

OPTIMASI PENGUKURAN LAJU AIR PADA SUSUNAN PERALATAN EKSPERIMEN DINAMIKA FLUIDA SEDERHANA

I Gede Rasagama

Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Email: igesagama@polban.ac.id

Diterima: 7 Agustus 2020

Disetujui: 1 September 2020.

Abstrak

Tujuan penelitian untuk mengetahui hasil optimasi pengukuran laju air dalam susunan peralatan eksperimen dinamika fluida sederhana. Penelitian memakai metode eksperimen berbasis 5 persamaan teoritis. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi pengukuran hanya dapat dilakukan pada kajian perubahan posisi permukaan air, perbedaan pasangan diameter, perbedaan diameter pipa kedua, dan perbedaan keadaan pompa. Hasil pengukuran laju air untuk referensi 0, 1, dan 2, masing-masing mempunyai kecenderungan khas bagi kajian perubahan besaran fisika dan, atau perbedaan kondisi fisika terkait. Laju air referensi 0, 1, dan 2 makin kecil jika permukaan air makin rendah dengan rerata koefisien determinansinya, masing-masing 58%, 76%, dan 73%. Laju air referensi 2 berbasis persamaan (3) dan (5), masing-masing makin besar jika diameter pipa referensi 2 makin besar dengan rerata koefisien determinansi 94% dan makin kecil dengan rerata koefisien determinansi 74%. Tendensi laju air referensi 0 dan 2 makin kecil ketika pompa dihidupkan dengan perubahan lebih besar, dibanding pompa tidak dihidupkan.

Kata Kunci: Optimasi, Pengukuran, Laju, Dinamika, Fluida.

Abstract

The research objective is to determine the results of optimization of water rate measurements in the arrangement of simple fluid dynamics experimental equipment. The study used an experimental method based on 5 theoretical equations. The research shows that the optimization of measurements can only be done on the study of changes in water surface position, differences in diameter pairs, differences in the diameter of the second pipe, and differences in pump conditions. The results of water rate measurements for references 0, 1, and 2, respectively, have a specific tendency for the study of changes in physical quantities and, or differences in the associated physical conditions. The reference water rates 0, 1, and 2 are getting smaller, the lower the water level, with the mean coefficient of determination, respectively 58%, 76%, and 73%. The reference water rate 2 is based on equations (3) and (5), each of which is greater if the diameter of the reference pipe 2 is bigger with a mean determination coefficient of 94% and the smaller, with a mean coefficient of determination of 74%. The tendency of the reference water rate 0 and 2 is getting smaller, when the pump is started, with a greater change, than the pump is not started.

Keywords: Optimization, Measurement, Rate Dynamics, Fluid.

PENDAHULUAN

Laju fluida merupakan salah satu besaran fisika sering dianalisa dalam sistem aliran untuk tujuan tertentu. Pengukuran laju fluida kritis dalam mempertahankan tekanan reservoir pada sumur Ratu di lapangan Kinantan Riau (Musnal, 2014). Perhitungan laju uap air kolam pendingin terkait proses kontrol tempat penyimpanan bahan bakar operasional reaktor RSG-GAS (Diby, 2002). Analisa pengaruh perubahan arus listrik dan laju aliran gas pada proses *flux cored arc welding* (Irfandi, 2020). Laju fluida dalam sistem aliran tampak sebagai besaran fisika rumit, terkait banyak tipe besaran fisika, dan termasuk indikator *operational safety system* reaktor.

Dalam operasional pompa hidram, laju air terkandung dalam energi hidrolis yaitu energi kinetik ditambah energi potensial gravitasi. Energi hidrolis adalah kemampuan air melakukan usaha mekanik karena ada suplai energi listrik ke pompa. Pompa hidram adalah pengangkat air otomatis dengan kandungan energi air

itu sendiri (Pribadi, 2019). Tampak pembahasan laju air komprehensif cukup memberi ruang latihan berpikir mahasiswa berupa kemampuan berpikir level III versi Anderson dan Krathwolh (Rasagama I. G., 2011).

Pengukuran laju fluida cair dan gas termasuk tipe pengukuran variabel proses dari beberapa variabel dalam proses industri. Manfaatnya bisa menentukan perbandingan jumlah bahan bakar masuk dan habis selama proses industri berlangsung. Variabel ini termasuk indikator utama menakar kebutuhan bahan bakar cair untuk tipe proses industri tertentu (Suharto, 1991). Manfaat lain pengontrolan konsumsi bahan baku (cair dan gas) untuk budidaya tanaman, produksi makanan, minuman, dan material aplikasi, serta produksi terkait hidrolis minyak (Saputra M. R., 2017).

Persamaan Bernoulli dan kontinuitas termasuk 2 konsep utama untuk kajian laju fluida (Giancoli, 2016.). Dalam jangka panjang, penguasaannya bisa menjadi landasan berpikir bagi lulusan jurusan teknik mesin, ketika melakukan pekerjaan produksi, perawatan, dan peningkatan

kinerja mesin. Mahasiswa tingkat II jurusan ini mempelajarinya kembali pada matakuliah mekanika fluida (Rasagama I. G., 2016). Aktualisasi pembelajarannya amat dibutuhkan dan lebih baik dengan metode eksperimen pengukuran laju air untuk mengatasi keabstrakan konsep dinamika fluida (Fathiah, 2015).

