

Analisis Termal-hidrolik Reaktor Cepat Berpendingin Gas (Gas Cooled Fast Reactor) Menggunakan Metode Runge Kutta

Adeliya Ayu A^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, dan Posman Manurung⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung

Jl.Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Gedung Meneng Bandar Lampung 35145

*E-mail:adeliyaanggraini@gmail.com

Diterima (31 Desember 2018), direvisi (8 Januari 2019)

Abstract. The Research of Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) thermal-hydraulics analysis has been done. This research aim to solve fuel rod heat conduction equation by Runge Kutta method and to get thermal-hydraulics parameters such as coolant axial temperature distribution, pressure drops, convection heat transfer coefficient, and fuel rod radial temperature distribution. Heat transfer of the reactors was assumed steady state (time independent) then obtained coolant inlet temperature about 450 °C, outlet temperature about 474,752 °C and convection heat transfer coefficient h_s about 2,5903 W/cm² °C. Pressure drop by friction was 0,16968 bar, pressure drop by form was 0,31292 bar, pressure drop by gravity was 0,20580 bar and total pressure drop was 0,68838 bar. While centerline fuel obtained the maximum temperature of fuel rod about 2720,33812 °C and the lowest fuel rod temperature at cladding surface about 488,8205 °C.

Keywords: Thermal-hydraulics, Runge Kutta Decomposition, GCFR

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menyelesaikan persamaan konduksi panas untuk batang bahan menggunakan metode Runge Kutta dan memperoleh nilai parameter termal-hidrolik seperti distribusi temperatur aksial pendingin, penurunan tekanan, koefisien transfer panas dan distribusi temperatur radial bahan bakar. Asumsi dari perpindahan panas reaktor pada kondisi tunak (tidak bergantung waktu), maka diperoleh temperatur pendingin *inlet* adalah 450 °C, *outlet* adalah 474,752 °C serta koefisien transfer panas konveksi h_s sebesar 2,5093 W/cm² °C. Penurunan tekanan akibat friksi diperoleh sebesar 0,16968 bar, penurunan tekanan akibat bentuk (*form*) sebesar 0,31292 bar, penurunan tekanan akibat gravitasi sebesar 0,2058 bar dan penurunan tekanan total, yaitu 0,68838 bar. Sementara temperatur pada batang bahan bakar diperoleh nilai maksimum pada garis-tengah bahan bakar yaitu 2720,33812 °C dan temperatur terendah batang bahan bakar pada permukaan kelongsong, yaitu 488,8205 °C.

Kata kunci: Termal-hidrolik, Runge Kutta, GCFR

PENDAHULUAN

Aspek yang penting dalam analisis reaktor, yaitu termal-hidrolik reaktor. Analisis termal-hidrolik tersebut meliputi distribusi temperatur aksial kanal pendingin, transfer panas (*heat transfer*), penurunan tekanan (*pressure drop*), dan distribusi temperatur radial. Untuk mempermudah menyelesaikan perhitungan termal-hidrolik, pada penelitian ini digunakan sebuah metode numerik yaitu

metode Runge Kutta dan sebuah *software* pemrograman *Visual Basic 6.0*.

Metode Runge Kutta merupakan alternatif dari metode deret Taylor yang tidak membutuhkan perhitungan turunan. Metode Euler dianggap kurang efisien karena ketelitiannya yang rendah serta *error* nya yang besar, buruknya *error* ini dapat diperbaiki dengan menggunakan metode Heun, namun metode Heun hanya dapat menghitung sebatas orde 2 saja sehingga ketelitiannya pun masih kurang.

Metode deret Taylor adalah metode yang umum untuk menurunkan rumus-rumus solusi differensial namun metode deret Taylor tidak praktis karena metode tersebut membutuhkan perhitungan turunan $f(x, y)$. Lagipula, tidak semua fungsi mudah dihitung turunannya, terutama bagi fungsi yang bentuknya rumit. Semakin tinggi orde metode deret Taylor, semakin tinggi turunan fungsi yang harus dihitung. Metode Runge-Kutta berusaha mendapatkan derajat ketelitian yang lebih tinggi, dan sekaligus menghindari keperluan mencari turunan yang lebih tinggi dengan jalan mengevaluasi fungsi $f(x, y)$ pada titik terpilih dalam setiap selang langkah [1].

