

Simulation of Particle Tracer Materials and its Use in Visualizing the Flow Rate of FASSIP-02 Loop

Widya Andriani¹, Gustiani Arum P.¹, Sholihatul Habibah Fitriani¹ dan Mulya Juarsa²

¹Prodi Sarjana Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran.

²Pusat Teknologi dan Keselamatan reaktor Nuklir (PTKRN), BATAN

Email : widya16005@mail.unpad.ac.id

Abstract. To satisfy increasing energy needs, nuclear can be considered as a solution. However, it has shortcomings, mostly on safety systems. One instance of a failed safety system trial occurred in Fukushima, Japan. The accident occurs because of the failure in an active cooling system due to the earthquake and tsunami. This new object brings out new research about the use of passive cooling systems in the safety of nuclear reactors. The accident in the cooling system makes flow circulation an important parameter. This study aims to simulate a particle tracer material which is the object of flow visualization, then do a comparison of flowrate between the visualization analysis on analytical calculations performed on the FASSIP-02 Loop at the Thermohydraulic Laboratory, BATAN. It shows if the density of particle tracer is increasing, the flow rate decrease. Another parameter that increases the flow rate is the temperature difference between the cooler and the heater, as the temperature becomes greater, the flow rate faster. While visualization shows that flow rate slower than analytical calculations, this because of differences in terms of reference.

Abstrak. Untuk memenuhi peningkatan kebutuhan energi, nuklir dapat dianggap sebagai solusi. Namun nuklir memiliki kekurangan, terutama pada sistem keselamatan. Salah satu contoh kegagalan sistem keselamatan nuklir terjadi di Fukushima, Jepang. Kecelakaan terjadi akibat rusaknya sistem pendingin aktif karena gempa dan tsunami. Sehingga membuat objek penelitian baru tentang penggunaan sistem pendingin pasif dalam keselamatan reaktor nuklir. Fenomena dalam sistem pendingin pasif diantaranya sirkulasi alami yang membuat laju aliran menjadi parameter penting. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi rekayasa bahan *particle tracer* yang merupakan objek visualisasi laju aliran, serta melakukan perbandingan visualisasi laju aliran terhadap perhitungan analitik yang dilakukan pada Untai FASSIP-02 di Laboratorium Termohidrolika, BATAN. Didapatkan bahwa semakin besar massa jenis *particle tracer* yang digunakan maka laju aliran semakin lambat. Parameter lain yang mempengaruhi laju aliran adalah perbedaan temperatur antara *cooler* dan *heater*, semakin besar perbedaan temperatur maka akan mempercepat laju aliran. Sedangkan, laju aliran visualisasi menunjukkan hasil yang lebih lambat dari perhitungan analitik, hal ini dikarenakan perbedaan kerangka acuan dalam meninjau laju aliran.

Kata kunci: Laju aliran, *particle tracer*, sirkulasi alami, visualisasi, untai FASSIP-02.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

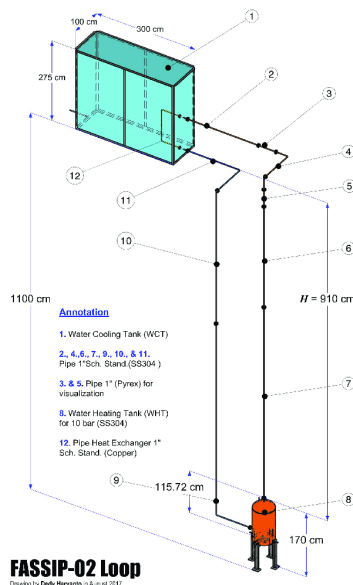
Pendahuluan

Melihat adanya ketidakseimbangan antara kebutuhan energi dan cadangan energi, perlu adanya energi alternatif di Indonesia. Salah satu energi alternatif yang dapat dimanfaatkan adalah tenaga nuklir. Pemanfaatan tenaga nuklir untuk pembangkit listrik sangat potensial untuk mengatasi kungkungan kesulitan akibat kelangkaan sumber energi fosil. Namun, keselamatan dan keamanan penggunaan energi nuklir perlu dijadikan perhatian, agar tidak terjadinya bencana seperti meledaknya reaktor energi nuklir di Fukushima Daiichi, Jepang. Kecelakaan ini terjadi akibat tidak bekerjanya sistem pendingin aktif, yang rusak akibat gempa dan

tsunami. Untuk itu, perlu adanya pengembangan sistem pendingin pasif.

