
MODEL ANALISIS NUMERIK PADA SIRKULASI ALAM FASA-TUNGGAL DI UNTAI REKTANGULAR FASSIP-01 MOD.1 BERDASARKAN POSISI HEATER

Renaldy Sharin Lesmana¹, Mulya Juarsa^{2*}, Arya Adhyaksa Waskita²

¹Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km. 21, Sumedang, 45363

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN)-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd. 80, Tangerang Selatan, 15310

*email: juars@batan.go.id

ABSTRAK

MODEL ANALISIS NUMERIK PADA SIRKULASI ALAM FASA-TUNGGAL DI UNTAI REKTANGULAR FASSIP-01 MOD.1 BERDASARKAN POSISI HEATER.

Kecelakaan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang terjadi di Fukushima tahun 2011 disebabkan karena gempa bumi yang menyebabkan tsunami yang kemudian merendam generator Diesel untuk pendingin reaktor sehingga terjadi ledakan hidrogen. Penggunaan sistem pasif mulai diperhatikan untuk membantu sistem reaktor ketika pendinginan aktif gagal berfungsi. FASSIP-01 merupakan alat uji eksperimen yang menggunakan konsep sirkulasi alam. Penelitian yang dilakukan adalah membuat model numerik dan menganalisis hasil numerik berdasarkan simulasi *computer code* (MATLAB) pada sirkulasi alam fasa-tunggal di untai rektangular FASSIP-01 Mod.1 berdasarkan posisi *heater*. Metode yang dilakukan adalah menentukan parameter, menyusun persamaan matematis, membuat algoritma numerik, dan menjalankan program MATLAB dengan variasi *heater* 0°, 30°, 45°, 60°. Hasil yang didapatkan adalah grafik hubungan antara faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds. Semakin besar bilangan Reynolds, maka faktor gesekan semakin kecil, dikarenakan pertukaran kalor yang meningkat sehingga menyebabkan viskositas air menjadi lebih kecil. Viskositas air yang kecil akan menurunkan gesekan aliran.

Kata kunci: PLTN, FASSIP-01, Sirkulasi alam, Bilangan Reynolds, Faktor Gesekan.

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS MODEL IN PHASE-SINGLE NATURAL CIRCULATION IN RECTANGULAR FASSIP-01 MOD.1 BASED ON HEATER POSITION.

The accident of the Nuclear Power Plant (NPP) that occurred in Fukushima in 2011 was caused by an earthquake that caused a tsunami that submerged a diesel generator set to cool the reactor resulting in a hydrogen explosion. The use of passive systems began to be considered to help the reactor system when it failed to function. One of them is FASSIP-01 is an experimental test tool that uses the concept of natural circulation. The research carried out is to make numerical models and analyze numerical results based on computer code simulations (MATLAB) on a single-phase natural circulation in the reactant strand FASSIP-01 Mod.1 based on the heater position. The method used is determining parameters, compiling mathematical equations, making numerical algorithms, running the MATLAB program with heater variations 0°, 30°, 45°, 60°. The results obtained are a graph of the relationship between the friction factor against Reynolds number that the greater the Reynolds number, the smaller the friction factor, due to increased heat exchange, causing smaller water viscosity. Low water viscosity will reduce flow friction.

Keywords: NPP, FASSIP-01, natural circulation, Reynolds number, friction factor.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat. Hal ini berkaitan dengan menipisnya sumber energi fosil. Maka, perlu upaya untuk membangkitkan energi dalam skala besar tanpa menggunakan sumber energi fosil, salah satunya yaitu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) [1].

PLTN memiliki keuntungan dari pembangkit lain, yakni bahan bakar nuklir berupa U-235 tiap kg menghasilkan energi sebesar 17 milyar Kkal, atau setara dengan 2.400 ton batubara, tanpa melepaskan asap/debu hasil pembakaran ke lingkungan [2]. Tetapi, di samping keuntungan tersebut, PLTN juga memiliki potensi kecelakaan. Ancaman terjadinya lepasan material radioaktif dari reaktor nuklir ke lingkungan merupakan hal yang dihindari.

Salah satu kecelakaan PLTN yang pernah terjadi adalah pada tipe *Boiling Water Reactor* (BWR) di Fukushima pada tanggal 11 Maret 2011 [3]. Kecelakaan yang disebabkan oleh gempa bumi berskala 8,9 M menyebabkan tsunami yang merendam sistem tenaga cadangan berupa generator Diesel untuk pendinginan reaktor pasca *shutdown*. Akibatnya, terjadi ledakan hidrogen dan pelelehan parsial bahan bakar dan bejana tekan reaktor [4].