Asumsi air sebagai fluida ideal relatif memudahkan penerapan persamaan Bernoulli dan kontinuitas pada sistem peralatan eksperimen dinamika fluida untuk merumuskan

persamaan laju air teoritis (Aini, 2018). Peralatan eksperimen disusun atas beberapa peralatan seperti ditunjukkan gambar 1. Selang berfungsi sebagai manometer pengukur tidak langsung tekanan air. Ditetapkan 3 titik referensi yaitu 0: permukaan air dalam bejana terbuka; 1: disepanjang sumbu pipa I; dan 2: disepanjang sumbu pipa II. Fenomena dalam raksa menjadi dasar pengukuran tekanan air berbasis beda tinggi permukaan raksa pada 2 selang.



Gambar 1. Susunan peralatan eksperimen dinamika fluida sederhana

Dari fenomena pada gambar 1, telah ditemukan 7 persamaan laju air representatif dengan konsep dinamika fluida, hasil kajian teoritis dan eksperimen (Rasagama, 2020).

Terkait tujuan penelitian ini maka ke-7 persamaan dimodifikasi menjadi 5 persamaan representatif berikut (Rasagama, 2020):

1. Laju air referensi 0 ketika

ketinggian permukaan air pada posisi ke- j :

$$v_{0j} = \frac{2(h_{00}-h_{0j})}{t} \quad (1)$$

- Laju air referensi 1 ketika ketinggian permukaan air pada posisi ke- j dengan pasangan titik referensi (0,1):

$$v_{1j} = \sqrt{2 \left[\left(\frac{h_{00}-h_{0j}}{t} \right)^2 + g \left(h_{0j} - \frac{\rho_s}{\rho_d} \Delta h_{1j} \right) \right]} \quad (2)$$

- Laju air referensi 2 ketika ketinggian permukaan air pada posisi ke- j dengan pasangan titik referensi (0,2):

$$v_{2j} = \sqrt{2 \left[\left(\frac{h_{00}-h_{0j}}{t} \right)^2 + g \left(h_{0j} - \frac{\rho_s}{\rho_d} \Delta h_{2j} \right) \right]} \quad (3)$$

- Laju air referensi 1 ketika ketinggian permukaan air pada posisi ke- j dengan pasangan titik referensi (1,2):

$$v_{1j} = \sqrt{2g \left[\frac{\rho_s}{\rho_d} \right] \frac{[\Delta h_{1j} - \Delta h_{2j}]}{\left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]}} \quad (4)$$

- Laju air referensi 2 ketika ketinggian permukaan air pada posisi ke- j dengan pasangan titik referensi (1,2):

$$v_{2j} = \sqrt{2g \left[\frac{\rho_s}{\rho_d} \right] \frac{[\Delta h_{1j} - \Delta h_{2j}]}{\left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right]}} \quad (5)$$

Dengan ρ_s dan ρ_d masing-masing massa jenis raksa dan air, g adalah

percepatan gravitasi Bumi, d_1 dan d_2 masing-masing diameter pipa I dan pipa II, h_{0j} adalah ketinggian permukaan air pada posisi ke- j terhadap sumbu pipa referensi terendah. Δh_{1j} dan Δh_{2j} masing-masing beda ketinggian permukaan raksa pada referensi 1 dan 2 ketika ketinggian permukaan air pada posisi ke- j . j adalah urutan pengamatan posisi permukaan air. Pada ke-4 persamaan terakhir berlaku tekanan air referensi 1 atau 2 lebih tinggi dari udara luar.

Pembahasan ke-5 persamaan diatas dengan kajian beberapa kondisi seperti 2 kondisi pompai, beberapa posisi ketinggian permukaan air dalam bejana terbuka, variasi titik referensi observasi dan variasi pasangan diameter sambungan pipa telah mengarah pada usaha optimasi pengukuran laju air dalam susunan peralatan eksperimen dinamika fluida sederhana. Kajian ini menjadi penting dalam usaha penguatan konsep dinamika fluida mahasiswa, khususnya persamaan laju fluida. Optimasi disini adalah usaha perluasan penyelidikan beberapa besaran fisika yang mempengaruhi

besaran fisika diukur memakai susunan peralatan seperti ditunjukkan gambar 1.

Optimasi pengukuran laju air untuk mengetahui pengaruh perubahan: (i) posisi ketinggian permukaan air terhadap laju air referensi 0 untuk setiap tipe pasangan diameter pipa dan kondisi pompa; (ii) posisi ketinggian permukaan air terhadap laju air referensi 1 dan 2 untuk setiap tipe pasangan diameter pipa dan kondisi pompa; (iii) diameter pipa terhadap laju air referensi 1 dan 2 untuk setiap posisi ketinggian permukaan air dan setiap kondisi pompa; dan (iv) kondisi pompa terhadap laju air referensi 0, 1, dan 2 terkait 5 persamaan diatas.

METODE

Penelitian memakai metode eksperimen dengan memanfaatkan sarana Lab Fisika Terapan POLBAN. Air dalam riset dianggap fluida ideal. Optimasi pengukuran laju air dibatasi pada 2 kondisi pompa (mati dan hidup), 3 pasangan diameter pipa ($\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi, $\frac{3}{4}$ inchi-1 inchi, dan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{3}{2}$ inchi), 3 titik referensi (0, 1, dan 2), dan 6 posisi ketinggian

permukaan air (56 cm, 53 cm, 50 cm, 47 cm, 44 cm, dan 41 cm). Ketinggian permukaan air awal dalam bejana terbuka adalah 59 cm.

Pengukuran langsung dibagi 6 tahapan, masing-masing untuk waktu dan beda ketinggian permukaan raksa pada: 3 pasangan diameter terkait pompa mati dan 3 pasangan diameter terkait pompa hidup.

