

Scale Analysis of Single Phase Natural Circulation in Rectangular FASSIP-01 MOD.01

Karina Ramadayanthi A.P.¹, M. Ahyar Aldebaran¹, Andrean Jiwanda¹, Mulya Juarsa², dan Surip Widodo²

¹Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran,
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM 21, Jatinangor 45363

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN

*Corresponding author: karinaramadayanti@gmail.com

Abstract. Nuclear can be used as a new energy potential to deal with the problem of high electrical energy consumption. The process of building a nuclear power plant (Nuclear Power Plant) will have a high risk of nuclear accidents. The Fukushima accident is an illustration of the failure of the active cooling system which caused a hydrogen explosion and melting of fuel. The principle of natural circulation in the passive cooling system can be considered as a solution in dealing with these problems. FASSIP-01 is an experimental facility used to examine the phenomenon of natural circulation. Design optimization in FASSIP-01 is done by scale up using RELAP5 for various geometric parameters such as height and diameter of pipes, cooling tanks, heating tanks, and expansion tanks. Natural circulation characteristics such as the effect of temperature distribution and mass flow rate are obtained. This simulation helps in the calculation of designs for a larger scale.

Abstrak. Nuklir dapat dijadikan potensi energi baru untuk menangani masalah konsumsi energi listrik yang tinggi. Proses pembangunan PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) akan memiliki tingkat resiko kecelakaan nuklir yang tinggi. Kecelakaan Fukushima merupakan gambaran dari gagalnya sistem pendingin aktif yang menyebabkan terjadinya ledakan hidrogen dan lelehnya bahan bakar. Prinsip sirkulasi alami pada sistem pendingin pasif dapat dipertimbangkan sebagai solusi dalam menangani masalah tersebut. FASSIP-01 merupakan fasilitas eksperimen yang digunakan untuk meneliti fenomena sirkulasi alami. Pengoptimalisasian desain pada FASSIP-01 dilakukan dengan cara *scale up* menggunakan RELAP5 untuk berbagai parameter geometris seperti ketinggian dan diameter pipa, tangki pendingin, tangki pemanas, serta tangki ekspansi. Karakteristik sirkulasi alami seperti pengaruh distribusi temperatur dan laju aliran masa diperoleh. Simulasi ini membantu dalam perhitungan desain untuk skala yang lebih besar.

Kata kunci: *scale-up*, FASSIP-01, temperatur, laju aliran massa.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan pembangkit listrik termal dimana panas dihasilkan berasal dari satu atau lebih reaktor [1]. Kehadiran PLTN membawa dampak yang menguntungkan dikarenakan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca (selama operasi normal), tidak mencemari udara (tidak menghasilkan gas – gas berbahaya seperti karbon monoksida, sulfur dioksida, *mercury*, dan sebagainya), sedikit menghasilkan limbah padat, dan biaya bahan bakarnya rendah. Akan tetapi, PLTN akan mengakibatkan limbah radioaktif dan memiliki resiko kecelakaan nuklir yang tinggi [2]. Resiko kecelakaan nuklir ini akan menimbulkan terjadinya pelepasan radiasi mematikan dalam jumlah besar

terhadap lingkungan. Adapun kecelakaan nuklir yang paling berbaya adalah kecelakaan Fukushima.

Kecelakaan Fukushima dipicu oleh gempa bumi berskala 8.9 richter yang mengakibatkan gagalnya proses pada sistem pendinginan di suatu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pernah terjadi pada PLTN tipe BWR (*boiling water reactor*) di Fukushima, Jepang pada tanggal 11 Maret 2011 [3]. Kondisi tersebut menyebabkan terendahnya sistem tenaga cadangan berupa genset diesel untuk pendinginan reaktor pasca *shutdown*. Akibat terakhir adalah terjadinya ledakan hidrogen dan lelehnya bahan bakar dan bejana tekan reaktor. Kegagalan ini menggambarkan gagalnya sistem pendingin aktif (memerlukan daya atau energi dari luar) pada proses pendinginan di reaktor nuklir pasca terjadi suatu kecelakaan [4].