Sistem pendingin pasif beroperasi dengan komponen dan proses pasif yang andal seperti efek gravitasi dan sirkulasi alamiah, bukan peralatan aktif seperti pompa dan sumber daya [1]. Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN telah merancang dan menkonstruksi fasilitas eksperimen untuk meneliti fenomena sirkulasi alami yang disebut sebagai Untai Fasilitas Simulasi Sistem Pasif versi 02 (FASSIP-02). Untai FASSIP-02 memiliki dua komponen utama berupa tangki *heater* sebagai pemanas dan tangki *cooler* sebagai pendingin untuk menimbulkan perbedaan densitas air di dalam untai.

Sirkulasi alami menjadi salah satu bagian dari sistem pasif. Sirkulasi alami pada sistem pasif (*thermosyphon*) adalah sistem dengan gerakan fluida dialirkan secara termal yang dihasilkan dari perbedaan densitas dan *body force* [2]. Aliran sirkulasi alami bergantung pada perbedaan densitas antara saluran yaitu, saluran panas (*heater*) dan saluran dingin (*cooler*), untuk menyediakan sistem gaya pendorong. Biasanya, laju aliran sirkulasi alamiah lebih kecil dari laju aliran dalam sistem sirkulasi paksa [3]. Selain itu, laju aliran sirkulasi alami juga dipengaruhi oleh orientasi (horizontal/vertikal) dari *heater* dan *cooler* [4] serta jarak antara *heater* dan *cooler*, dimana semakin tinggi jarak maka semakin cepat kecepatan rata-rata airnya [5]. Laju aliran pada sirkulasi alami dapat diketahui baik dengan pengukuran, perhitungan analitik maupun dengan metode visualisasi. Pada penelitian yang akan dilakukan, laju aliran dari visualisasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan. Penelitian akan dilakukan dengan FASSIP-02.



Gambar 1. FASSIP-02 loop

Tabel 1. Komponen FASSIP-02

No	Komponen	Ukuran/Material
1	Water Cooler Tank (WCT)	1 m x 3 m x 2.75 m (<i>carbon steel</i> , t=8 mm)
2	Water Heating Tank (WHT)	Dia. 24 inch, h=1 m
3	Pipa	Dia. 1 inch (<i>stainless steel</i> 3040)
4	Heat Exchanger	Dia. 1 inch, t=3 mm, (<i>Copper</i>)
5	Heater	Panjang = 30 cm, P=5 kW (total 20 kW)
6	Perbedaan ketinggian	910 cm
7	Ketinggian total (H)	1100 cm

8	Loss coef. total (K)	12.71
9	Panjang pipa total (L)	43.17 m

Metode Penelitian

Perhitungan Analitik

Dalam kondisi *steady-state*, fenomena sirkulasi alami yang terjadi dapat digambarkan dengan Persamaan (1), dikarenakan gaya apung (*buoyancy*) berasal dari bagian panas (sisi kiri Persamaan (1)) dan pada bagian dingin memperlambat gaya gesek (bagian kanan Persamaan (1)) [6].

$$-g \int \rho dz = \frac{R_h \rho g H}{2\rho} \quad (1)$$

Setelah diintegrasikan, Persamaan (1) menjadi

$$g(\rho_h - \rho_c)H = \frac{R_h \rho g H}{2\rho} \quad (2)$$

$$\rho g H = \frac{2g\rho(\rho)}{R_h}$$

Dengan resistansi hidrodinamika secara umum adalah R_h

$$R_h = \sum_{i=1}^N \left(\frac{f \times L}{D} + K \right) \frac{1}{A^2} \quad (3)$$