Berbantuan program *Excel for windows*, data diolah untuk memperoleh hasil pengukuran laju air terkait. Hasil ini untuk memverifikasi relasi antara laju air setiap titik referensi (variabel terikat) dengan perubahan besaran fisika yang dikaji (variabel bebas). Untuk ketajaman verifikasi setiap tipe korelasi digunakan metode tabulasi. Untuk menambah ketajaman korelasi juga digunakan nilai rerata koefisien determinansi (R^2) program *Excel for windows* (Raharjo, 2017). Tendensi hasil pengukuran laju air dianalisa berbasis fakta hasil observasi fenomena penyerta eksperimen dan kondisi peralatan, karakteristik setiap persamaan laju air terkait, serta konsep dinamika fluida ideal dan non-ideal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data diambil dalam 6 tahap, melibatkan 3 pasangan diameter pipa dan 2 kondisi pompa. Tiap tahap meliputi 6 posisi permukaan air. Untuk setiap posisi ketinggian permukaan air dilakukan 3x pengulangan, untuk pengukuran waktu (t), beda ketinggian permukaan raksa dari 2 lengan selang pada pipa I (Δh_{1j}), dan II (Δh_{2j}). Keseluruhan diperoleh 324 data awal, dan setelah

dirata-ratakan, diperoleh 108 data untuk menghitung laju air terkait. Olah data tidak terkait kondisi ketika aliran tepat berlangsung.

Terkait pertanyaan penelitian pertama maka diperoleh tabulasi hasil olah data laju air referensi 0 berbasis persamaan (1) untuk setiap posisi ketinggian permukaan air pada 3 pasangan diameter dan 2 kondisi pompa, seperti ditunjukkan tabel 1.

Tabel 1. Relasi ketinggian dengan laju air referensi 0 berbasis persamaan (1)

h_{oj} (cm)	v_{oj} (m/s) dengan kondisi pompa & pasangan diameter pipa						
	mati & (inchi-inchi)			hidup & (inchi-inchi)			
	$3/4-1/2$	$3/4-1$	$3/4-3/2$	$3/4-1/2$	$3/4-1$	$3/4-3/2$	
1	56	0,56	1,06	1,13	1,50	0,86	1,13
2	53	0,55	1,03	1,16	0,86	0,65	0,80
3	50	0,53	1,08	1,17	0,75	0,38	0,62
4	47	0,53	1,03	1,14	0,71	0,30	0,51
5	44	0,53	1,05	1,13	0,68	0,25	0,46
6	41	0,50	1,03	1,11	0,82	0,22	0,42

Fenomena eksplisit I dari tabel 1, ada tendensi: makin rendah posisi permukaan air, laju air referensi 0 makin kecil, pada 2 kondisi pompa dan 3 pasangan diameter. Ini berarti gerak air referensi 0 diperlambat.

Berbasis Hukum Newton II, dalam fenomena ini bekerja gaya gravitasi Bumi terhadap setiap molekul air

dalam bejana terbuka, gaya gesek kohesi dan adhesi, dan gaya luar akibat air jatuh ketika pompa hidup (penimbul torsi) sehingga timbul gerak rotasi molekul air (Tiwow, 2015). Gaya gravitasi bersifat mendukung, gaya gesek dan gaya luar bersifat menghambat. Gaya penghambat lebih besar dari gaya

pendukung maka gerak permukaan air diperlambat.

Kekentalan fluida mendefinisikan ukuran gaya gesek dalam fluida. Makin kental, makin sulit mengalir. Gaya gesek oleh kekentalan air adalah memperlambat (Khalimah, 2016). Pada suhu ruang, tetapan viskositas air $1 \times 10^{-3} Pa.s$ dan udara $1 \times 10^{-5} Pa.s$, sehingga gaya gesek dari kekentalan air dibanding udara tidak diabaikan. Menurut Poiseuille, makin kecil tetapan viskositas fluida, debit aliran makin besar. Kekentalan mengurangi laju fluida (Swartz, 1981).

Aliran turbulensi terjadi karena aliran laminar (efek gaya gravitasi dalam bejana terbuka) mengalami gangguan (efek air masuk ketika pompa hidup). Jika gangguan hilang dengan waktu, timbul aliran laminar, namun jika kontinyu (pompa hidup), memicu ketakstabilan (rotasi, osilasi, tumbukan) dan timbul aliran turbulen (Sulaiman, 2000). Air masuk ketika pompa hidup adalah menghambat dan menurunkan laju air referensi 0.

Fenomena eksplisit II dari **Tabel 1**, pada setiap posisi ketinggian permukaan air, laju air referensi 0 pada pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$

inchi terkecil, disusul $\frac{3}{4}$ inchi-1 inchi, dan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{3}{2}$ inchi terbesar. Fenomena ini berlaku untuk 2 kondisi pompa. Fakta pada pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi adalah profil sambungan pipa menyempit dimana air mengalir dari diameter besar ke kecil. Berbeda untuk pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi-1 inchi (melebar) dan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{3}{2}$ inchi (lebih-melebar). Fakta lain, profil ini ada pada bagian akhir sistem aliran dan air dalam sambungan pipa ada interaksi dengan air permukaan bejana terbuka. Penjelasan ini selaras kajian teori bahwa profil sambungan pipa menyempit bersifat menghambat gerak permukaan air.

Adanya saluran menyempit menyebabkan air secara kontinyu melawan gaya gesek dan tumbukan non-elastik oleh dinding pipa sehingga momentum air berkurang. Ketika momentum air tidak mampu mengatasi maka air terseparasi dari kontur aliran utama dan terbentuk arah aliran acak bahkan arah berlawanan (Saputra, 2016). Kondisi ini tentu mengurangi laju air referensi 1 dan 2, termasuk referensi 0. Hal berbeda bagi profil sambungan pipa

melebar dan lebih-melebar. Konsepsi ini didukung fakta bahwa laju permukaan air nihil jika alas bejana terbuka terhubung sambungan pipa profil menyempit kritis (diameter pipa II nihil).

