

Analisis Termal-hidrolik Reaktor Air Bertekanan (*Pressurized Water Reactor*) Menggunakan Metode LU Faktorisasi

Dewi N.F.F.Efendi^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, dan Syafriadi⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung

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

*E-mail:dewiefendiphysics@gmail.com

Diterima (25 April 2018), direvisi (16 Mei 2018)

Abstract. The Research about Pressurized Water Reactors (PWR) thermal-hydraulics analysis has been done. This research aim to solve fuel rod heat conduction equation by LU Factorization 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 300 °C, outlet temperature about 326,6 °C and convection heat transfer coefficient h_s about 1,43 W/cm² °C. Pressure drop by friction was 0,423 bar, pressure drop by form was 0,51 bar, pressure drop by gravity was 0,25 bar and total pressure drop was 1,183 bar. While centerline fuel obtained the maximum temperature of fuel rod about 1.589,2 °C and the lowest fuel rod temperature at cladding surface about 360,9953 °C.

Keywords: Thermal-hydraulics, LU Decomposition, PWR, Matlab

Abstrak. Penelitian tentang analisis termal-hidrolik reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor*) telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan menyelesaikan persamaan konduksi panas untuk batang bahan menggunakan metode LU Faktorisasi dan memperoleh nilai parameter termal-hidrolik seperti distribusi temperatur aksial pendingin, penurunan tekanan, koefisien transfer panas dan distribusi temperatur radial bahan bakar. Dengan asumsi perpindahan panas reaktor pada kondisi tunak (tidak bergantung waktu) maka diperoleh temperatur pendingin *inlet* adalah 300 °C, *outlet* adalah 326,6 °C serta koefisien transfer panas konveksi h_s sebesar 1,43 W/cm² °C. Penurunan tekanan akibat friksi diperoleh sebesar 0,423 bar, penurunan tekanan akibat bentuk (*form*) sebesar 0,51 bar, penurunan tekanan akibat gravitasi sebesar 0,25 bar dan penurunan tekanan total yaitu 1,183 bar. Sedangkan temperatur pada batang bahan bakar diperoleh nilai maksimum pada garis-tengah bahan bakar yaitu 1.589,2 °C dan temperatur terendah batang bahan bakar pada permukaan kelongsong yaitu 360,9953 °C.

Kata kunci: Termal-hidrolik, LU Faktorisasi, PWR, Matlab

PENDAHULUAN

Reaktor nuklir adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi berantai dari bahan bakar nuklir. Reaktor yang paling banyak digunakan di dunia adalah reaktor air bertekanan atau yang sering disebut *Pressurized Water Reactor* (PWR) [1]. PWR merupakan jenis reaktor yang pendinginnya menggunakan air dengan dua sistem pendinginan. Reaktor ini termasuk

dalam salah satu jenis reaktor air ringan (*Light Water Reactors* atau LWR) [2].

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 [3]. Untuk mempermudah menyelesaikan perhitungan termal-hidrolik, pada penelitian ini digunakan sebuah

metode numerik yaitu LU Faktorisasi dan sebuah *software* pemrograman Matlab.

Matlab atau *MATrix LABoratory* merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang digunakan untuk mempermudah dalam komputasi teknik, diantaranya seperti penyelesaian permasalahan matematis, visualisasi dari penyelesaian masalah, dan simulasi sains. Semakin tinggi tingkatan suatu bahasa pemrograman maka semakin mudah dalam penyelesaian permasalahannya[4].

Metode LU Faktorisasi merupakan metode penyelesaian persamaan linier dengan menggunakan faktorisasi dari matrik **A** menjadi matrik segitiga bawah **L** (*lower*) dan matrik segitiga atas **U** (*upper*). Faktorisasi ini dapat menggunakan teknik pivoting seperti pada penyelesaian dengan menggunakan metode Eliminasi Gauss. Tapi berbeda dengan Eliminasi Gauss, LU Faktorisasi menggunakan langkah yang dibuang pada Eliminasi Gauss. Pada Eliminasi Gauss, faktor pengali pada saat pivoting tidak digunakan lagi untuk menyelesaikan persamaannya sedangkan pada LU Faktorisasi, faktor pengali tersebut digunakan kembali untuk membantuk matrik segitiga bawah **L**[5].