Penggunaan sistem keselamatan pasif mulai diperhatikan untuk membantu sistem reaktor ketika sistem aktif gagal berfungsi akibat adanya kecelakaan [5].

Salah satunya adalah FASSIP-01 yang merupakan sebuah alat uji eksperimen yang dikhususkan untuk aliran satu-fasa dengan variabel parameter daya *heater* dan laju aliran pendingin di *cooler*. Konsep sistem pasif adalah aliran fluida yang bergerak tanpa adanya intervensi gaya-gaya dari luar dan berbasis pada hukum-hukum alam yang berlaku, yang mana fenomena laju aliran fluida dalam sistem pasif disebut sirkulasi alamiah (*natural circulation*) yang timbul berdasarkan perbedaan kerapatan fluida. Efek perubahan kerapatan fluida di daerah panas akan menimbulkan *buoyancy* (gaya apung) dan efek perubahan kerapatan fluida di daerah dingin akan menimbulkan gaya gravitasi. Fenomena tersebut diharapkan dapat diimplementasikan pada PLTN, sehingga ketika terjadi kegagalan manajemen termal, sirkulasi alamiah dapat berfungsi untuk mencegah terjadinya kecelakaan reaktor nuklir [6].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menganalisis dan membuat komputasi sistem pasif dengan menggunakan analisis numerik, seperti pada penelitian Sebastian Unger dkk. telah menguraikan penyelidikan numerik pada penukar panas bundel tabung oval bersirip dioperasikan di bawah konveksi udara alami di cerobong asap [7]. Lalu, penelitian S.M. Seyyedi dkk. telah menganalisis NCL fase tunggal persegi panjang dengan pemanas asimetris secara numerik dan dibandingkan dengan hasil eksperimen [8]. Pada penelitian Daniel

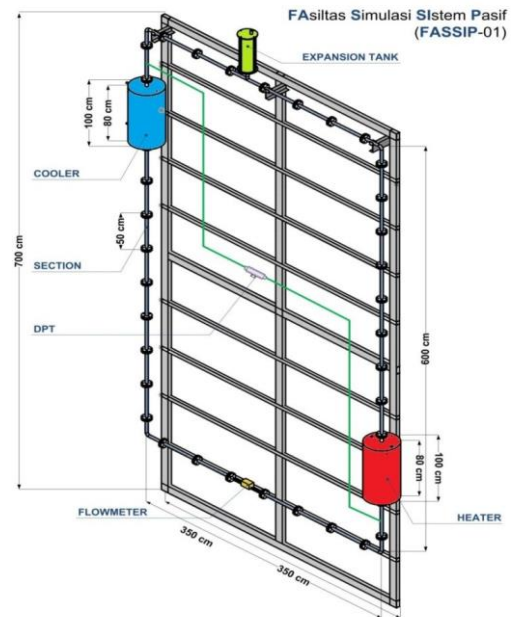
Franken dkk. telah dibuat model dinamika fluida komputasional (CFD) untuk mempelajari perilaku transisi masuknya udara [9]. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Mayur Krishnani dan Dipankar N. Basu menganalisa model komputasi 3D dari rektanguler sirkulasi alami untuk mengetahui kestabilan kalang dengan memvariasikan sudut kemiringan [10]. Kemudian, penelitian yang dilakukan oleh A. Fichera dan A. Pagano membuat model rektanguler sirkulasi alami untuk mengatasi masalah menekan dinamika yang tidak stabil yang terjadi pada rektanguler sirkulasi alami [11].

Berdasarkan uraian di atas, analisis numerik sistem pasif dapat dilakukan untuk mengetahui perilaku fluida, mengetahui keadaan optimal, dan dapat membandingkan hasil numerik dengan eksperimen yang didapat. Sehingga, tujuan penelitian adalah membuat model numerik dan menganalisis hasil numerik berdasarkan simulasi *computer code* pada sirkulasi alam fasa-tunggal di untai rektanguler FASSIP-01 Mod.1 berdasarkan posisi *heater*.

TEORI

Natural circulation atau sirkulasi alami adalah prinsip perpindahan kalor yang digunakan dalam untai uji FASSIP-01 yang berbasis *safe and secure* untuk desain reaktor nuklir. Secara prinsip, sirkulasi alam adalah perpindahan aliran yang terjadi secara alami sebagai hasil dari konstruksi untai uji

FASSIP-01 yang diletakkan pada posisi yang lebih tinggi daripada tangki pemanas atau *heater*, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Konstruksi Untai FASSIP-01 [4].