Isnaini melakukan analisis desain termal-hidrolik subkanal elemen bahan bakar untuk reaktor jenis GCFR yang dikembangkan oleh Korea, yaitu *Korean Standard Nuclear Plant* (GCFR-KSNP). Pada penelitiannya digunakan konfigurasi matrik elemen bahan bakar 2x2 dengan program COBRA IV-I [2]. Khoiri membuat kode komputer untuk menganalisis termal-hidrolik subkanal untuk pendingin reaktor jenis *Light Water Reactor* (LWR) menggunakan program Borland Delphi 7 [3].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan laptop dengan sistem operasi windows 10 dan program *Visual Basic 6.0*. Termal-hidrolik diawali dengan menghitung distribusi temperatur pendingin pada kanal pendingin, nilai koefisien transfer panas konveksi h_s , dan penurunan tekanan pendingin. Persamaan (1) digunakan untuk menghitung distribusi temperatur aksial pendingin T_{fl} .

$$T_{fl}(z) = T_{inlet} + \frac{q'_0 \tilde{H}}{\pi c_p w} \left[\sin\left(\frac{\pi z}{\tilde{H}}\right) + \sin\left(\frac{\pi H}{2\tilde{H}}\right) \right] \quad (1)$$

dengan T_{inlet} adalah temperatur pendingin yang masuk kanal, q'_0 adalah rata-rata kerapatan daya linier [W/cm], \tilde{H} adalah

panjang kanal ditambah dengan jarak ekstrapolasi [cm], c_p adalah kapasitas panas fluida [W/cm°C], w adalah kecepatan aliran massa [g/cm], z adalah posisi titik partisi, dan H adalah panjang kanal [cm]. Koefisien transfer panas konveksi h_s dan penurunan tekanan pendingin Δp dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$h_s = (k/D_h)Nu \quad (2)$$

$$\Delta p_{friction} = 2(L/D_h)\rho\bar{u}_z^2 f \quad (3)$$

$$\Delta p_{form} = \sum_i K_i \rho \frac{\bar{u}^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta p_{gravitasi} = \rho g H \quad (5)$$

dengan k adalah konduktivitas panas fluida [W/cm°C], D_h adalah diameter ekuivalen kanal [cm], dan Nu adalah bilangan Nusselt untuk menghitung h_s . Oleh sebab itu untuk Δp diperlukan yaitu L sama dengan H adalah panjang kanal [cm], ρ adalah densitas fluida [gram/cm³], \bar{u}_z adalah rata-rata laju aliran fluida [gram/cm s²], f adalah faktor friksi fanning, K_i adalah faktor friksi bentuk, dan g adalah gravitasi.

Skema numerik untuk mencari solusi persamaan diferensial untuk mengetahui distribusi temperatur radial bahan bakar yang dibutuhkan adalah

$$T_{fuel}(z) = T_{Gap} + \left(\frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \right) \quad (8)$$

dengan

$$\begin{aligned} k_1 &= h \left(\frac{-q'''' r_i}{k_F} \right) \\ k_2 &= h \left(\frac{-q'''' (r_i + \frac{1}{2} h)}{k_F} \right) \\ k_3 &= h \left(\frac{-q'''' (r_i + \frac{1}{2} h)}{k_F} \right) \\ k_4 &= h \left(\frac{-q'''' (r_i + h)}{k_F} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Akhirnya dapat diperoleh nilai distribusi distribusi temperatur radial pada bahan

bakar. Skema numerik untuk mencari solusi persamaan diferensial untuk mengetahui distribusi temperatur radial *gap* yang dibutuhkan adalah

$$T_{gap} = T_{kelongsong} + \left(\frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \right)$$

$$k_1 = \frac{\sigma r}{kG}$$

$$k_2 = \frac{\sigma \left(r + \frac{h}{2} \right)}{kG} = k_1 + \frac{\sigma h}{2kG}$$

$$k_3 = k_2$$

$$k_4 = \frac{\sigma(r+h)}{kG} = k_1 + \frac{\sigma h}{kG} \tag{10}$$

Akhirnya dapat diperoleh nilai distribusi distribusi temperatur radial pada *gap*. Selanjutnya menghitung nilai distribusi temperatur radial pada kelongsong dengan menggunakan metode Runge Kutta, seperti pada **Persamaan 11**.