Isnaini melakukan analisis desain termal-hidrolik subkanal elemen bahan bakar untuk reaktor jenis PWR yang dikembangkan oleh Korea yaitu *Korean Standard Nuclear Plant*(PWR-KSNP). Pada penelitiannya digunakan konfigurasi matrik elemen bahan bakar 2x2 dengan program COBRA IV-I[6].Khoiri membuat kode komputer untuk menganalisis termal-hidrolik subkanal untuk pendingin reaktor jenis *Light Water Reactor* (LWR) menggunakan program Borland Delphi 7 [7].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan laptop dengan sistem operasi windows 10 dan program Matlab R2014a. 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.

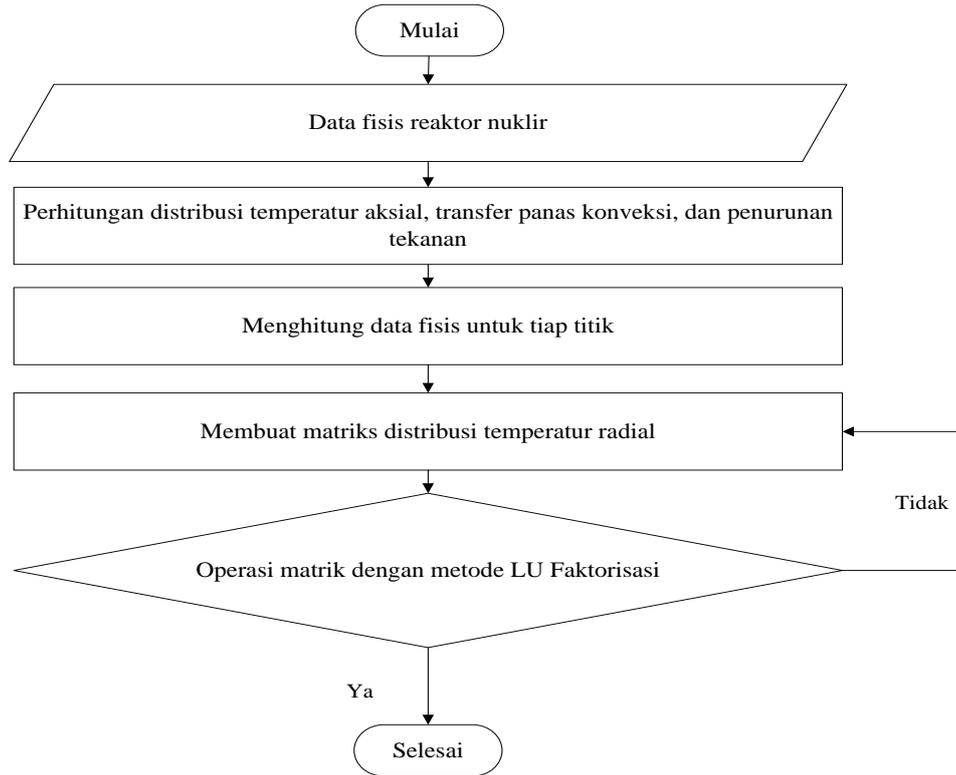
$$h_s = (k/D_h)Nu \quad (2)$$

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

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

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

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 . Sedangkan 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.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Kemudian dilakukan perhitungan distribusi temperatur radial bahan bakar menggunakan persamaan konduksi panas yang telah didiskritisasi dan diselesaikan dengan metode LU Faktorisasi, kemudian pembuatan program dengan menggunakan *software* Matlab. Selanjutnya menjalankan program dan diperoleh hasil berupa nilai temperatur pendingin h_s , penurunan tekanan, dan bahan bakar radial. Selain itu, diperoleh pula grafik distribusi temperatur pendingin dan bahan bakar radial.

Persamaan konduksi panas diasumsikan pada kondisi tunak atau tidak bergantung waktu. Karena batang bahan bakar yang digunakan berbentuk silinder sehingga digunakan koordinat silinder satu dimensi yang mana perubahan temperatur hanya bergantung pada jarak r yang ditunjukkan oleh persamaan (6)

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} kr \frac{dT}{dr} = q''' \tag{6}$$

karena pada gap dan kelongsong tidak terjadi produksi energi maka konduksi panas pada *gap* dan kelongsong digunakan persamaan (7).