Sirkulasi alami adalah fenomena sederhana yang terjadi dalam fluida di hadapan gradien temperatur dan kerapatan dalam medan gaya. Tujuan utama dari kalang sirkulasi alami (*natural circulation loop/NCL*) adalah perpindahan panas dari sumber panas ke *heat sink* tanpa menggunakan pompa mekanis. Kalang sirkulasi alami memiliki tiga mode, yaitu fase tunggal, fase ganda, dan fase kritis. Kalang sirkulasi alami fase tunggal banyak digunakan dalam sistem energi yang berbeda, seperti solar heaters, reaktor nuklir, produksi tenaga panas bumi, dan mesin pendingin komputer. Secara umum, sumber panas terletak pada ketinggian yang lebih rendah dengan *heat sink*. Ada beberapa

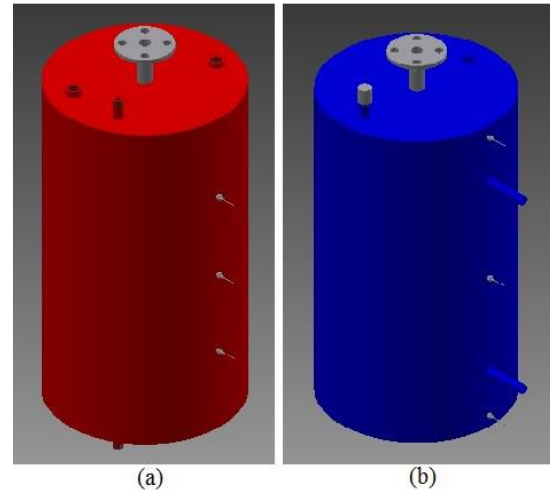
orientasi pemanas dan pendingin sebagai berikut:

1. Pemanas Horizontal & Pendingin Horizontal (HHHC).
2. Pemanas Horizontal & Pendingin Vertikal (HHVC).
3. Pemanas Vertikal & Pendingin Horizontal (VHHC).
4. Pemanas Vertikal & Pendingin Vertikal (VHVC).

Model FASSIP-01 adalah model orientasi VHVC. Dengan demikian, fluida air yang telah melalui proses penurunan temperatur di dalam *cooler* akan memiliki massa jenis lebih besar dari fluida air pada temperatur normal, sehingga air akan turun mengikuti alur dari untai persegi panjang (*rectangular loop*) menuju *heater* [12].

Dalam tangki pemanas, fluida air dengan temperatur lebih rendah dari temperatur lingkungan akan dipanaskan dengan temperatur yang diinginkan, karena sebelumnya telah didinginkan di dalam tangki pendingin. Ketika proses pemanasan berlangsung, fluida air akan memiliki densitas lebih rendah daripada fluida air pada temperatur lingkungan. Hal itu akan mengakibatkan Bergeraknya fluida air dari *heater* ke atas mengikuti alur dari untai yang berbentuk persegi panjang. Dengan demikian, sirkulasi alam adalah sebuah efek sirkulasi yang disebabkan karena adanya perbedaan massa jenis atau densitas yang dimiliki oleh fluida pada kondisi tertentu. Sirkulasi alam memiliki keterkaitan dengan

gaya gravitasi dan efek *buoyancy* yang menyebabkan fluida air bergerak turun dan terangkat naik. Gambar 2 menunjukkan desain 3D dari komponen *heater* dan *cooler* dalam untai FASSIP-01.



Gambar 2. Ilustrasi Gambar (a) Tangki Heater dan (b) Tangki Cooler Untai FASSIP-01 [4].

Berikut adalah rincian geometri pada untai FASSIP-01.

Tabel 1. Geometri FASSIP-01 [4].