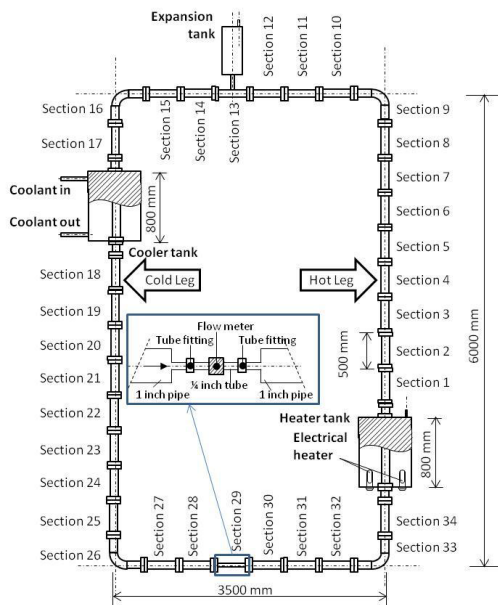
Sistem pendinginan pasif bekerja secara alami dikarenakan perbedaan kerapatan fluida diantara dua titik yang memiliki perbedaan ketinggian. Untuk mempelajari dan menguasai prinsip - prinsip sirkulasi alami dan kegunaannya untuk mendesain reaktor nuklir yang lebih aman, khususnya saat kecelakaan terjadi BATAN, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) telah merancang dan menkontruksi fasilitas eksperimen untuk meneliti fenomena sirkulasi alami yang disebut sebagai Untai FAsilitas Simulasi SIsitem Pasif versi 01 (FASSIP-01).

Penelitian mengenai sistem pendingin pasif dan *scale up* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Sistem pendingin pasif dapat menghilangkan panas dan mempertahankan temperatur dibawah batas aman yang diizinkan (100°C) selama 7 hari [5]. Sistem pendingin pasif membutuhkan konveksi alami, dimana desain pada *heat exchanger* perlu dioptimalisasi berdasarkan CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Laju aliran pada sistem pendingin pasif dapat diukur ketika energi disipasinya konstan [6]. Laju aliran dapat dijadikan kriteria dalam pengaplikasian *scale up*, dimana *scale up* diperlukan untuk menjadikan data eksperimen pada pembangkit skala lab berlaku untuk pembangkit skala sebenarnya [7]. Sehingga, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis skala pada sirkulasi alam fasa-tunggal di untai rekrangular FASSIP-01 Mod.1 menggunakan RELAP5.

Metode Penelitian

Perlengkapan Eksperimen

Pada eksperimen ini digunakan model FASSIP-01 yang menggunakan skema dimana sumber panas dan pendingin berada dalam posisi vertikal.

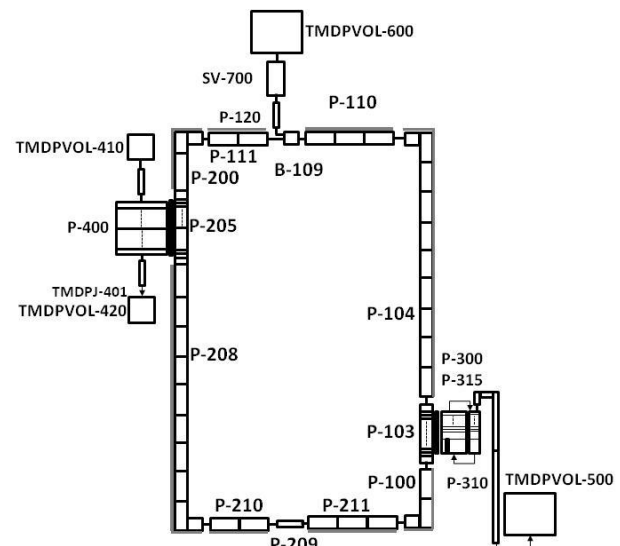


Gambar 1. Diagram FASSIP-01

Pipa yang menghubungkan tangki pemanas dengan saluran masuk dari tangki pendingin dinamakan *hot leg*, dan pipa yang menghubungkan tangki pendingin ke saluran masuk dari tangki pemanas disebut *cold leg*. Dalam simulasi menggunakan RELAP5 akan menunjukkan temperatur distribusi dan laju aliran massa dalam rentang waktu tertentu.

Simulasi FASSIP-01 dengan RELAP5

Pada penelitian ini dilakukan simulasi *scale up* dari model untai eksperimental FASSIP-01 menggunakan perangkat lunak RELAP5 (*Reactor Excursion and Leak Analysis Program*) yang biasa digunakan untuk memodelkan PLTN. Pada Gambar 1 menunjukkan diagram untai eksperimental FASSIP-01 yang dimodelkan pada perangkat lunak RELAP5. Adapun Gambar 2 merupakan model RELAP5 dan nodalisasi FASSIP-01. Beberapa parameter pada sistem FASSIP 01 mengalami *scale up* dalam simulasi menggunakan RELAP5 diantaranya *Hot Leg*, *Cold Leg*, *Heater Tank*, *Cooler Tank*, dan *Expansion Tank*. Parameter-parameter diatas mengalami *scale up* dengan nilai-nilai parameter geometri dua kali lebih besar daripada sebelum proses *scale up*. Data rincian ukuran setiap komponen geometri sebelum dan sesudah *scale up* ditunjukkan oleh tabel 1.