Persamaan (3) dapat diubah menjadi

$$R_h A^2 = \left(\frac{f \times L}{D} + K \right) \quad (4)$$

laju aliran diturunkan menggunakan koefisien gesekan pipa untuk aliran laminar

$$f = \frac{64\mu}{D\rho v} \quad (5)$$

kemudian Persamaan (4) disubstitusikan ke Persamaan (5). Persamaan untuk resistansi hidrodinamika adalah

$$R_h = \frac{64\mu L + D^2 \rho v K}{D^2 \rho v A^2} \quad (6)$$

kemudian Persamaan (6) disubstitusikan ke persamaan (2), yang kemudian dihasilkan

$$v = \frac{-64\mu L + \sqrt{(64\mu L)^2 + 8gHK\rho(\rho_h - \rho_c)D^4}}{2D^2 \rho K} \quad (7)$$

Persamaan (7) adalah laju aliran sirkulasi alami pada pipa *rectangular* yang diturunkan dari *Natural Laws*. Artinya, laju aliran sirkulasi alami dipengaruhi oleh parameter-parameter yang terdiri dari Panjang loop total (L), perbedaan tinggi (H) antara pemanas dan pendingin, diameter pipa (D), suhu (T) dan konstanta (K) [6].

Visualiasi dengan Particle Tracer

Bahan *particle tracer* dapat digunakan untuk visualisasi laju aliran pada sirkulasi alami. Bahan *particle tracer* yang digunakan harus memiliki nilai densitas yang tidak berbeda jauh dengan fluida kerja yang digunakan. Pada penelitian fluida kerja yang digunakan adalah air yang memiliki nilai densitas 1000 kg/m³. Hal ini berhubungan dengan hukum Archimedes, dimana *particle tracer* akan memiliki gaya apung sesuai dengan massa jenis yang dimilikinya. Sehingga ketika digunakan, *particle tracer* tidak tenggelam ataupun mengapung didalam aliran.

Berikut adalah beberapa contoh bahan yang dapat dijadikan *particle tracer*

Tabel 2. Massa jenis particle tracer

Nama Benda	Massa jenis (kg/m ³)	Massa jenis (gr/cm ³)
Serpihan sabun	160	0,01600
Arang	208	0,2080
Serbuk gergaji	210	0,2100
Tebu	272	0,2720
Parutan kelapa	352	0,3520
Pupuk kandang	400	0,4000
oats	431	0,4320
Baking powder	721	0,7210
Gandum	769	0,7690
Sabun padat	801	0,8010
Rosin	1073	1,0730
Pasir kuarsa	1201	1,2010
Flint silika	1390	1,3900
Kapur kental	1442	1,4420
Semen oartland	1506	1,5060
Bijih nikel	1600	1,6000
molibdenum	1600	1,6000
Berilium	1840	1,8400
Batu bata	1922	1,9220
Brick silika	2050	2,0500

Hasil dan Pembahasan

Laju aliran

Laju aliran pada sirkulasi alami terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang menyebabkan terjadinya perbedaan kerapatan pada fluida. Perbedaan kerapatan ini menjadikan fluida mengalir dari titik dengan temperatur tinggi yang memiliki kerapatan rendah menuju titik dengan temperature rendah yang memiliki kerapatan tinggi. Peristiwa ini dapat dijelaskan dengan Persamaan (7).

$$v = \frac{-64\mu L + \sqrt{(64\mu L)^2 + 8gHK\rho(\rho_h - \rho_c)D^4}}{2D^2\rho K}$$

(7)

Persamaan (7) menunjukkan bahwa laju aliran sirkulasi alami dipengaruhi oleh parameter-parameter yang terdiri dari Panjang loop total (L),

perbedaan tinggi (H) antara pemanas dan pendingin, diameter pipa (D), suhu (T) dan konstanta (K) [6].

Simulasi laju aliran particle tracer

Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan Persamaan (7), semakin besar massa jenis *particle tracer* yang digunakan maka laju aliran semakin lambat. Hal ini dipengaruhi oleh massa jenis total dari fluida dan *particle tracer* yang semakin besar seiring bertambahnya massa jenis *particle tracer*. Perbedaan temperatur cooler (T_c) dan heater (T_h) juga dapat mempengaruhi laju aliran. Semakin besar perbedaan suhu, maka semakin cepat laju aliran.

Berikut adalah hasil simulasi laju aliran *particle tracer*, dengan massa jenis yang digunakan adalah massa jenis campuran fluida dan *particle tracer*.

Tabel 3. Hasil simulasi laju aliran *particle tracer* variasi 1.