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} kr \frac{dT}{dr} = 0 \tag{7}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui distribusi temperatur radial pada bahan bakar, maka perlu menggunakan persamaan konduksi panas. Penyelesaian persamaan konduksi panas (6) dan (7) dengan metode LU Faktorisasi ditunjukkan oleh persamaan (8) dan (9)

$$-k \left(\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta^2} - \frac{1}{r} \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta} \right) = q''' \tag{8}$$

$$-k \left(\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta^2} - \frac{1}{r} \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta} \right) = 0 \tag{9}$$

persamaan (3) dan (4) menghasilkan pola yaitu:

$$a_{i,i-1}T_{i-1} + a_{i,i}T_i + a_{i,i+1}T_{i+1} = q''' \quad (10) \quad a_{11}T_1 + a_{12}T_2 = q'' \quad (10) \quad (12)$$

$$a_{i,i-1}T_{i-1} + a_{i,i}T_i + a_{i,i+1}T_{i+1} = 0 \quad (11) \quad a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + a_{23}T_3 = q''' \quad (13)$$

$$a_{32}T_2 + a_{33}T_3 + a_{34}T_4 = q''' \quad (14)$$

$$\text{dengan} \quad a_{43}T_3 + a_{44}T_4 + a_{45}T_4 = q''' \quad (15)$$

$$a_{i,i} = \frac{2k}{\Delta^2} \quad a_{54}T_4 + a_{55}T_5 + a_{34}T_4 = q''' \quad (16)$$

$$a_{i,i+1} = -\frac{k}{\Delta^2} \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \quad a_{65}T_5 + a_{66}T_6 + a_{34}T_4 = q''' \quad (17)$$

$$n = \text{banyaknya partisi yaitu } 9. \quad a_{76}T_6 + a_{77}T_7 + a_{34}T_4 = 0 \quad (18)$$

$$\text{Jika diuraikan dalam bentuk persamaan} \quad a_{87}T_7 + a_{88}T_8 + a_{34}T_4 = 0 \quad (19)$$

$$\text{linier maka seperti persamaan berikut.} \quad a_{98}T_8 + a_{99}T_9 = 0 \quad (20)$$

Kemudian persamaan tersebut akan menghasilkan matrik **A** dengan dimensi $n \times n$ dan **b** dengan dimensi $1 \times n$.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q''' \\ q''' \\ q''' \\ q''' \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Kemudian matrik **A** didekomposisi menjadi matrik diagonal atas **U** (*upper*) dan matrik diagonal bawah **L** (*lower*).

$$\begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & U_{22} & U_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{33} & U_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{32} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{43} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{54} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots \end{pmatrix} \quad (22)$$

Upper *Lower*

Kemudian matrik **L** dan **b** dilakukan substitusi maju sehingga menghasilkan matrik baru **y** (**L y = b**). Setelah itu dilakukan substitusi mundur menggunakan matrik **b** dan **y** (**Ux = y**).

$$y_1 = q''' \quad (23) \quad U_{nn}T_n = y_n \quad (27)$$

$$L_{21}y_1 + y_2 = q''' \quad (24) \quad U_{n-1,n-1}T_{n-1} + U_{n-1,n}T_n = y_{n-1} \quad (28)$$

$$L_{32}y_2 + y_3 = q''' \quad (25) \quad \vdots \quad U_{22}y_2 + U_{23}T_3 = y_2 \quad (29)$$

$$a_{n,n-1}T_{n-1} + T_n = 0 \quad (26) \quad U_{11}T_1 + U_{12}T_2 = y_1 \quad (30)$$