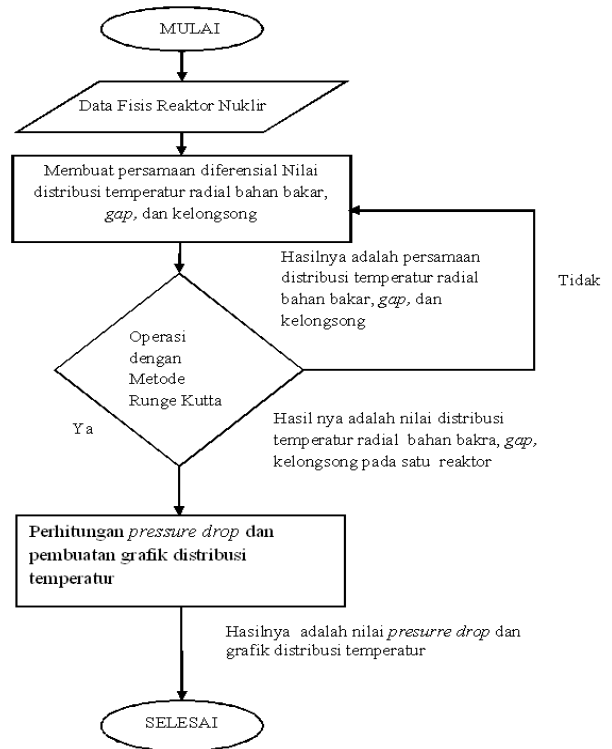
$$T_{kelongsong} = T_s + \left(\frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \right)$$

$$k_1 = \frac{\sigma r}{kc}$$

$$k_2 = k_1 + \frac{\sigma h}{2kc}$$

$$k_3 = k_1 + \frac{\sigma h}{2kc}$$

$$k_4 = \frac{\sigma h}{kc} \tag{11}$$

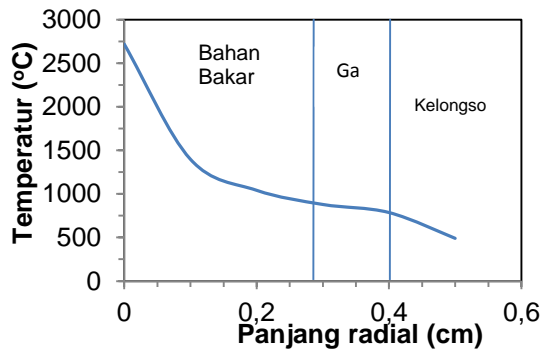


Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Transfer Panas Konveksi

Aliran pendingin memiliki dua karakteristik yaitu aliran laminar yang memiliki nilai $Re < 2.100$ dan turbulen yang memiliki nilai $2.100 < Re < 10^5$ [4]. Bilangan Reynold hanya digunakan untuk pipa dengan penampang melintang bulat dan untuk penampang melintang tidak bulat untuk aliran kanal antara batang bahan bakar. Dapat diperoleh besar diameter ekuivalen, yaitu 1,1458 cm. Kemudian perhitungan Re dilakukan dan diperoleh nilai sebesar 373936,2005. Nilai tersebut menunjukkan bahwa aliran pendingin merupakan turbulen [5]. Selanjutnya menentukan nilai Pr dan diperoleh nilai Pr sebesar 1,23. Dengan nilai Pr tersebut, kemudian Nu diperoleh nilai Nu yaitu 742,04. Koefisien transfer panas konveksi diperoleh nilai sebesar 2,59 W/cm²°C.



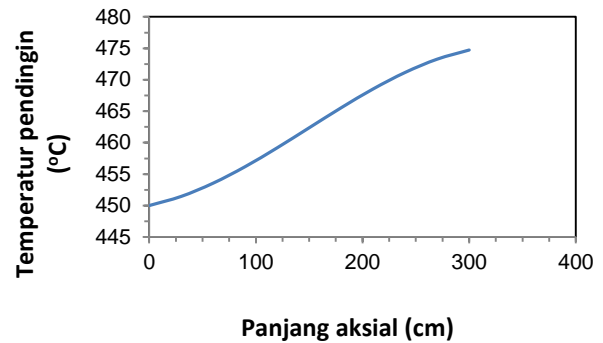
Gambar 2. Distribusi temperatur terhadap jarak radial pada batang bahan bakar.

Temperatur permukaan kelongsong yang langsung terhubung dengan pendingin dapat dihitung menggunakan **Persamaan 3**. Transfer panas dari pendingin ke permukaan kelongsong dengan koefisien difusi pendingin sebesar $1,43 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, rata-rata fluks panas $68,5 \text{ W/cm}^2$, dan temperatur pendingin pada panjang aksial 150 cm, yaitu $462,38 \text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan temperatur permukaan kelongsong sebesar $488,82 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai temperatur ini digunakan sebagai syarat masukan dalam perhitungan untuk mengetahui distribusi temperatur pada batang bahan bakar.