Nama benda	Massa jenis (kg/m ³)	v (m/s)
Sabun Serpih	826,94926	62,37269
Arang	867,92521	59,42799
Serbuk Gergaji	869,29264	59,33451
Tebu	903,01955	57,11842
Parutan kelapa	930,81996	55,41249
Pupuk kandang	942,66045	54,71647
Oats	949,21945	54,33838
Baking Powder	983,50671	52,44402
Gandum	986,83262	52,26727
Sabun padat	988,83926	52,16121
Rosin	1001,24182	51,51508
Pasir kuarsa	1005,19884	51,31229
Flint silika	1009,74745	51,08114
Kapur kental	1010,79556	51,02817
Semen Ormland	1011,98883	50,968
Bijih nikel	1013,57272	50,88836
Molibdenum	1013,57272	50,88836
Berilium	1016,89867	50,72192
Batu bata	1017,84865	50,67458
Brick silika	1019,18262	50,60825

Tabel 4. Hasil simulasi laju aliran *particle tracer* variasi 2.

Nama benda	Massa jenis (kg/m ³)	v (m/s)
Sabun Serpih	825,3584	62,49291
Arang	866,2555	59,54253
Serbuk gergaji	867,6204	59,44887
Tebu	901,2824	57,22851
Parutan kelapa	929,0293	55,51929
Pupuk kandang	940,847	54,82193
Oats	947,3934	54,44312

Baking Powder	981,6147	52,54511
Gandum	984,9342	52,36802
Sabun padat	986,937	52,26175
Rosin	999,3157	51,61437
Pasir kuarsa	1003,265	51,41119
Flint silika	1007,805	51,1796
Kapur kental	1008,851	51,12653
Semen Ortland	1010,042	51,06624
Bijih nikel	1011,623	50,98644
Molibdenum	1011,623	50,98644
Berilium	1014,942	50,81968
Batu bata	1015,891	50,77225
Brick silika	1017,222	50,7058

kerapatan viskositas dinamik untuk air adalah sebagai berikut

1. Kerapatan air akan mengikuti perubahan temperatur dari *heater* dan *cooler*. Kerapatan air dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

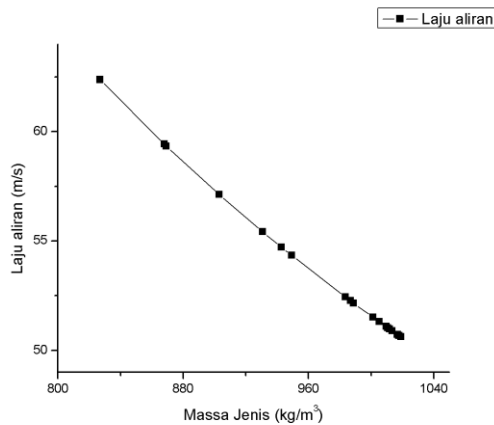
$$\rho(T) = 999,96124 + 0,01998T - 0,00593T^2 + 1,57598 \times 10^{-5}T^3 \quad (8)$$

2. Viskositas dinamik air berubah-ubah terhadap temperatur, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

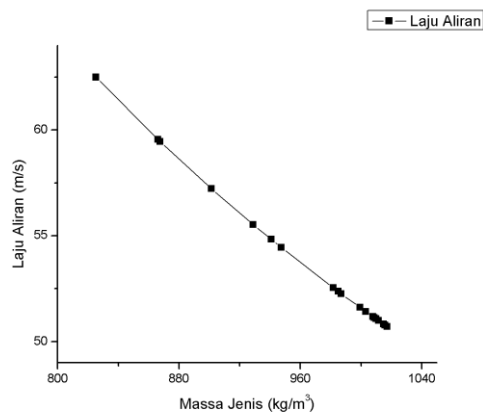
$$\mu(T) = 0,00176 - 4,7758 \times 10^{-5}T + 5,9183 \times 10^{-7}T^2 + 1,57658 \times 10^{-5}T^3 \quad (9)$$

Keterangan :

$$\mu(T) = \text{viskositas dinamik (Pa.s)}$$



Gambar 2. Grafik perbandingan massa jenis total dengan kecepatan laju aliran (variasi 1)



