kecepatan massa dalam Kg/det.m² dan μ viskositas dinamik dalam Pa.det) dan Prandl (Pr) dalam korelasi Dittus-Boelter^[9,10]

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4)$$

Parameter DNBR adalah perbandingan antara fluks kalor kritis dengan fluks maksimum di permukaan kelongsong elemen bakar PWR. Fluks kalor kritis merupakan nilai minimum fluks kalor yang membawa kelongsong masuk dalam kondisi "burn-out" yang ditandai dengan melonjaknya temperatur akibat keringnya permukaan. Oleh karena itu pendisain reaktor menetapkan DNBR minimum sebagai salah satu kriteria keselamatan reaktor, besarnya bervariasi tergantung pada disain reaktor dan juga negara tempat dioperasikannya reaktor tersebut.

Besar fluks kalor kritis bisa diestimasi menggunakan persamaan yang disarankan oleh Lienhard dan Eichhorn^[10] untuk konveksi paksa, yaitu

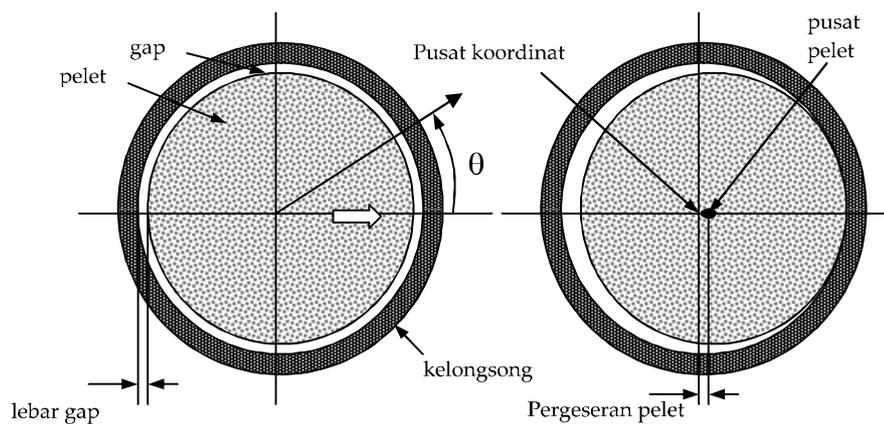
$$q''_{kritis} = \rho_u h_{fg} V \left[\frac{\left(\frac{\rho_l}{\rho_u}\right)^{3/4}}{169\pi} + \frac{\left(\frac{\rho_l}{\rho_u}\right)^{1/2}}{19,2\pi We^{1/3}} \right] \quad (5)$$

Bilangan Weber We dirumuskan sebagai

$$We = \frac{\rho_u V^2 D}{\sigma} \quad (6)$$

dengan ρ_u = massa jenis uap (kg/m³)
V = kecepatan aliran (m/det)
 ρ_l = massa jenis air (kg/m³)
 σ = tegangan permukaan air-uap (N/m)
 h_u = kalor laten didih (J/kg)

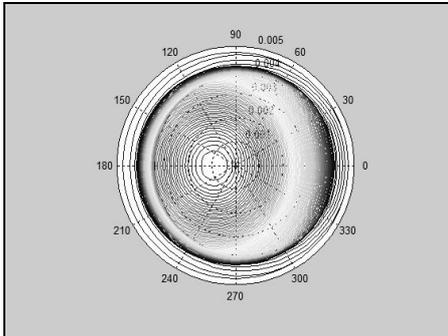
Investigasi terhadap transien temperatur dan DNBR dilakukan dalam periode 100 detik awal terjadinya kecelakaan. Pada analisis kondisi tunak, yaitu reaktor PWR dengan daya 1000 MWe, rapat daya maksimum 8,27x10⁸ W/m³, pelet UO₂ berdiameter 8,19 mm, kelongsong zirconium dengan diameter luar 9,166 mm, diameter dalam 8,53 mm. Konduktivitas termal ditetapkan untuk pelet 2,8 W/m°C, gap 0,51 W/m°C dan kelongsong 13 W/m°C. Kecepatan massa pendingin ditetapkan sebesar 3,67 ton/det.m² dan temperatur pendingin sebesar 315 °C diasumsikan konstan pada periode investigasi kejadian tersebut. Gambar 1 menunjukkan penampang dari elemen bakar dan daerah analisis yang digunakan dalam perhitungan untuk pelet sentris dan eksentris.