Distribusi Temperatur Radial

Nilai temperatur kelongsong yang telah diperoleh melalui perhitungan transfer panas sebelumnya, yaitu $488,82 \text{ }^\circ\text{C}$. Distribusi temperatur radial pada batang bahan bakar dihitung mulai dari permukaan kelongsong bahan bakar sampai dengan garis-tengah (*centerline*) batang bahan bakar [6]. Distribusi temperatur yang diperoleh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. **Gambar 2** menunjukkan nilai distribusi temperatur radial yang semakin menurun beriring dengan bertambahnya jarak, yaitu dimulai dari yang mendekati titik didih sebesar $2720,33 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $488,82 \text{ }^\circ\text{C}$. Hal ini disebabkan karena energi panas hanya dihasilkan oleh reaksi fisi pada bahan bakar sedangkan pada *gap* dan kelongsong hanya mendapat hantaran panas secara konduksi dari bahan bakar.

Distribusi Temperatur Aksial Pendingin



Gambar 3. Distribusi temperatur terhadap jarak aksial kanal pendingin.

Adapun nilai rapat daya linier yang digunakan sebesar 200 W/cm , temperatur masukan air (T_{inlet}) yaitu $450 \text{ }^\circ\text{C}$ dan panjang kanal aksial yaitu, 300 cm. Selain itu, teras reaktor diberi tekanan sebesar 115 bar. Kemudian diperoleh distribusi temperatur seperti pada **Gambar 3**.

Gambar 3 menunjukkan temperatur minimum pendingin berada pada bagian masuk (*inlet*), yaitu sebesar $450 \text{ }^\circ\text{C}$ dan temperatur tertinggi berada pada bagian atas (*outlet*) sebesar $474,75 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai ini masih dalam batas referensi nilai temperatur *outlet* pada reaktor GCFR yang memiliki nilai outlet sampai dengan $480 \text{ }^\circ\text{C}$. Pada **Gambar 3** juga dapat dilihat grafik yang meningkat sepanjang kanal sehingga dapat dinyatakan bahwa semakin ke atas maka temperatur pendingin pada kanal semakin meningkat [7].

Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Gravitasi berpengaruh karena pendingin mengalir dari bawah menuju ke atas sehingga terjadi penurunan tekanan pada pendingin. Pertama adalah penurunan tekanan friksi, yaitu penurunan tekanan yang dipengaruhi permukaan dinding kelongsong yang ditunjukkan oleh sebuah faktor f disebut juga faktor gesekan *Fanning*. Faktor *fanning* yaitu faktor yang diakibatkan oleh aliran turbulen pendingin pada kanal. Dengan bilangan Reynold yang

telah dihitung pada perhitungan h_s sebelumnya Re , yaitu 32.083,726. Dengan nilai Re yang berada dalam rentang $2.100 < Re < 10^5$ menunjukkan bahwa aliran pendingin merupakan aliran turbulen, sehingga untuk nilai f dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$f = 0.0791Re^{-25} \tag{12}$$

Pada perhitungan diperoleh nilai f , yaitu 0,0791. Setelah mendapatkan nilai f , nilai penurunan tekanan friksi pun diperoleh Sama seperti sebelumnya. Nilai penurunan tekanan friksi yang diperoleh adalah sebesar 0,17 bar. Penurunan tekanan ini masih belum termasuk dengan penurunan yang diakibatkan bentuk grid penjarak [8].

Grid penjarak merupakan suatu perangkat bantuan untuk menjaga batang bahan bakar tetap berada pada posisinya selain itu juga pendingin yang mengalir melewati ini akan mengalami perputaran sehingga dapat membantu dalam menghilangkan panas dari pendingin. Namun selain itu, grid penjarak dapat menjadi hambatan untuk pendingin dapat mengalir sehingga terjadi penurunan tekanan pendingin [9]. Sama seperti sebelumnya, penurunan tekanan ini dipengaruhi oleh sebuah faktor yaitu K . Nilai ini berbeda untuk setiap bentuknya. Pada penelitian ini digunakan nilai K , yaitu 1,25 [10], 0,78 dan 1 yang mana masing-masing adalah nilai untuk *grid* penjarak, bentuk masuk kanal dan keluar kanal.