Nilai rerata R^2 **Tabel 1** dari relasi v_{0j} pada 3 pasangan diameter dan 2 kondisi pompa terhadap h_{0j} adalah 0,58. 58% laju permukaan air dipengaruhi oleh perubahan posisi ketinggian permukaan air dan 42%

dipengaruhi oleh faktor lain. Pengaruh ini tampak dominan.

Terkait pertanyaan penelitian II, diperoleh: (i) Tabulasi hasil olah data laju air referensi 1 dan 2, masing-masing dengan persamaan (2) dan (3), pada 4 diameter pipa dan 2 kondisi pompa, seperti ditunjukkan **Tabel 2**; dan (ii) Tabulasi hasil olah data laju air referensi 1 dan 2, masing-masing dengan persamaan (4) dan (5) pada 4 diameter pipa dan 2 kondisi pompa, seperti diitunjukkan **Tabel 3**.

Tabel 2. Relasi h_{0j} dengan v_{1j} & v_{2j} , masing-masing berbasis persamaan (2) & (3)

j	h_{0j} (cm)	v_{1j} (m/s) atau v_{2j} (m/s) dengan pompa mati & ϕ pipa ($d= \dots$ inchi)			
		$1/2$	$3/4$	1	$3/2$
1	56	2,09	#NUM!*	2,60	2,78
2	53	2,01	#NUM!*	2,56	2,69
3	50	2,03	#NUM!*	2,50	2,92
4	47	1,88	#NUM!*	2,45	2,82
5	44	1,86	#NUM!*	2,34	2,71
6	41	1,80	#NUM!*	2,31	2,60

j	h_{0j} (cm)	v_{1j} (m/s) atau v_{2j} (m/s) dengan pompa hidup & ϕ pipa ($d= \dots$ inchi)			
		$1/2$	$3/4$	1	$1/2$
1	56	1,87	#NUM!*	2,52	2,72
2	53	1,71	#NUM!*	2,47	2,70
3	50	1,53	#NUM!*	2,40	2,76
4	47	1,32	#NUM!*	2,34	2,75
5	44	1,08	#NUM!*	2,31	2,65
6	41	0,76	#NUM!*	2,20	2,52

Keterangan:

*: rerata dari tiga rerata hasil pengukuran

Semua hasil perhitungan laju air referensi 1 berbasis persamaan (2), pada setiap posisi permukaan air dan setiap kondisi pompa, beberapa tampak berupa #NUM! baik ketika pompa mati dan hidup, seperti ditunjukkan **Tabel 2**. Hal serupa pada **Tabel 3** yaitu rerata hasil perhitungan laju air referensi 1 berbasis persamaan

(4) dengan diameter pipa $\frac{3}{4}$ inchi dan laju air referensi 2 berbasis persamaan (5) dengan diameter pipa $\frac{1}{2}$ inchi, ketika pompa hidup. Ini karena rerata hasil perhitungannya memuat hasil operasi aljabar berupa akar bilangan negatif. Ini tidak digunakan sebagai dasar analisa. Hal serupa pada **Tabel 4, 5, dan 6**.

Tabel 3. Relasi h_{0j} dengan v_{1j} & v_{2j} , masing-masing berbasis persamaan (4) & (5)

j	h_{0j} (cm)	v_{1j} (m/s) atau v_{2j} (m/s) dengan pompa mati & ϕ pipa ($d= \dots$ inchi)			
		$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{1}{2}$
1	56	2,39	1,47*	0,93	0,43
2	53	2,32	1,46*	0,91	0,43
3	50	2,30	1,24*	0,95	0,25
4	47	2,13	1,16*	0,88	0,24
5	44	2,23	1,19*	0,91	0,24
6	41	2,13	1,17*	0,86	0,25

j	h_{0j} (cm)	v_{1j} (m/s) atau v_{2j} (m/s) dengan pompa hidup & ϕ pipa ($d= \dots$ inchi)			
		$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{3}{2}$
1	56	#NUM!	#NUM!*	1,46	0,19
2	53	#NUM!	#NUM!*	1,36	0,16
3	50	#NUM!	#NUM!*	1,33	0,23
4	47	#NUM!	#NUM!*	1,28	0,08
5	44	#NUM!	#NUM!*	1,26	#NUM!
6	41	#NUM!	#NUM!*	1,21	#NUM!

Keterangan:

*: rerata dari tiga rerata hasil pengukuran

Fenomena eksplisit dari **Tabel 2** dan **3** adalah adanya tendensi laju air referensi 1 dan 2 menurun ketika posisi permukaan air makin rendah.

Fenomena ini terjadi pada 2 kondisi pompa, semua tipe diameter pipa dan semua tipe persamaan laju air referensi 1 dan 2. Dari azas usaha

energi dapat dijelaskan makin rendah posisi permukaan air memicu kondisi energi mekanik referensi 0 berkurang karena usaha negatif gaya penghambat pada permukaan air. Fenomena serupa dialami air dalam pipa I dan II. Pada referensi 1 dan 2, energi mekanik air adalah 100% berupa energi kinetik karena energi potensialnya nihil. Laju air adalah representasi energi kinetik. Secara tidak langsung makin rendah posisi permukaan air menyebabkan energi kinetik air referensi 1 dan 2 berkurang. Tampak juga efek kekasaran dinding pipa dan belokan sambungan pipa sehingga ada gaya gesek penurun laju air dalam pipa I dan II (Subagyo, 2012).