Gambar 3. Grafik perbandingan massa jenis total dengan kecepatan laju aliran (variasi 2)

Keterangan :

Variasi 1 : $T_h = 50^\circ C, T_c = 32^\circ C$

Variasi 2 : $T_h = 60^\circ C, T_c = 33^\circ C$

Perhitungan Laju Aliran

Perhitungan laju aliran dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan (7), dengan nilai

Tabel 5. Perhitungan laju aliran air

T_h (K)	ρ_h (kg/m^3)	μ_h (Pa.s)	T_c (K)	ρ_c (kg/m^3)	μ_c (Pa.s)	T_{camp} (K)	$\rho_{campuran}$ (kg/m^3)	$\mu_{campuran}$ (Pa. s)	v (m/s)
323	919,024	0,0410	305	901,73402	0,0327565	314	909,656	0,036727	0,6484612
333	931,211	0,0461	306	902,54505	0,0331828	319,5	915,205	0,039304	0,813768

Tabel 6. Perhitungan laju aliran campuran air dan *scrub facial wash*

T_h (K)	ρ_h (kg/m^3)	μ_h (Pa.s)	T_c (K)	ρ_c (kg/m^3)	μ_c (Pa.s)	T_{camp} (K)	$\rho_{campuran}$ (kg/m^3)	$\mu_{campuran}$ (Pa. s)	v (m/s)
323	919,024	0,0410	305	901,73402	0,0327565	314	1004,473	0,036727	0,6131675
333	931,211	0,0461	306	902,54505	0,0331828	319,5	1004,473	0,039304	0,7729189

Tabel 7. Perhitungan laju aliran tinta printer

T_h (K)	ρ_h (kg/m^3)	μ_h (Pa.s)	T_c (K)	ρ_c (kg/m^3)	μ_c (Pa.s)	T_{camp} (K)	$\rho_{campuran}$ (kg/m^3)	$\mu_{campuran}$ (Pa. s)	v (m/s)
323	9139,1	0,1553	305	9234,5	0,135115	314	9186,8	0,14502	0,4227796

Berdasarkan data Tabel 5. perhitungan laju aliran air dengan menggunakan Persamaan (7) dapat diketahui. Hasil menunjukkan bahwa temperatur mempengaruhi nilai laju aliran. Pada temperatur yang tinggi, laju aliran pun tinggi, sedangkan pada temperatur rendah, laju aliran juga rendah. Hal ini dikarenakan temperatur adalah faktor yang mempengaruhi gerak partikel pada fluida.

Data pada Tabel 6. juga diselesaikan dengan Persamaan (7). Namun, terdapat perbedaan dalam perhitungan massa jenis cooler (ρ_c). Nilai ρ_c didapatkan dari perhitungan massa jenis campuran air dan *scrub*. Berikut adalah perhitungan yang dilakukan.

$$\begin{aligned} \text{Panjang tabung} &= 48 \text{ cm} = 0,48 \text{ m} \\ \text{Diameter tabung} &= 1 \text{ inch} = 0,0254 \text{ m} \\ \text{Volume tabung} &= 0,000243 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Diketahui bahwa ρ_{air} adalah 999,9612 kg/m^3 , maka massa air yang digunakan adalah 0,243087 kg . Sedangkan massa scrub yang digunakan adalah 0,001 kg dan volume adalah 10^{-6} m^3 .

$$\rho_{campuran} = \frac{0,243087 + 0,001}{0,000243} = 1004,473 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Perhitungan laju aliran tinta, dihitung dengan menggunakan Persamaan (7). Namun, terdapat suatu persamaan untuk nilai ρ dan μ . Hal ini dikarenakan kedua nilai ini ditentukan berdasarkan *database*.

Tabel 8. Database kerapatan dan viskositas dinamik dari tinta berwarna hitam. (<https://wiki.anton-paar.com/en/ink>)

T (°C)	ρ (g/cm^3)	$\mu_{dinamik}$ ($mPa.s$)
20	10,743	5,751
25	10,719	4,875
30	10,695	4,177
35	10,669	3,615
40	10,642	3,156
45	10,614	2,776
50	10,585	2,460
55	10,560	2,365
60	10,533	2,325
65	10,507	2,395

Berdasarkan data, berikut adalah persamaan matematis untuk kerapatan.