$$\Delta p_{form} = \sum_i K_i \rho \frac{\bar{u}^2}{2} \tag{13}$$

Pada **Persamaan 13** diperoleh nilai penurunan tekanan bentuk sebesar 0,31 bar. Kemudian penurunan tekanan yang dipengaruhi oleh gravitasi akibat dari aliran pendingin yang menuju ke atas yang kemudian dituliskan dalam **Persamaan 14**.

$$\Delta p_{gravitasi} = \rho g H \tag{14}$$

Diperoleh nilai kerapatan pendingin sebesar 0,7 gram/cm³, gravitasi sebesar 980 cm/s² dan H , yaitu 300 cm, diperoleh nilai penurunan tekanan akibat gravitasi sebesar 0,21 bar. Oleh karena itu, total penurunan tekanan yaitu, 0,69 bar. Pada nilai GCFR penurunan tekanan bernilai negatif, hal ini dikarenakan pendingin membuat tekanan semakin turun.

KESIMPULAN

Persamaan distribusi temperatur terhadap panjang radial dapat diselesaikan menggunakan metode runge kutta sehingga diperoleh temperatur maksimum pada garis-tengah bahan bakar, yaitu 2720,33 °C dan temperatur permukaan kelongsong, yaitu 488,82 °C. Parameter termal-hidrolik lainnya yang diperoleh, yaitu Bilangan Reynold Re sebesar 373936,2005, bilangan Prandlt Pr yaitu 1,23, bilangan Nusselt Nu , yaitu 742,04, sehingga diperoleh nilai koefisien difusi pendingin h_s sebesar 2,59 W/cm²°C. Penurunan temperatur friksi ΔP_{friksi} sebesar 0,17 bar, penurunan tekanan akibat bentuk ΔP_{bentuk} sebesar 0,31 bar, penurunan tekanan akibat gravitasi $\Delta P_{gravitasi}$ sebesar 0,21 bar, dan penurunan tekanan total ΔP_{total} sebesar 0,69 bar. Distribusi temperatur aksial pendingin terhadap panjang kanal, yaitu temperatur *inlet* sebesar 450 °C dan *outlet* sebesar 474,75 °C.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers for Engineers." McGraw-Hill, New York, p. 968, 2010.

[2] M. D. Isnaini, "Analisis Disain Termohidrolika Sub Kanal Elemen

- Bakar Pwr-Ksnp,” in *Prosiding PPI-PDIPTN Pusat Akselerator dan Proses Bahan*, 2007, p. 9.
- [3] M. Khoiri, T. W. Tjiptono, and A. Prihastomo, “Pembuatan Kode Komputer Untuk Analisis Awal Termohidrolik Subkanal Pendingin Reaktor Lwr,” in *SDM Teknologi Nuklir VII*, 2011.
- [4] A. G., Abdullah, dan Z. Su’ud, “Analisis Kecelakaan Reaktor Akibat Kegagalan Sistem Pembuang Panas pada Reaktor Nuklir Generasi IV”. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*. Vol. 8. Pp 106-114. 2012.
- [5] S. Dibyo, “Kajian dalam Penentuan Faktor Friksi Aliran Pendingin”. In *Seminar Hasil Penelitian P2TRR*. Pp 203–210. 2002.
- [6] P.,Sun, H.,Zhao, L.,Liao, J., Zhang, G., Su, “Control System Design and Validation Platform Development for Small Pressurized Water Reactors (SGCFR) By Coupling an Engineering Simulation and MATLAB Simulink”. *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 102. Pp 309-316. 2017.
- [7] Suroso, & S. Dibyo. “Pemodelan Termohidrolika Sub-Kanal Elemen Bakar Ap-1000 Menggunakan Relap5”. *Uraina*. Vol 16. No 4. Pp 194–205. 2010.
- [8] A., Pirouzmand, and A., Nabavi, “Simulation Reactor Dynamics Equation Using Reconfigurable Computing”. *Progress in Nuclear Energy*. Vol 89. Pp 197-203. 2016.
- [9] M., Skrzypek, & R. Laskowski. Thermal-“Hydraulic Calculations for a Fuel Assembly in a European Pressurized Reactor Using The Relap5 Code”. *Nukleonika*. Vol. 60. No. 3. Pp. 537–544. 2015.
- [10] H.A, Seung, & D. J. Gyoo. “Effect of Spacer Grids on CHF at PWR Operating Conditions”. *Journal Of The Korean Nuclear Society*. Vol 33. No 3. P283–297. 2001.