Gambar 2. Model RELAP5 dan Nodalisasi pada FASSIP 01

Tabel 1. Hasil Peningkatan Geometri Dua Kali Lipat

No	Components	FASSIP-01		Scale Up		
		Length (m)	Flow Area(m ²)	Length (m)	Flow Area (m ²)	
102	Hot Leg	Junction from Horizontal Pipe to Vertical Cold Pipe	0	0		
103		Vertical Pipe with Heating Section	0,100 ; 0,020 ; 0,100	0,200 ; 0,040 ; 0,200		
104		Vertical Hot Leg - Part 3	0,50 ; 0,25 ; 0,100	1 ; 0,50 ; 0,200	1,219,E-03	
105		From Vertical Hot Pipe Part 1 to Part 2	0	0		
106		Brach from Heated Pipe p103 to Hotleg p104	0,300	0,600		
107		Vertical Hot Leg - elbow section	0,125	0,250		
108		Vertical Hot Leg – periphery of p104	0,100	1,523,E-01	0,200	3,046,E-01
109		Junction from Vertical Hot Pipe to Horizontal Pipe Connects Volumes	0	0		
110		Horizontal Top Hot Pipe - Part 1	0,500	6,093,E-04	1,000	1,219,E-03
111		Horizontal Top Hot Pipe - Part 2	0,500		1,000	
200	Cold Leg	Vertical Cold Leg 1	0,125	0,250		
100		Pipe	0,250 ; 0,500	0,5000 ; 1		
201		Junction from Vertical Cold Pipe to Horizontal Bottom Pipe	0	6,093,E-04	0	1,219,E-03
203		Junction from Horizontal Pipe	0		0	
204		Junction from Horizontal Pipe Flow Meter to Pipe	0	8,491,E-05	0	16,982,E-05
205		Vertical Pipe with Cooling Section	0,100 ; 0,020 ; 0,100		0,200 ; 0,040 ; 0,200	
206		Junction from Cold Leg 1 to Cooled Pipe Section	0		0	
207		Juction from Cold Leg 2 to Cold Leg 3	0		0	
208		Vertical Cold Leg 3	0,125		0,250	
209		Tube for Flow Meter	0,500	8,491,E-05	1,000	1,698,E-04
210	Cooler Tank	Horizontal Cold Bottom Pipe - Part 1	0,500	6,093,E-04	1,000	1,219,E-03
211		Horizontal Cold Bottom Pipe - Part 2				
300		Heater Tank - Part 1	0,20 ; 0,10 ; 0,02	7,983,E-02	0,400 ; 0,200 ; 0,040	1,597,E-01
301	Heater Tank	Juction from Heater Tank to Venting Pipe	0	4,522,E-04	0	9,044,E-04
310		Venting Pipe	0,05 ; 0,10 ; 1,85 ; 0,95	4,522,E-04	0,1 ; 0,20 ; 3,7 ; 1,90	9,044,E-04
315		Heater Tank - Part 2	0,02 ; 0,10 ; 0,20	3,991,E-02	0,400 ; 0,200 ; 0,40	7,983,E-02
400	Coolant Pump	Pipe Cooler Tank	0,400	0	0,800	0
401		Cold Source to Coller Tank	0	0,4,E-3 ; 0,41,E-3	0	0,8,E-3 ; 0,82,E-3
120		Pipe	0,200	2,290,E-04	0,400	4,580,E-04
114	Expansion Tank	Junction from Surge Line to Expansion Tank	0	2,29,E-4	0	4,58,E-4
700		Single Volume	0,500	0	1,000	0

Diagram alir simulasi yang dilakukan menggunakan RELAP5 ditunjukkan dengan Gambar 3. Adapun penjabaran dari diagram tersebut yaitu, memasukan variable yang ditinjau pada FASSIP-01, setelah itu parameter yang akan di *scale up* yaitu *hot leg*, *cold leg*, *heater tank*, *cooler tank*, *coolant pump*, dan *expansion tank*. Langkah berikutnya adalah