Distribusi Temperatur Aksial Pendingin

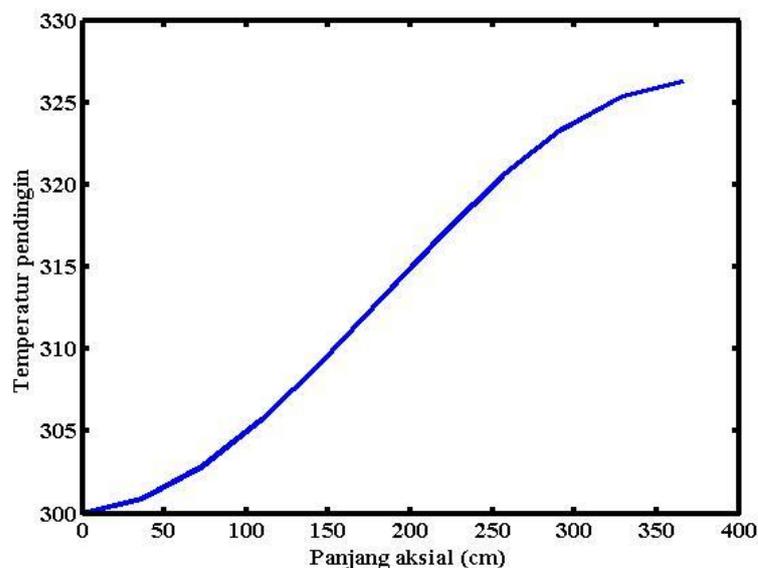
Perhitungan temperatur aksial pendingin pada penelitian ini mengasumsikan kanal tunggal dandidak akan terjadi pendidihan di pendingin primer. Oleh karenanya tidak akan terjadi pergantian fase pendingin sehingga dalam melakukan perhitungan digunakan asumsi untuk aliran pendingin satu fase atau yang sering disebut *single-phase coolant*[8].Nilai rapat daya linier yang digunakan sebesar 178 W/cm, temperatur masukan air T_{inlet} yaitu 300 °C dan panjang kanal yaitu 366 cm. Selain itu, teras reaktor diberi tekanan sebesar 155 bar sehingga temperatur saturasi pendingin pada tekanan tersebut adalah 342,24 °C. Oleh karena pada PWR pendingin tidak boleh mendidih maka temperatur pendingin tertinggi harus berada di bawah temperatur saturasinya [9].Kemudian diperoleh distribusi temperatur seperti pada **Gambar 2**.

Gambar 2 menunjukkan temperatur minimum pendingin berada pada bagian masuk (*inlet*) yaitu sebesar 300 °C dan temperatur tertinggi berada pada bagian atas (*outlet*) sebesar 326,26 °C. Nilai ini masih dalam batas referensi nilai temperatur *outlet* pada reaktor PWR yang

memiliki nilai outlet sampai dengan 332°C [3]. Selain itu, temperatur tertinggi pendingin ini berada di bawah temperatur saturasinya sehingga sesuai dengan sistem PWR. Pada gambar tersebut juga dapat dilihat grafik temperatur yang meningkat sepanjang kanal. Semakin ke atas maka temperatur pendingin pada kanal semakin meningkat [10]. Hal ini karena pendingin primer dari luar teras yang telah mengalami tranfer panas pada pendingin sekunder masuk melalui bawah[11].

Transfer Panas Konveksi Paksa

Karakteristik pertama yang perlu dihitung pada penelitian ini untuk mengetahui nilai koefisien transfer panas h_s adalah bilangan Nusselt Nu , yaitu bilangan yang menunjukkan karakteristik sifat fisis pendingin dan dinamika alirannya. Bilangan Nu memerlukan dua bilangan yaitu bilangan Reynold Re yang menunjukkan dinamika aliran pendingin dan bilangan Pradtl Pr yang menunjukkan karakteristik sifat fisis pendingin. Aliran pendingin memiliki dua karakteristik yaitu aliran laminar yang memiliki nilai $Re < 2.100$ dan turbulen yang memiliki nilai $2.100 < Re < 10^5$ [3].



Gambar 2. Distribusi temperatur terhadap jarak aksial kanal pendingin.

$$Re = \rho \bar{u}_z D_h / \mu \quad (31)$$

$$Pr = \mu c_p / k \quad (32)$$

$$Nu = 0,0155 Pr^{0,6} Re^{0,83} \quad (33)$$

$$q'' = h_s (T_s - T_{fl}) \quad (34)$$

Dengan μ adalah viskositas fluida [gram/cm²s] dan nilai diameter ekuivalen yaitu 1,1458 cm, diperoleh nilai Re sebesar 32.083,726. Nilai tersebut menunjukkan bahwa aliran pendingin merupakan turbulen [12].

Selanjutnya, menentukan nilai Pr menggunakan persamaan (32) dan diperoleh nilai Pr sebesar 6,974. Dengan nilai Pr tersebut, kemudian Nu diperoleh dengan menggunakan persamaan (33) dan diperoleh nilai Nu yaitu 273,2985. Koefisien transfer panas konveksi ditung menggunakan persamaan (2) dan diperoleh nilai sebesar 1,43 W/cm²°C. Nilai dari koefisien transfer panas konveksi ini berada dalam rentang h_s yaitu 0,5 – 4,5 W/cm²°C [3].