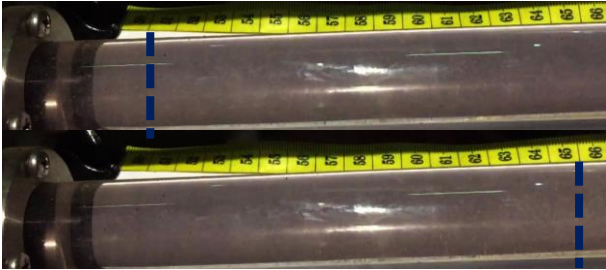
$$\rho(T) = -0,0035T + 10,851 \tag{10}$$

Persamaan matematis dari viskositas dinamik tinta adalah sebagai berikut.

$$\mu(T) = 0,0022x^2 - 0,261x + 10,065 \tag{11}$$

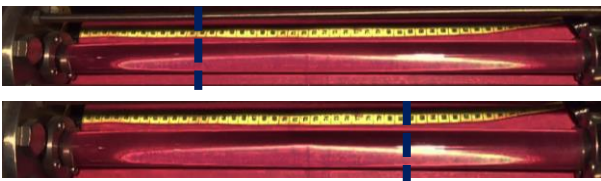
Pengukuran dan Visualisasi Laju Aliran

Gambar 4. menunjukkan visualisasi aliran *scrub* dengan temperatur *heater* 50°C. Gambar 4 adalah potongan video berdurasi 15 detik yang dijadikan 15 *frames*, artinya durasi 1 *frame* adalah 1 detik, dengan perpindahan partikel yang terjadi adalah 15 *cm*.



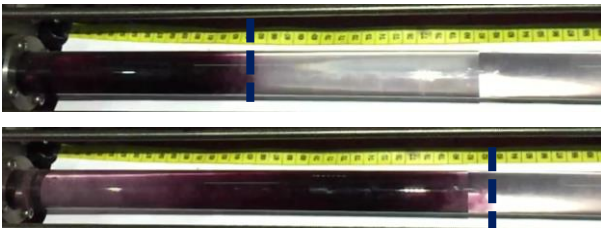
Gambar 4. Aliran scrub pada temperatur 50°C

Gambar 5 menunjukkan visualisasi aliran scrub temperatur heater 60°C. Gambar 5 adalah potongan video berdurasi 23 detik yang dijadikan 23 frames, dengan perpindahan partikel yang terjadi adalah 20 cm.



Gambar 5. Aliran scrub pada temperatur 60°C

Gambar 6 menunjukkan visualisasi aliran tinta temperatur heater 50°C. Gambar 6 adalah potongan video berdurasi 10 detik yang dijadikan 10 frames, dengan perpindahan partikel yang terjadi adalah 18 cm.



Gambar 6. Aliran tinta pada temperatur 50°C

Tabel 9. Hasil pengukuran laju aliran

Jenis aliran	T_h	Perpindahan	Laju aliran
Scrub	50°C	0,15 m	0,15 m/s
Scrub	60°C	0,20 m	0,20 m/s
Tinta	50°C	0,18 m	0,18 m/s

Perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran

Berdasarkan pengukuran hasil visualisasi dan perhitungan analitik, didapatkan besar laju aliran untuk variasi temperatur adalah sebagai berikut.

Tabel 10. Data perbandingan laju aliran perhitungan dan pengukuran

Jenis Aliran	T_h (°C)	v_{hitung} (m/s)	v_{ukur} (m/s)	Rasio Perbandingan
Air	50	0,648461	-	-
Air	60	0,813786	-	-
Scrub	50	0,613167	0,15	0,245
Scrub	60	0,772918	0,20	0,258
Tinta	50	0,422779	0,18	0,426

Air	50	0,648461	-	-
Air	60	0,813786	-	-
Scrub	50	0,613167	0,15	0,245
Scrub	60	0,772918	0,20	0,258
Tinta	50	0,422779	0,18	0,426

Berdasarkan hasil yang didapatkan, maka pengukuran laju aliran dengan metode visualisasi memiliki perbedaan tertentu dengan perhitungan analitik. Perbedaan ini berpengaruh pada keakuratan pengambilan data pada eksperimen. Jika ingin meninjau laju aliran dengan visualisasi objek scrub dan tinta, maka perlu memperhatikan error yang ditimbulkan. Tabel data menunjukkan bahwa, v_{ukur} dari scrub dengan temperatur heater 50°C akan terlihat lebih lambat 75,54% dari perhitungan analitik. Kemudian untuk scrub dengan temperatur heater 60°C akan lebih lambat 74,12%, sedangkan tinta dengan temperatur heater 50°C lebih lambat 57,42% jika dibandingkan dengan perhitungan analitik.