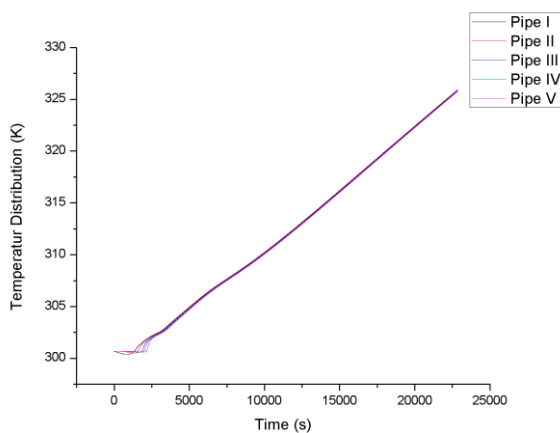
mengamati distribusi temperatur pada *section 1*, *section 4*, *section 9*, *section 12*, dan *section 16* pada *hot pipe* terhadap waktu serta laju aliran massa pada *section 9* pada *hot pipe*.

Hasil dan Pembahasan

Simulasi menggunakan RELAP5 untuk melihat pengaruh distribusi temperatur pada *hot leg* serta laju alirannya pada FASSIP 01 telah dilakukan oleh Antariksawan, dkk. Hasil dari penelitian untuk distribusi temperatur, pada *section 1* maupun *section 4* yang mengalami hasil yang mirip dengan eksperimen, namun untuk *section* yang lain temperatur yang disimulasikan lebih rendah dari hasil eksperimen, yang ditunjukkan dengan keadaan transien pada simulasi jauh lebih lambat. Hasil penelitian untuk laju aliran massa menunjukkan bahwa laju aliran massa hasil simulasi sesuai dengan hasil eksperimen [8].

Setelah dilakukan proses *Scale Up*, didapatkan data distribusi temperatur pada setiap bagian pipa dan laju aliran massa dari fluida yang mengalir dalam pipa.

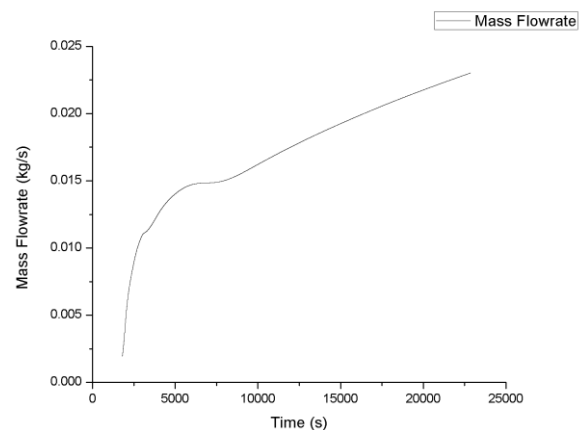
Penelitian untuk melihat pengaruh distribusi temperatur pada *hot leg* serta melihat laju aliran saat skala pada FASSIP 01 dinaikan menjadi dua kali (Tabel 1) dari semula ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Distribusi Temperatur pada *Hot Leg*

Gambar 3 menunjukkan distribusi temperatur di *hot leg* pada *section 1*, *section 4*, *section 9*, *section 12*, dan *section 16* terhadap waktu. Temperatur awal dari penelitian ini adalah 300 K pada waktu 0 second. Terlihat bahwa pada keadaan awal pada *section 1* mengalami penurunan terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan stabil, hal tersebut karena proses distribusi kalor oleh *heater* belum stabil (*heater* baru menyala $t=0$), yang mana *section 1* merupakan *section* yang terdekat dengan tangki *heater*. Sedangkan pada *section 4*, *section 9*, *section 12*, dan *section 16* telah mendapatkan

kalor yang relatif stabil, karena telah melewati beberapa *section* sebelumnya. Keadaan awal akan mengalami peningkatan temperatur yang cenderung lambat, dikarenakan proses difusi kalor. Selanjutnya akan terjadi peningkatan temperatur jika gaya buoyancy telah melebihi gaya gravitasi dan gesekan. Temperatur selalu meningkat yang ditandai dengan *section 1*, *section 4*, *section 9*, *section 12*, dan *section 16* selalu mengalami kenaikan temperatur dengan bertambahnya waktu yang diberikan, karena pada FASSIP-01 temperatur bergantung dengan lamanya waktu. *Section* mempengaruhi distribusi temperatur dikarenakan posisi yang semakin dekat dengan *heater* akan membuat difusi kalor semakin baik untuk laju aliran, hal ini terjadi pada *section 1* yang mana temperaturnya mengalami kenaikan terlebih dahulu sampai dengan waktu yang ditentukan (20000 *second*), dan dilanjutkan dengan *section - section* lainnya secara berurutan yang terlihat pada gambar 3, temperatur selalu meningkat sampai dengan 322,70 K dengan bertambahnya waktu sampai dengan 20000 *second* dengan daya yang konstan.