Komponen	FASSIP-01	
<i>Heater</i>	Daya maksimal	5000 W/240 V
	Daya 4 unit heater	20 kW
	Diameter	16 inch
	Tinggi	800 mm
	Tebal	4 mm
	Temperatur	90°C
	Volume tangki pemanas	103,7 liter
	Massa air dalam tangki	103,7 kg

Cooler	Refrigerator	2 PK
	Diameter	16 inch
	Tinggi	800 mm
	Tebal	4 mm
	Temperatur	10°C
	Volume tangki pendingin	103,7 liter
	Massa air dalam pendingin	103,7 kg
Perpipaan Lurus	Panjang	50 cm
	Diameter	1 inch (Sch 20)
Perpipaan belok 90°C	Panjang	50 cm
Tangki Ekspansi	Diameter	6 inci
	Tinggi	490 mm
	Tinggi dengan flens	510 mm
	Diameter flens	20 mm
Support	Tinggi	700 cm
	Lebar	350 cm

Persamaan pembentuk aliran yang mendasar untuk aliran fluida dan perpindahan panas adalah dikembangkan dari tiga hukum kekekalan dalam fisika, yakni hukum kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi. Hukum-hukum ini akan dibahas dalam bidang koordinat kartesius. Bentuk umum dari massa fase tunggal, momentum, dan persamaan kekekalan energi dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{B} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \beta T \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi + q''' \quad (3)$$

Tabel 2. Thermo-physical properties of water [8].

Properties at 25 °C and 1 atm	Values
ρ (kg m ⁻³)	997.1
μ (Pa · s)	8.9×10^{-4}
β (K ⁻¹)	2.5×10^{-4}
C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	4183
Pr (-)	6.3
k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.6125

Faktor gesekan dapat dinyatakan sebagai:

$$f = \frac{a}{R_s^b} = \frac{a \omega^{-b}}{Re_{ss}^b} \quad (4)$$

dengan a dan b adalah parameter konstan yang bergantung pada jenis aliran (laminer, transisi, atau turbulen). Banyak peneliti mencoba menentukan nilai-nilai parameter a dan b. Faktor gesekan terus-menerus penting untuk analisis stabilitas. Nilai-nilai tersebut adalah sebagai berikut:

a = 64 dan b = 1 : *fully laminer loop*

a = 1,2063 dan b = 0,416 : *fully transition loop*

a = 0,316 dan b = 0,25 : *fully turbulent loop*.

Persamaan momentum dan energi dapat ditulis dalam bentuk non-dimensi dengan definisi menggunakan parameter tak berdimensi berikut:

$$\omega = \frac{W}{W_{ss}}; \theta = \frac{T - T_s}{(\Delta T_h)_{ss}}; \tau = \frac{t}{t_r}; S = \frac{s}{H} \text{ dan } Z = \frac{z}{H}$$

dengan $t_r = V_t \rho_0 / W_{ss}$, maka didapatkan:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{Gr_m}{Re_{ss}^3} \int \theta dz - \frac{aL_c \omega^{2-b}}{2D Re_{ss}^b} \quad (5)$$

di mana,

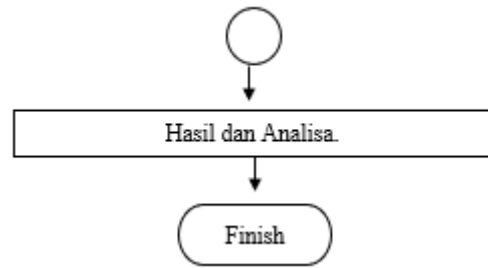
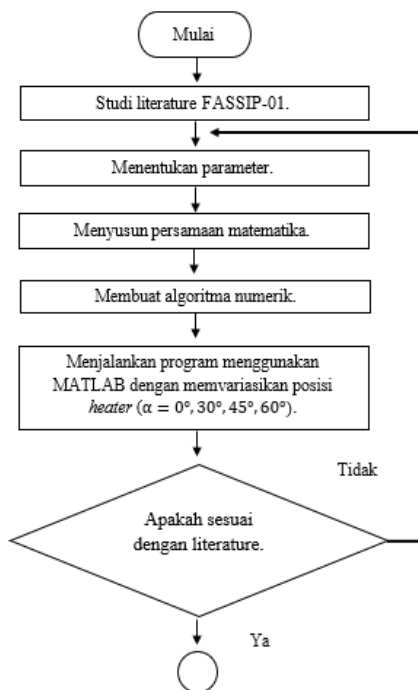
$$Re_s = \frac{WD}{\mu A}; Pr = \frac{\mu C_p}{k}; Nu = \frac{UL_t}{k}; St = \frac{UA}{C_p W}$$

$$St_m = \frac{4Nu}{Re_{ss} Pr} \text{ dan } Gr_m = \frac{g \cos(\alpha) \beta D^3 \rho_0^2 HP}{A \mu^3 C_p}$$

METODOLOGI

Objek yang digunakan pada penelitian ini adalah FASSIP-01 seperti pada Gambar 1. Pada desain FASSIP-01 ini dilakukan pemodelan numerik untuk mengetahui jenis laju aliran yang terjadi pada rektangulair FASSIP-01 dengan cara memvariasikan perbedaan posisi heater.