Temperatur permukaan kelongsong yang langsung terhubung dengan pendingin dapat dihitung menggunakan persamaan (34). Transfer panas dari pendingin ke permukaan kelongsong dengan koefisien difusi pendingin sebesar 1,43 W/cm²°C, rata-rata fluks panas 68,5 W/cm², dan temperatur pendingin pada panjang aksial 183 cm yaitu 313,8870°C menghasilkan temperatur permukaan kelongsong T_s sebesar 360,9953 °C.

Penurunan Tekanan aksial pendingin

Penurunan tekanan pendingin dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu akibat dari friksi dinding kelongsong, bentuk dari grid penjarak dan gravitasi [8]. Pertama adalah penurunan tekanan friksi, yaitu penurunan tekanan yang dipengaruhi permukaan dinding kelongsong yang ditunjukkan oleh sebuah faktor f disebut juga faktor gesekan *Fanning*. Dengan

bilangan Reynold Re yaitu 32.083,726, nilai f dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (35)

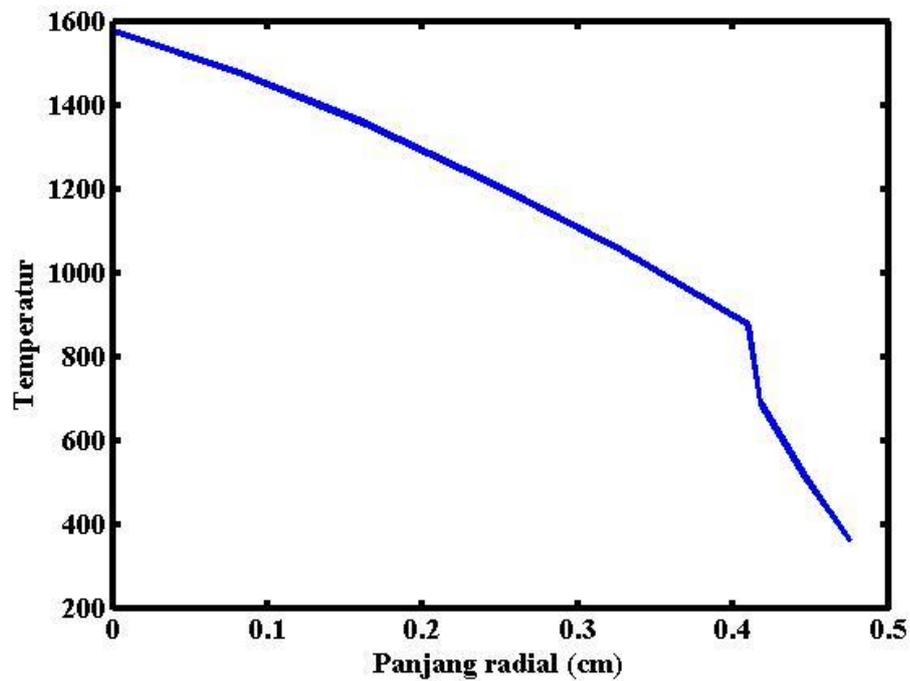
$$f = 0.0791 Re^{-0,25} \quad (35)$$

Sehingga diperoleh nilai f yaitu 0.0059. Setelah mendapatkan nilai f , nilai penurunan tekanan friksi pun diperoleh dengan menggunakan persamaan (3).

Nilai penurunan tekanan yang diperoleh adalah sebesar 0,423 bar. Selanjutnya penurunan tekanan pendingin akibat dari bentuk grid penjarak, masuk kanal dan keluar kanal. 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 [13]. Sama seperti sebelumnya, penurunan tekanan ini dipengaruhi oleh sebuah faktor yaitu K . Nilai ini berbeda untuk setiap bentuknya dan pada penelitian ini digunakan nilai K yaitu 1,25 (Seung & Gyoo, 2001), 0,78 dan 1 [8] yang mana masing-masing adalah nilai untuk grid penjarak, bentuk masuk kanal dan keluar kanal.

Dengan menggunakan persamaan (4) diperoleh nilai penurunan tekanan bentuk sebesar 0,51 bar. Kemudian penurunan tekanan yang dipengaruhi oleh gravitasi akibat dari aliran pendingin yang menuju ke atas yang kemudian dituliskan dalam persamaan (5). Dengan nilai kerapatan pendingin sebesar 0,7 gram/cm³, gravitasi sebesar 980 cm/s² dan H yaitu 366 cm, diperoleh nilai penurunan tekanan akibat gravitasi sebesar 0,25 bar.