Nilai rerata R^2 **Tabel 2** dari relasi v_{1j} versi persamaan (2) atau v_{2j} versi persamaan (3) terhadap h_{0j} pada kedua kondisi pompa, khusus untuk enam data laju air yang dapat dihitung adalah 0,76. 76% laju air disepanjang sumbu pipa dipengaruhi oleh posisi ketinggian permukaan air. 24% dipengaruhi oleh faktor lain. Nilai rerata R^2 **Tabel 3** dari relasi v_{1j} versi persamaan (4) atau v_{2j} versi persamaan (5) terhadap h_{0j} pada ke-2

kondisi pompa, khusus untuk 5 data laju air terhitung adalah 0,73. 73% laju air disepanjang sumbu pipa dipengaruhi oleh posisi ketinggian permukaan air. 27% dipengaruhi oleh faktor lain. Dengan demikian rerata R^2 untuk relasi laju air disepanjang sumbu pipa versi persamaan (2), (3), (4), dan (5) terhadap posisi ketinggian permukaan air adalah 74,5%. Ini relasi tinggi antara laju air dalam pipa dengan posisi permukaan air. Laju air dalam pipa makin kecil ketika posisi permukaan air makin rendah. Fenomena ini mirip fenomena dinamika fluida dalam bejana terbuka, seperti dijelaskan dalil *Torricelli*, yaitu kuadrat laju air pada alas berlubang (bocor) sebanding tinggi permukaan air dalam bejana terbuka. Konsepsi ini identik dengan fenomena benda jatuh bebas diatas permukaan Bumi. Jika dikondisikan jatuh dari posisi makin rendah maka laju benda ketika tiba di permukaan Bumi juga makin kecil (Young, 2016.).

Terkait pertanyaan penelitian III, diperoleh: (i) Tabulasi hasil olah data laju air disepanjang sumbu pipa memakai persamaan (2) dan (3) padan

4 tipe diameter pipa dan 2 kondisi pompa, seperti ditunjukkan **Tabel 4**; dan (ii) Tabulasi hasil olah data laju air disepanjang sumbu pipa memakai persamaan (4) dan (5) pada 4 tipe diameter pipa dan 2 kondisi pompa, seperti ditunjukkan **Tabel 5**.

Fenomena eksplisit dari **Tabel 4** ketika posisi permukaan air tertentu tampak ada tendensi laju air referensi 2 makin tinggi terkait diameter pipa

makin besar. Kebalikan ditunjukkan oleh **Tabel 5**. Fenomena eksplisit dari **Tabel 4** dan **5** menunjukkan tendensi serupa untuk 2 kondisi pompa.

Hasil perhitungan laju air referensi 1 dari **Tabel 4** dan **5** tampak tidak dapat digunakan sebagai dasar analisa tendensi karena 75%-nya berupa akar bilangan negatif. Untuk itu analisa hanya memakai laju air referensi 2, terkait perbedaan diameter pipa II.

Tabel 4. Relasi perubahan d_1 atau d_2 terhadap laju air referensi 1 atau 2, berbasis persamaan (2) atau (3)

d_1 atau d_2 (inchi)	v_{1j} atau v_{2j} (m/s) dengan kondisi pompa mati dan h_{0j} (cm)					
	56	53	50	47	44	41
$\frac{1}{2}$	2,09	2,01	2,03	1,88	1,86	1,80
$\frac{3}{4}$	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*
1	2,60	2,56	2,50	2,45	2,34	2,31
$\frac{3}{2}$	2,78	2,69	2,92	2,82	2,71	2,60
d_1 atau d_2 (inchi)	v_{1j} atau v_{2j} (m/s) dengan kondisi pompa hidup dan h_{0j} (cm)					
	56	53	50	47	44	41
$\frac{1}{2}$	1,87	1,71	1,53	1,32	1,08	0,76
$\frac{3}{4}$	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*
1	2,52	2,47	2,40	2,34	2,31	2,20
$\frac{3}{2}$	2,72	2,70	2,76	2,75	2,65	2,52

Keterangan:

*: rerata dari tiga rerata hasil pengukuran;

Dilihat dari posisi pipa I dan II dalam susunan peralatan **Gambar 1** tampak posisi pipa berdiameter $\frac{1}{2}$ inchi, 1 inchi, dan

$\frac{3}{2}$ inchi selalu di akhir aliran ke-3 tipe pasangan diameter. Untuk pasangan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi membentuk profil sambungan menyempit, $\frac{3}{4}$

inchi-1 inchi melebar, dan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{3}{2}$ inchi lebih-melebar. Kajian menunjukkan efek hambatan profil sambungan menyempit lebih kuat dibanding melebar terhadap laju

fluida. Wajar terjadi fenomena laju air referensi 2 terkecil ketika diameter pipa $\frac{1}{2}$ inchi, lalu 1 inchi, dan terbesar $\frac{3}{2}$ inchi seperti ditunjukkan **Tabel 4**.

Tabel 5. Relasi perubahan d_1 atau d_2 terhadap laju air referensi 1 atau 2, berbasis persamaan (4) atau (5)

d_1 atau d_2 (inchi)	v_{1j} atau v_{2j} (m/s) dengan kondisi pompa mati dan h_{0j} (cm)					
	56	53	50	47	44	41
$\frac{1}{2}$	2,39	2,32	2,30	2,13	2,23	2,13
$\frac{3}{4}$	1,47*	1,46*	1,24*	1,16*	1,19*	1,17*
1	0,93	0,91	0,95	0,88	0,91	0,86
$\frac{3}{2}$	0,43	0,43	0,25	0,24	0,24	0,25
d_1 atau d_2 (inchi)	v_{1j} atau v_{2j} (m/s) dengan kondisi pompa hidup dan h_{0j} (cm)					
	56	53	50	47	44	41
$\frac{1}{2}$	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
$\frac{3}{4}$	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*	#NUM!*
1	2,60	2,41	2,36	2,28	2,25	2,34
$\frac{3}{2}$	0,75	0,65	0,92	0,31	#NUM!	#NUM!