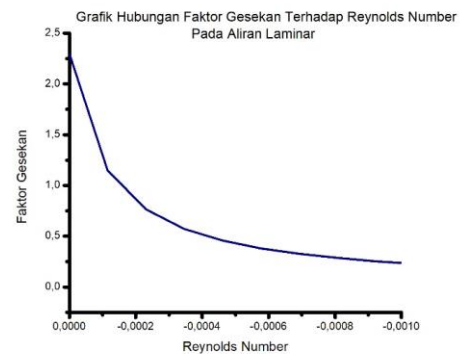
Berikut adalah diagram alir untuk memprediksi laju aliran fluida pada desain untai FASSIP-01 dengan analisa metode numerik s.



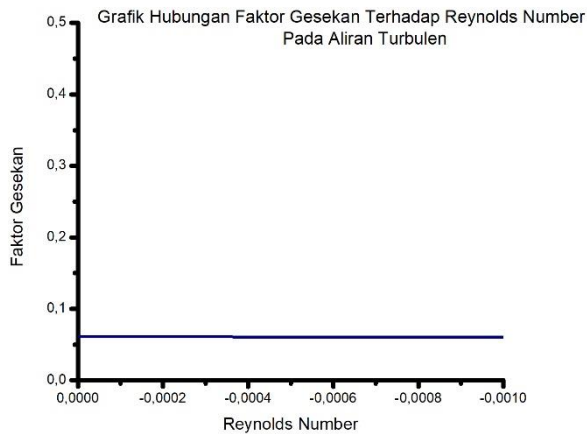
Gambar 3. Diagram alir estimasi laju aliran fluida.

Adapun keterangan diagram alir di atas yaitu pertama dilakukan studi literatur mengenai FASSIP-01. Setelah itu, ditentukan parameter yang akan ditinjau. Selanjutnya disusun persamaan matematis untuk mengetahui laju aliran fluida di desain untai FASSIP-01. Lalu persamaan matematik tersebut diubah menjadi algoritma numerik untuk diproses pada program. Setelah itu, program dijalankan dengan memvariasikan posisi heater untuk mengetahui laju aliran yang terbentuk di desain untai FASSIP-01, untuk kemudian didapatkan hasil berupa grafik dan dianalisis.

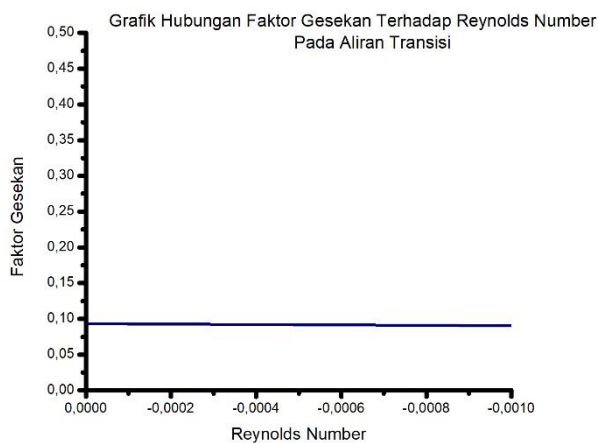
HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 4. Grafik Hubungan Faktor Gesekan Terhadap Bilangan Reynold Pada Aliran Laminier.



Gambar 5. Grafik Hubungan Faktor Gesekan Terhadap Bilangan Reynold Pada Aliran Transisi.



Gambar 6. Grafik Hubungan Faktor Gesekan Terhadap Bilangan Reynold Pada Aliran Turbulen.

Pada percobaan kali ini untuk mengetahui pengaruh posisi heater terhadap faktor gesekan yang terjadi pada setiap aliran fluida dengan menggunakan analisis metode numerik (*software* MATLAB). Variasi posisi heater yang digunakan adalah $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ,$ dan 60° . Melalui persamaan matematika yang didapatkan dan diubah menjadi algoritma numerik, selanjutnya dijalankan dengan program MATLAB untuk mendapatkan data faktor gesekan dan

bilangan Reynolds pada setiap pembentukan aliran fluida (laminer, transisi, turbulen). Setelah didapatkan data tersebut, lalu dapat diketahui grafik hubungan faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds dengan menggunakan aplikasi Origin Pro 8.0.