Gambar 4. Laju Aliran Massa di *Rectangular Loop Pipe*

Gambar 4 menunjukkan pengaruh laju aliran terhadap waktu. Pada penelitian digunakan pipa *section 9* yang diasumsikan laju aliran pipa sepanjang *hot leg* adalah sama dikarenakan temperaturnya sama. Dari gambar terlihat bahwa laju aliran pada kondisi awal relatif tidak stabil (terjadi kenaikan maupun penurunan), hal ini dikarenakan pengaruh dari daya, temperatur, dan waktu. Daya pada penelitian ditetapkan konstan. Daya ini akan memanaskan *heater*, semakin lama *heater*

dipanaskan maka akan semakin besar temperatur yang dihasilkan. Temperatur yang dihasilkan akan mempengaruhi laju alirannya, terlihat pada gambar, kondisi awal temperatur masih relatif belum stabil karena peningkatan temperatur yang cenderung lambat, dikarenakan proses difusi kalor. Saat waktu 8000 *second*, terlihat bahwa laju aliran mulai mengalami kenaikan secara konstan dan memungkinkan akan mencapai keadaan *steady state*.

Kesimpulan

Sistem pendingin pasif dengan menggunakan prinsip sirkulasi alami dapat dialami pada FASSIP-01 dapat diamati pada RELAP5. Melalui penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa ketika komponen-komponen pada FASSIP-01 yaitu *hot leg*, *cold leg*, *heater tank*, *cooler tank*, *coolant pump*, dan *expansion tank* yang mengalami peningkatan geometri menggunakan RELAP5 maka temperatur dan laju aliran massa yang terhitung masih memiliki nilai yang sama dengan simulasi saat sebelum menaikkan geometri. Diharapkan akan ada simulasi penskalaan yang lebih besar sampai dengan skala sebenarnya, dan *software* RELAP dapat digunakan sampai waktu 50000 *second* ataupun lebih.

Penghargaan

Penelitian ini dilakukan di PTKRN-BATAN. Terima kasih kepada Pegawai PTKRN dari Subdivisi Termal-Hidrolik Eksperimental yang telah mendukung proses penelitian ini.

Referensi

- [1] Yudiartono, Anindhita, A. Sugiyono und L. M. Wahid , OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2018,“ in *Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat*, Jakarta, Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2018.
- [2] A. Yahdi, M. Razif, S. R. Ilham, Ikmario und C. Widoyono, Makalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN),“ 2015.
- [3] T. Vieru, „Earthquake Damages Japanase Nuclear Reactors,“ SOFTPEDIA NEWS, 14 Maret 2011. [Online]. Available: <https://news.softpedia.com/news/Earthquake-Damages-Japanese-Nuclear-Reactors-189294.shtml>. [Zugriff am 4 Agustus 2019].
- [4] M. Noufal, Giarno, J. Prasetyo, D. Haryanto und M. Juarsa, „Analisis Unjuk Kerja Pemanas dan Pendingin di Untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif,“ *Sigma Epsilon*, Bd. 19 No.2, 2015.
- [5] M. Kumar, E. Pal, A. K. Nayak und P. K. Vijayan, „Conceptual design of a passive moderator cooling system for a pressure tube type natural circulation boiling water cooled reactor,“ *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 291, pp. 261-270, 2015.
- [6] P. Plouffe, M. Bittel, J. Sieber und D. M. Roberge, „On the scale up of micro reactors for liquid-liquid reactions,“ *Chemical Engineering Science*, Bd. 143, pp. 216-225, 2016.
- [7] M. ISHII, „SCALING LAWS FOR THERMAL-HYDRAULIC SYSTEM UNDER SINGLE PHASE AND TWO-PHASE NATURAL CIRCULATION,“ *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 81, pp. 411-425, 1984.
- [8] A. R. Antariksawan, S. Widodo, M. Juarsa, S. Ismarwanti, D. Saptoadi, M. H. Kusuma, T. Ardiyati und T. I. Mahlia, „Experimental and Numerical Simulation Investigation of Single-Phase Natural Circulation in a Large Scale Rectangular Loop,“ *Atom Indonesia*, Bd. 45, pp. 17-25, 2019.