Gambar 1. Penampang elemen bakar PWR dengan pelet sentris dan eksentris

HASIL DAN PEMBAHASAN

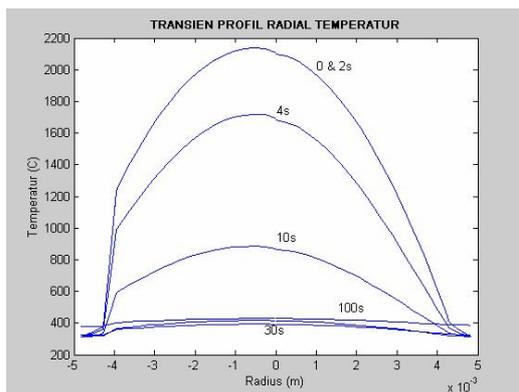
Kontur temperatur pada elemen bakar dengan pelet eksentris ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kontur temperatur

Gambar kontur temperatur tersebut menunjukkan bahwa temperatur terpanas di dalam pelet tidak lagi terletak di pusat pelet, tetapi bergeser ke arah sisi renggang. Pergeseran titik maksimum tersebut menunjukkan juga ketidakseimbangan aliran fluks kalor yang cenderung lebih besar ke arah sisi rapat, hal ini ditunjukkan dari lebih luasnya daerah di sebelah kanan titik maksimum dibandingkan sebelah kiri. Perbandingan luas daerah tersebut menggambarkan perbandingan daya pembangkitan yang disalurkan.

Transien profil radial temperatur elemen bakar pada saat stedi, 2, 4, 10, 30 dan 100 detik diberikan pada Gambar 3.

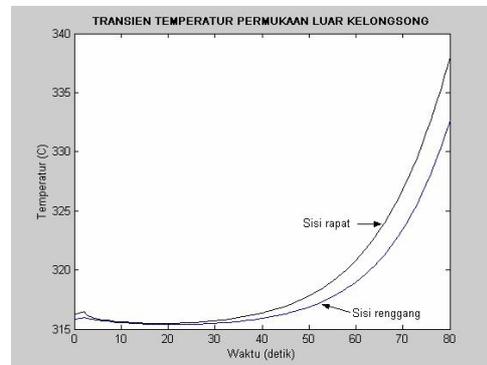


Gambar 3. Transien profil radial temperatur

Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada saat 2 detik setelah aliran hilang, temperatur pelet belum berbeda dengan kondisi tunaknya walaupun pendinginan sudah berkurang. Hal ini disebabkan karena pemadaman reaktor belum terjadi dan lambatnya perambatan kalor di dalam

pelet itu sendiri. Lain halnya ketika reaktor mulai padam, dengan cepat temperatur turun seiring dengan turunnya daya dan naik kembali pada waktu yang relatif lama. Pengaruh ketidaksentrisan posisi pelet sangat terlihat dengan besarnya gradien temperatur di sisi renggang dibandingkan dengan sisi rapat. Sesuai dengan kontur temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 2, posisi temperatur puncak terlihat bergeser dari radius nol ke arah sisi renggang.

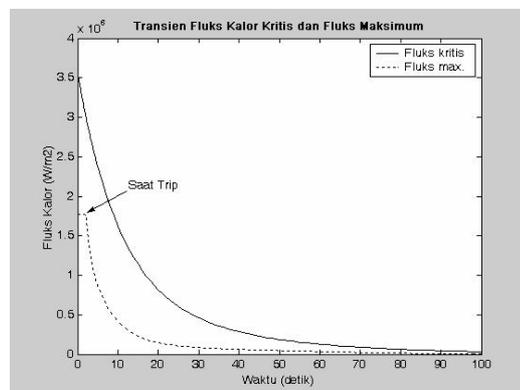
Transien temperatur permukaan kelongsong pada sisi rapat dan sisi renggang ditunjukkan pada Gambar 4. Skala waktu pada Gambar ini dibatasi hingga 80 detik untuk membatasi temperatur kelongsong masih di bawah temperatur saturasi air pendingin sehingga belum terjadi perubahan signifikan terhadap daya maupun sifat fisis air.