Dalam grafik aliran laminer dijelaskan bahwa semakin besar nilai bilangan Reynolds maka faktor gesekan akan semakin kecil. Hal ini terjadi dikarenakan ketika bilangan Reynolds mulai meningkat, pertukaran kalor juga meningkat, sehingga menyebabkan viskositas air menjadi lebih kecil. Viskositas air yang kecil akan menurunkan gesekan aliran. Nilai bilangan Reynolds di aliran laminer pada keadaan *steady state* adalah $Re_{ss} < 898$. Begitu pula grafik aliran transisi dapat dilihat terdapat penurunan faktor gesekan ketika nilai bilangan Reynolds semakin besar tetapi tidak securam penurunan pada aliran laminer. Nilai bilangan Reynolds di aliran transisi pada keadaan *steady state* adalah $898 \leq Re_{ss} \leq 3196$. Tetapi, pada grafik aliran turbulen terlihat faktor gesekan konstan terhadap bilangan Reynolds. Nilai bilangan Reynolds di aliran turbulen pada keadaan *steady state* adalah $Re_{ss} > 3196$. Laju aliran tidak berubah signifikan ketika posisi *heater* divariasikan dikarenakan lintasan pipanya berbeda. Bilangan Reynolds pada penelitian ini berada pada keadaan *steady state*.

KESIMPULAN

Berdasarkan model numerik laju aliran (W) dan model matematika yang didapatkan maka diketahui laju aliran laminar, transisi, dan turbulen. Hasil analisis numerik yang diperoleh dengan menggunakan MATLAB adalah grafik hubungan faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds dengan variasi posisi heater 0°, 30°, 45°, 60°. Dari hasil analisis diperoleh bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka faktor gesekan semakin kecil, ini terjadi karena ketika bilangan Reynolds mulai meningkat, pertukaran kalor juga meningkat, sehingga menyebabkan viskositas air menjadi lebih kecil. Viskositas air yang kecil akan menurunkan gesekan aliran.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Kepala PTKRN-Batan dan pembimbing teknis selama praktik kerja lapangan di PTKRN-BATAN, Serpong.

DAFTAR PUSTAKA

1. E. SUPRIYADI, "Pusat Listrik Tenaga Nuklir : Energi dan Pengaruhnya Terhadap Lingkungan," *Cakrawala Pendidikan Nomor 1 Tahun XIII*, p. 141, 1994.
2. R. SAHPUTRA, "Analisis Kebutuhan Dan Kecelakaan Pembangunan

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)," *Jurnal Penelitian Universitas Tanjungpura*, vol. XXI, 2011.

3. T. VIERU, "Earthquake Damages Japanese Nuclear Reactors," Softpedia, 14 Maret 2011. [Online]. Available: <https://news.softpedia.com/news/Earthquake-Damages-Japanese-Nuclear-Reactors-189294.shtml>. [Accessed 7 Oktober 2019].
4. M. NOUFAL, "Analisis Unjuk Kerja Pemanas dan Pendingin Di Untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif," *Sigma Epsilon*, vol. 19, 2015.
5. U. SETIORINI, "Pengaruh Kecepatan Pendingin Di Kondenser Terhadap Thermal Performance U-Shaped Heat Pipe," *PTKRN BATAN, Tangerang Selatan*, 2018.
6. A. TANGKESALU, "Analisis Perpindahan Panas Pada Cooler Tank FASSIP-01," *Jurnal METTEK*, vol. 3, pp. 11-20, 2017.
7. S. UNGERA, "Numerical analysis of heat exchanger designs for passive spent fuel pool cooling to ambient air," *Nuclear Engineering and Design*, pp. 224-234, 2018.
8. S. SEYYEDI, "Numerical and experimental analysis of a rektangular single-phase natural circulation loop with asymmetric heater position," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 1343-1357, 2019.
9. D. FRANKEN, "Numerical study of air ingress transition to natural circulation in a high temperature helium loop," *Annals of Nuclear Energy*, pp. 371-378, 2018.

10. M. KRISHNANI, "Computational stability appraisal of rektangular natural circulation loop : Effect of loop inclination," *Annals of Nuclear Energy*, pp. 17-30, 2017.
11. A. FICHERA, "Modelling and control of rektangular natural circulation loops," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 2425-2444, 2003.
12. M. JUARSA, "Studi Eksperimental Fenomena Sirkulasi Alamiah Aliran Satu-Fasa untuk Pengembangan PRHS Menggunakan Untai FASSIP," Usulan Penelitian Tahun 2015, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir BATAN, 2015.