Keterangan:

*: rerata dari tiga rerata hasil pengukuran

Dari kajian lain, persamaan (2) dan (3) adalah hasil perumusan tanpa dilandasi oleh penerapan persamaan kontinuitas. Perumusan laju air referensi 1 memakai pasangan titik referensi (0,1). Perumusan laju air referensi 2 memakai pasangan titik referensi (0,2). Dalam hal ini, ke-2 pasangan titik referensi ini berfungsi hanya sebagai tempat penerapan persamaan Bernoulli untuk merumuskan laju air referensi 1 dan

2. Perumusan persamaan (2) dan (3) sama sekali tidak mengkondisikan keterkaitan laju air referensi 1 dan 2, sehingga wajar dalam persamaan (2) dan (3) tidak memuat eksplisit besaran diameter baik dari pipa I maupun II. Persamaan (2) dan (3) seolah-olah tidak konsisten dengan konsep persamaan kontinuitas. yaitu laju fluida meningkat jika diameter pipa makin kecil.

Hal berbeda untuk perumusan persamaan (4) dan (5), masing-masing untuk laju air referensi 1 dan 2. Dasar perumusan persamaan (4) dan (5) adalah pasangan titik referensi (1,2). Pasangan titik referensi ini dipakai sebagai tempat penerapan persamaan kontinuitas dan Bernoulli. Kondisi ini mereposisi fenomena eksplisit dari **Tabel 4** ke **Tabel 5**, dimana laju air makin kecil ketika diameter pipa makin besar (Serway, 2018). Fenomena ini ditunjukkan **Tabel 5** ketika pompa mati. Hanya sebagian tendensi **Tabel 5** ketika kondisi pompa mati ditunjukkan **Tabel 5** ketika pompa hidup.

Nilai rerata R^2 **Tabel 4** dari relasi v_{2j} berbasis pada persamaan (3) terhadap d_2 untuk $d_2 = \frac{1}{2}$, 1, dan $\frac{3}{2}$ inchi adalah 0,94. 94% laju air dalam pipa II dipengaruhi oleh diameter pipa II. Ini berarti laju air referensi 2 makin besar jika diameter pipa II makin besar.

Nilai rerata R^2 **Tabel 5** dari relasi v_{1j} berbasis persamaan (4) terhadap d_1 atau d_2 atau relasi v_{2j} berbasis pada persamaan (5) terhadap d_1 atau d_2 khusus untuk pompa mati adalah 0,74. 74% laju air disepanjang sumbu

pipa I (pipa II) dipengaruhi diameter pipa I (pipa II). Berarti laju air referensi 1 (referensi 2) makin besar jika diameter pipa I (pipa II) makin kecil sesuai konsep persamaan kontinuitas.

Terkait pertanyaan penelitian III, maka diperoleh tabulasi hasil olah data laju air setiap titik referensi memakai persamaan (1) sampai dengan (5), seperti ditunjukkan **Tabel 6**. Pada setiap posisi referensi 0 tampak tendensi bahwa laju air referensi 0 berbasis persamaan (1) lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati untuk pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi, namun lebih kecil ketika pompa hidup dibanding mati untuk pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi-1 inchi dan $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{3}{2}$ inchi. Seperti telah disampaikan dalam pembahasan fenomena **Tabel 1** bahwa kondisi pompa hidup membangkitkan suatu torsi Akibatnya molekul-molekul air berotasi disamping bertranslasi karena efek gravitasi Bumi. Gerak rotasi menghambat gerak air dari bejana terbuka ke sambungan pipa. Dengan demikian laju air referensi 0 lebih kecil ketika pompa hidup dibanding

mati. Ada keadaan anomali terjadi pada pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi, yang perlu verifikasi lebih lanjut berbasis data eksperimen lebih luas.

Perubahan laju air referensi 0 setiap jarak tempuh 3 cm tampak lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati. Perlambatan juga tampak lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati. Jika merujuk pada konsep fluida non-ideal maka efek kekentalan air membangkitkan gaya gesek kohesi dan adhesi yang menghambat. Disisi lain efek air masuk membangkitkan situasi mirip gaya gesek dari efek kekentalan air. Ketika pompa mati, hambatan hanya dari efek kekentalan dan ketika pompa hidup, hambatan dari efek kekentalan dan air masuk.

Pada setiap posisi referensi 0, laju air referensi 2 berbasis persamaan (3) tampak lebih kecil ketika pompa hidup dibanding mati. Ini berlaku untuk setiap tipe diameter pipa II. Karena kondisi hasil perhitungan laju air referensi 1 berbasis persamaan (2) memuat *#NUM!* maka fenomena dari laju air referensi 1 ini tidak dianalisa.

Fenomena laju air referensi 2 terjadi karena ada hambatan tambahan efek air masuk, yang ditransmisikan pada air dalam pipa I dan II melalui mekanisme osilasi dan tumbukan. Ini tidak terjadi ketika pompa mati. Perubahan laju air referensi 2 berbasis persamaan (3) untuk setiap jarak tempuh referensi 0 3 cm tampak lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati. Karena kondisi hasil perhitungan laju air referensi 1 berbasis persamaan (2) memuat *#NUM!* maka laju air referensi 1 tidak bisa dianalisa. Fenomena laju air referensi 2 ini menunjukkan perubahan laju air referensi 2 dalam arah makin kecil dan lebih cepat ketika pompa hidup dibanding mati. Fenomena ini menegaskan kembali efek air masuk tidak hanya terjadi pada air dalam bejana terbuka, namun juga pada air pipa I dan II, sehingga laju air referensi 2 berbasis persamaan (3) mengalami perubahan lebih cepat ketika pompa hidup dibanding mati.