Gambar 4. Transien temperatur permukaan kelongsong

Perbedaan temperatur kedua sisi kelongsong relatif kecil pada kondisi tunak dan bahkan menurun di awal transien kemudian naik kembali setelah 20 detik hingga mencapai $\pm 5^\circ\text{C}$ pada 80 detik.

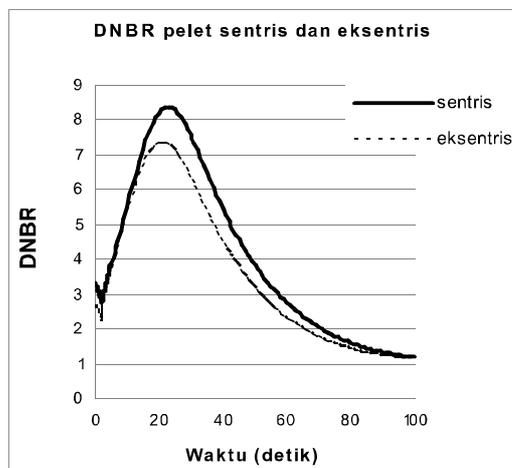
Gambar 5 menunjukkan transien fluks kalor maksimum di permukaan kelongsong dan fluks kalor kritisnya.



Gambar 5. Transien fluks kalor

Fluks kalor kritis menurun seketika dengan menurunnya laju alir, sedangkan fluks kalor maksimum menurun setelah reaktor padam (setelah 2,2 detik). Selama transien fluks maksimum semakin mendekati fluks kritis. Hingga 100 detik setelah matinya pompa, nilai fluks maksimum masih di bawah nilai kritisnya sehingga diperkirakan kondisi “burn-out” kelongsong yaitu naiknya temperatur kelongsong secara cepat belum terjadi dalam 100 detik setelah matinya pompa.

Hal ini juga ditunjukkan dari transien DNBR pada Gambar 6 sekaligus membandingkannya dengan kondisi sentris.



Gambar 6. Transien DNBR

Terlihat bahwa DNBR menurun sesaat pompa mati dan kemudian naik dengan pesat setelah reaktor padam hingga mencapai maksimum sebesar 7,3603 pada saat 21 detik dan menurun kembali karena fluks peluruhan relatif tetap sedangkan aliran pendingin semakin kecil. Hingga 100 detik perhitungan, fluks kalor kritis belum terlampaui walaupun sudah sangat dekat (nilai DNBR mendekati 1) namun nilai batas keselamatan dengan DNBR minimal 1,3 sudah terlampaui. Dibandingkan dengan kondisi pelet sentris, nilai DNBR pelet eksentris relatif lebih rendah ±10%. Perbandingan beberapa parameter termal antara kedua kondisi pelet diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan parameter termal

Parameter pembanding	sentris	eksentris
Tmax pelet awal (°C)	2152,65	2136,83
Tmax pelet 100 det (°C)	429,79	429,04
Tmax kelongsong awal	316,00	316,24
Tmax kelongsong 100s	383,39	387,01
Saat Tmax kel =Tsat	86 detik	85 detik
DNBR awal	3,3422	2,6672
DNBR 100 detik	1,1934	1,1334
DNBR max.	8,3868	7,3603
Saat DNBR max.	23 detik	21 detik
Saat kriteria DNBR 1,3	92 detik	85 detik

Dari perbandingan parameter termal kedua kondisi pelet tersebut terlihat bahwa temperatur maksimum pelet eksentris pada kondisi awal relatif lebih rendah (16°C) dibandingkan pelet sentris, hasil ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya^[1,2]. Pada 100 detik kondisi transien, perbedaan tersebut semakin kecil meskipun temperatur pelet eksentris tetap sedikit lebih rendah. Hal ini menunjukkan pengaruh naiknya fluks akibat merapatnya pelet di satu sisi lebih dominan dibandingkan menurunnya fluks akibat merenggangnya pelet di sisi yang berlawanan.