Distribusi Temperatur Radial Pada Batang Bahan Bakar



Gambar 3. Distribusi temperatur terhadap jarak radial pada batang bahan bakar

Gambar 3 menunjukkan nilai distribusi temperatur radial yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya jarak yaitu maksimum temperatur garis-tengah bahan bakar adalah 1.589,2 °C, dan temperatur pada permukaan kelongsong adalah 360,9953 °C. Hal ini disebabkan karena energi panas hanya dihasilkan oleh reaksi fisi pada bahan bakar sedangkan pada *gap* dan kelongsong tidak diproduksi energi hanya mendapat hantaran panas secara konduksi dari bahan bakar. Berdasarkan analisis keselamatan bahwa bahan bakar reaktor memiliki temperatur maksimum yaitu 1.787,1 °C. Pertimbangan ini karena PWR memiliki titik leleh bahan bakar sebesar 2.800 °C untuk bahan bakar UO₂. Temperatur garis-tengah bahan bakar sebesar 1.589,2 °C masih dibawah temperatur maksimum sehingga reaktor masih dalam kondisi aman dalam pengoperasiannya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa persamaan distribusi temperatur terhadap panjang radial dapat diselesaikan menggunakan LU Faktorisasi dan diperoleh distribusi temperatur terhadap jarak yaitu 1.589,2 °C untuk temperatur maksimum pada garis-tengah batang bahan bakar dan 360,9953 °C untuk temperatur permukaan kelongsong. Perhitungan termal-hidrolik menghasilkan nilai koefisien difusi pendingin h_s sebesar 1,43 W/cm²°C, nilai penurunan tekanan friksi, bentuk dan gravitasi masing-masing sebesar 0,423 bar, 0,51 bar, dan 0,25 bar, serta distribusi temperatur aksial pendingin terhadap panjang kanal yaitu temperatur *inlet* sebesar 300 °C dan *outlet* sebesar 326,26 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Djokolelono, "PWR SEBAGAI JENIS PLTN PALING LAKU SAAT INI," in *TEKNOLOGI PUSAT LISTRIK TRNAGA NUKLIR*, 1974, p. 217.
- [2] A. . Raja, A. P. Srivastava, and M. Dwivedi, *Power Plant Engineering*. New Delhi: New Age International Publisher, 2006.
- [3] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, "Nuclear Reactor Analysis." McGraw-Hill, New York, p. 650, 1942.
- [4] B. R. Hunt, R. L. Lipsman, J. M. Rosenberg, K. R. Coombes, J. E. Osborn, and G. J. Stuck, *A Guide to Matlab*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers for Engineers." McGraw-Hill, New York, p. 968, 2010.
- [6] M. D. Isnaini, "ANALISIS DISAIN TERMOHIDROLIKA SUB KANAL ELEMEN BAKAR PWR-KSNP," in *Prosiding PPI-PDIPTN Pusat Akselerator dan Proses Bahan*, 2007, p. 9.
- [7] 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.
- [8] N. E. Todreas and M. S. Kazimi, *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Vol. 1*. New York: Taylor & Francis, 1990.
- [9] S. Pramuditya, "Pengembangan kode komputer terintegrasi untuk studi desain awal pembangkit listrik tenaga nuklir jenis pwr," Institut Teknologi Bandung, 2007.
- [10] Suroso (BATAN) and S. Diby, "PEMODELAN TERMOHIDROLIKA SUB-KANAL ELEMEN BAKAR AP-1000 MENGGUNAKAN RELAP5," *Uraina*, vol. 16, no. 4, pp. 194–205, 2010.
- [11] A. Setiyo and M. Munir, "Analisis Distribusi Suhu Aksial Teras Dan Penentuan k eff PLTN Pebble Bed Modular Reactor (PMBR) 10 MWE Menggunakan Metode MCNP 5," vol. 12, no. 3, pp. 85–90, 2010.
- [12] S. Dibyo, "Kajian Dalam Penentuan Faktor Friksi Aliran Pendingin," in *Seminar Hasil Penelitian P2TRR*, 2002, pp. 203–210.
- [13] M. Skrzypek and 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.
- [14] S.H. Ahn and G.D. Jeun, "Effect of spacer grids on CHF at PWR operating conditions," *J. Korean Nucl. Soc.*, vol. 33, no. 3, pp. 283–297, 2001.