Visualisasi aliran dengan objek scrub dan tinta menghasilkan nilai laju aliran, (v_{ukur}) yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai laju aliran dari perhitungan analitik (v_{ukur}). Hal ini dikarenakan perbedaan cara meninjau pada aliran yang terjadi. Apabila menggunakan perhitungan analitik, parameter yang digunakan dalam perhitungan mencakup aliran air dan scrub atau aliran air dan tinta, sehingga nilai laju aliran yang dihasilkan adalah gabungan kedua objek. Sedangkan pengukuran dengan visualisasi, hanya meninjau objek yang terlarut dalam air yaitu scrub atau tinta, dimana kedua objek ini secara teori memiliki massa jenis lebih berat dibandingkan air yang menyebabkan objek bergerak lebih lambat dibandingkan aliran air.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Besarnya laju aliran berbanding terbalik dengan massa jenis *particle tracer* yang digunakan. Semakin besar massa jenis maka laju aliran akan semakin lambat.
2. Perbedaan temperatur heater dan cooler mempengaruhi laju aliran, semakin besar, perbedaan temperatur tersebut maka akan semakin lambat laju aliran.
3. Berdasarkan data yang didapatkan, untuk perhitungan analitik aliran scrub dengan temperatur heater 50°C, 60°C, dan aliran tinta 50°C berturut-turut adalah 0,61361675 m/s,

0,7729189 *m/s* dan 0,4227796 *m/s*. Sedangkan untuk pengukuran dari visualisasi aliran *scrub* dengan temperatur *heater* 50°C, 60°C, dan aliran tinta 50°C berturut-turut adalah 0,15 *m/s*, 0,20 *m/s* dan 0,18 *m/s*.

4. Berdasarkan data penelitian, laju aliran berdasarkan visualisasi memiliki nilai lebih rendah daripada berdasarkan perhitungan analitik. Rasio perbandingan hasil visualisasi terhadap perhitungan analitik untuk *scrub* dengan temperatur *heater* 50°C, 60°C, dan aliran tinta 50°C berturut-turut adalah 0,245; 0,258; dan 0,426. Hal ini dikarenakan perbedaan cara meninjau (kerangka acuan) pada aliran yang terjadi, dimana untuk perhitungan analitik meninjau air dan objek visualisasi secara bersamaan sedangkan untuk visualisasi tidak meninjau aliran air. Sehingga, perlu untuk memperhatikan rasio perbandingan jika melakukan pengukuran laju aliran menggunakan visualisasi.

Referensi

- [1] Wu, J. et al., 2015. Experimental study on circulation characteristics of secondary passive heat removal system for Chinese pressurized water reactor. *Applied Thermal Engineering* 77, 106-112.
- [2] Misale, M. and Frogheri, M., 2001. Stabilization of a single-phase natural circulation loop by pressure drops. *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science* 25, 277-282.
- [3] Shi, S. et al., 2015. Experimental investigation of natural circulation instability in a BWR-type small modular reactor. *Journal of Progress in Nuclear Energy* 85, 96-107.
- [4] Vijayan, P.K. et al., 2007. Steady state and stability characteristics of single-phase natural circulation in a rectangular loop. *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, 925-945.
- [5] Rosyidi, A. dan Sagino., 2014. Eksperimen awal aliran sirkulasi alamiah pada simulasi sistem pasif. *Jurnal Sigma Epsilon* 18, 58-63. ISSN 0853-9103.
- [6] Juarsa, M. et al., 2018. Estimation of Natural Circulation Flow Based on Temperature in The FASSIP-02 Large-Scale Test Loop Facility. Conference Proceedings of 2nd International tropical Renewable Energy Conference (i-TREC).