Berbeda dengan pelet sentris, temperatur maksimum permukaan kelongsong pada pelet eksentris justru sedikit lebih tinggi pada kondisi tunak/awal yaitu hanya berbeda 0,24°C dan melebar hingga 3,62°C pada 100 detik. Hal ini menunjukkan lebih tingginya fluks kalor maksimum yang keluar di permukaan kelongsong, khususnya sisi rapat dibandingkan pada pelet sentris.

Ditinjau dari aspek waktu pencapaian nilai-nilai parameter penting, untuk pelet eksentris secara umum lebih cepat pencapaiannya, yaitu dalam mencapai temperatur saturasi fluida yang memungkinkan mulai terjadinya pendidihan lokal lebih cepat 1 detik, saat mencapai nilai maksimum DNBR lebih cepat 2 detik dan saat mencapai batas kriteria DNBR minimum 1,3 lebih cepat 7 detik sehingga memerlukan tindakan mitigasi kecelakaan yang lebih cepat.

Perlu dicermati bahwa investigasi ini belum memperhitungkan pendinginan melalui konveksi alamiah yang akan mulai berperan ketika aliran paksa dari pompa sudah mendekati nol. Konveksi alamiah ini diharapkan bisa mengangkat kembali nilai DNBR yang sempat turun mendekati nilai kritisnya. Analisis terhadap konveksi alamiah ini haruslah melibatkan seluruh sistem primer secara keseluruhan, tidak hanya terbatas pada teras saja

seperti dalam investigasi ini. Disain PLTN generasi baru pada umumnya telah memperhitungkan kemampuan pembuangan kalor peluruhan secara konveksi alamiah ini.

KESIMPULAN

Dari investigasi ini dapat disimpulkan bahwa kecelakaan kehilangan aliran dengan matinya seluruh pompa pendingin primer berdampak serius terhadap keselamatan yang ditunjukkan dengan turunnya nilai DNBR hingga lebih rendah dari kriteria keselamatan minimum yang disyaratkan. Ketidaksentrisan pelet di dalam kelongsong berpengaruh mengurangi tingkat keselamatan dengan mempercepat pencapaian batas minimum DNBR dari 92 detik pada kondisi sentris ke 85 detik pada kondisi eksentris.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Dipl. Ing. Andi Sofrani dan Ir. Surip Widodo, MIT atas bantuannya dalam mendapatkan data referensi yang diperlukan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. HENDRO TJAHOJONO, "Pengaruh ketidaksentrisan pellet terhadap parameter termal elemen bakar PWR pada kondisi tunak", prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir II, 2009.
2. SUH YOUNG-KEUN and SOHN DONG-SEONG, "The Effects of Fuel Pellet Eccentricity on Fuel Rod Thermal Performance". Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 20, Number 3, September, 1988.
3. S. GLASSTONE, Alexander Sessionske, "Nuclear Reactor Engineering", Van Nostrand Reinhold Company, third edition, 1980,
4. M. GAUTHRON, "Introduction au génie nucléaire: Récupération d'énergie et filières", ISTN – CEA, Saclay-Paris, 1986
5. AP1000 European Design Control Document - Accident Analysis
6. McMaster Nuclear Reactor, "Decay Heat Estimates for MNR", Technical Report 1998-03.
7. T. BASARUDDIN, "Metoda Beda Hingga", Penerbit PT. Elex Media Komputindo, kerjasama Gramedia dan Pusat Antar Universitas Ilmu Komputer Universitas Indonesia, 1994.

8. DUANE HANSELMAN dan BRUCE LITTLEFIELD, "Mastering MATLAB 5, a comprehensive tutorial and reference", Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
9. J.P. HOLMAN, "Heat Transfer, SI Metric Edition", McGraw-Hill Book Company, 1986.
10. INCROPERA & DE WITT, "Fundamental of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Son, 4th edition, 1996.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

Perbandingan pengamatan sebaiknya juga dilihat pada capaian DNBR =1, apakah signifikan perbedaannya?

(Sihana, FT Fisika UGM)

Jawaban :

Terima kasih atas sarannya. Dari pengamatan lebih dari 100 detik perbedaan antara DNBR simetris dan asimetris memang semakin tidak signifikan tetapi tetap saja pencapaian DNBR = 1 lebih cepat pada kondisi asimetrik dibanding simetrik.