Tabel 6. Relasi kondisi pompa dengan laju air referensi 0, 1, dan 2 berbasis persamaan (1) sampai dengan (5)

j		v_{0j} (m/s) untuk pasangan ϕ_1 - ϕ_2 pipa (inchi-inchi) dan kondisi pompa melalui persamaan (1)							
h_{0j} (cm)	j	$\frac{3}{4}$ - $\frac{1}{2}$		$\frac{3}{4}$ -1		$\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{2}$		Mati	Hidup
		Mati	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Hidup		
1	56	0,56	1,50	1,06	0,86	1,13	1,13		
2	53	0,55	0,86	1,03	0,65	1,16	0,80		
3	50	0,53	0,75	1,08	0,38	1,17	0,62		
4	47	0,53	0,71	1,03	0,30	1,14	0,51		
5	44	0,53	0,68	1,05	0,25	1,13	0,46		
6	41	0,50	0,82	1,03	0,22	1,11	0,42		

j		v_{1j} atau v_{2j} (m/s) untuk ϕ pipa (inchi) dan kondisi pompa melalui persamaan (2) dan (3)							
h_{0j} (cm)	j	$\frac{1}{2}$		$\frac{3}{4}$		1		$\frac{3}{2}$	
		Mati	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Hidup
1	56	2,09	1,87	#NUM!*	#NUM!*	2,60	2,52	2,78	2,72
2	53	2,01	1,71	#NUM!*	#NUM!*	2,56	2,47	2,69	2,70
3	50	2,03	1,53	#NUM!*	#NUM!*	2,50	2,40	2,92	2,76
4	47	1,88	1,32	#NUM!*	#NUM!*	2,45	2,34	2,82	2,75
5	44	1,86	1,08	#NUM!*	#NUM!*	2,34	2,31	2,71	2,65
6	41	1,80	0,76	#NUM!*	#NUM!*	2,31	2,20	2,60	2,52

j		v_{1j} atau v_{2j} (m/s) untuk ϕ pipa (inchi) dan kondisi pompa melalui persamaan (4) dan (5)							
h_{0j} (cm)	j	$\frac{1}{2}$		$\frac{3}{4}$		1		$\frac{3}{2}$	
		Mati	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Hidup
1	56	2,39	#NUM!	1,47*	#NUM!*	0,93	1,46	0,43	0,19
2	53	2,32	#NUM!	1,46*	#NUM!*	0,91	1,36	0,43	0,16
3	50	2,30	#NUM!	1,24*	#NUM!*	0,95	1,33	0,25	0,23
4	47	2,13	#NUM!	1,16*	#NUM!*	0,88	1,28	0,24	0,08
5	44	2,23	#NUM!	1,19*	#NUM!*	0,91	1,26	0,24	#NUM!
6	41	2,13	#NUM!	1,17*	#NUM!*	0,86	1,21	0,25	#NUM!

Keterangan:

*: rerata dari tiga rerata hasil pengukuran;

Pada setiap posisi referensi 0, laju air referensi 2 berbasis persamaan (5) tampak mempunyai tendensi lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati untuk diameter 1inchi namun

lebih kecil untuk diameter $\frac{3}{2}$ inchi dan tidak bisa dianalisa untuk diameter $\frac{1}{2}$ inchi. Hal serupa untuk laju air referensi 1 berbasis persamaan (4) sehingga tidak dianalisa. Dengan

demikian terjadi 2 fenomena bertentangan akibat air masuk. Laju air referensi 2 berbasis persamaan (5) untuk diameter pipa 1 inchi tidak sesuai konsep dinamika fluida non-ideal namun untuk diameter pipa $\frac{3}{2}$ inchi sesuai konsep dinamika fluida non-ideal. Untuk itu perlu verifikasi lebih lanjut berbasis data eksperimen lebih luas untuk melihat keberlakuan konsep dalam fenomena oleh diameter pipa 1 inchi dimana efek air masuk mampu menambah laju gerak translasi molekul air. Fenomena laju air referensi 2 dalam pipa berdiameter $\frac{3}{2}$ inchi telah mengikuti konsep dinamika fluida non-ideal yaitu efek air masuk menghambat gerak translasi molekul air. Fenomena dalam pipa berdiameter $\frac{3}{2}$ inchi ini juga menegaskan efek air masuk dalam bejana terbuka telah ditransmisikan melalui mekanisme osilasi dan, atau tumbukan ke air dalam pipa II.

Perubahan laju air referensi 2 berbasis persamaan (5) untuk setiap jarak tempuh referensi 0 3 cm tampak lebih besar ketika pompa hidup dibanding mati. Ini terjadi pada diameter 1 inchi dan $\frac{3}{2}$ inchi. Pada

diameter $\frac{1}{2}$ inchi tidak bisa dianalisa. Hal serupa untuk kondisi laju air referensi 1 (diameter $\frac{3}{4}$ inchi) berbasis persamaan (4) sehingga laju ini juga tidak bisa dianalisa. Fenomena eksplisit laju air referensi 2 berbasis persamaan (5) ini menunjukkan tendensi serupa dengan laju air referensi 2 berbasis persamaan (3) dan laju air referensi 0 berbasis persamaan (1) yaitu laju air makin lama makin lebih kecil ketika pompa hidup dibanding mati. Efek air masuk pada bejana terbuka telah menginduksi air dalam pipa I dan II sehingga gerak sistem keseluruhan dipengaruhi oleh torsi pembangkit gerak rotasi molekul air.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Laju permukaan air makin kecil ketika posisi ketinggian permukaan air makin rendah pada setiap kondisi pompa dan setiap pasangan diameter pipa dengan rerata koefisien determinansi 58%;
2. Laju permukaan air pada setiap posisi ketinggian adalah terkecil ketika bejana terbuka terhubung

- pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi- $\frac{1}{2}$ inchi, disusul pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi-1 inchi, terbesar pasangan diameter $\frac{3}{4}$ inchi - $\frac{3}{2}$ inchi baik pada kondisi pipa mati dan hidup;
3. Laju air dalam pipa I dan II makin kecil ketika posisi permukaan air makin rendah pada setiap keadaan pompa, setiap tipe diameter pipa dan setiap tipe persamaan laju air dalam pipa I dan II;
 4. Rerata koefisien determinansi relasi antara laju air dalam pipa I dan II terhadap posisi ketinggian permukaan air ketika memakai persamaan (2) dan (3) adalah 76%, persamaan (4) dan (5) adalah 73%, dan rerata ke-4nya adalah 74,5%;
 5. Laju air dalam pipa II berbasis persamaan (3) pada setiap keadaan pompa dan setiap posisi permukaan air makin besar jika diameter pipa II makin besar, namun untuk laju air dalam pipa II berbasis persamaan (5) berlaku sebaliknya. Tendensi laju air dalam pipa I berbasis persamaan (2) & (4) tidak dianalisa.
 6. Rerata koefisien determinansi terhadap laju air dalam pipa II

oleh diameter pipa II ketika memakai persamaan (3) adalah 94% dan persamaan (5) adalah 74%.

7. Laju permukaan air dan laju air dalam pipa II, mayoritas lebih kecil ketika pompa hidup dibanding mati, dengan perubahan lebih besar per jarak tempuh permukaan air 3cm. Tendensi laju air dalam pipa I tidak dianalisa.

Saran

Perlu dilakukan pengambilan data eksperimen lebih luas terkait hasil pengukuran laju air berupa *#NUM!* dan anomali terhadap konsep dinamika fluida ideal dan non ideal.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada pihak UPPM POLBAN yang telah memfasilitasi pendanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, D. F., Prastowo, S. H. B., & Astutik, S. (2018). Kajian Dinamika Fluida pada Aliran Air Terjun Tancak Kembar Bondowoso sebagai Rancangan Handout Fisika. *FKIP e-PROCEEDING*, 3(1), 56-62.
<https://jurnal.unej.ac.id/index.php/fkip-e-pro/article/view/7371>

- Diby, S. (2002). Perhitungan Laju Penguapan Air Kolam Pendingin Reaktor RSG-Gas. Prosiding Seminar Ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, 234–244. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/37/092/37092492.pdf>
- Fathiah, F., Kaniawati, I., & Utari, S. (2015). Analisis didaktik pembelajaran yang dapat meningkatkan korelasi antara pemahaman konsep dan kemampuan pemecahan masalah siswa SMA pada materi fluida dinamis. *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, 1(1), 111-118. <http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/jpppf/article/view/42>
- Giancoli, D. C. (2016). *Physics: Principles with Applications* (7th Ed.). Pearson Education Limited.
- Irfandi, M. (2020). Analisis Pengaruh Arus Dan Laju Aliran Gas Pada Proses Flux Cored Arc Welding (FCAW) Terhadap Sturuktur Mikro dan Kekerasan Material AISI 1018. [Institut Teknologi Kalimantan]. <http://repository.itk.ac.id/201/>
- Khalimah, D. A. (2016). Analisa Aliran Tak Tunak Konveksi Paksa Fluida Kental Magnetohidrodinamik (MHD) [Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya]. <http://repository.its.ac.id/1237/2/1214201037-Master Thesis.pdf>
- Musnal, A. (2014). Perhitungan Laju Aliran Fluida Kritis Untuk Mempertahankan Tekanan Reservoir Pada Sumur Ratu Di Lapangan Kinantan. *Journal of Earth Energy Engineering*, 3(1), 1-8. <https://journal.uir.ac.id/index.php/JEEE/article/view/934>
- Pribadi, D. T. (2018). Rancangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Menggunakan Pompa Hidram untuk Kebutuhan Rumah Tangga [Universitas Sumatera Utara Medan]. <http://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/14492>
- Raharjo, S. (2017). Makna Koefisien Determinasi (R Square) dalam Analisis Regresi Linier Berganda. *SPSS Indonesia: Olah Data Statistik dengan SPSS*. <https://www.spssindonesia.com/2017/04/makna-koefisien-determinasi-r-square.html>
- Rasagama, I. G. (2011). Pengembangan Program Perkuliahan Fisika untuk Meningkatkan Kemampuan Menganalisis dan Mengkreasi Mahasiswa Teknik Konversi Energi Politeknik [Universitas Pendidikan Indonesia]. <http://repository.upi.edu/id/eprint/7563>
- Rasagama, I. G. (2020). Menerapkan Konsep Versi Anderson Untuk Merumuskan Persamaan Laju Aliran Representatif Dalam Desain Peralatan Praktikum Dinamika Fluida Sederhana (Studi Awal Pengembangan Modul Praktikum Persamaan Bernoulli Untuk Mahasiswa Politeknik Negeri Bandung). *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Tadulako Online (JPFT)*, 8(2), 1–10.

- <http://jurnal.untad.ac.id/jurnal/index.php/EPFT/article/view/16306>
- Rasagama, I. G., Muldiani, R. F., & Hadniningrum, K. (2016). Keterpakaian Konsep Hukum Bernoulli Dan Desain Eksperimennya Di Dalam Fisika Terapan Prodi Rekayasa Polban. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016*, 29–34. <http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/prosidingsnf/article/view/4027>
- Saputra, G. D. (2016). Studi Numerik Aliran Melalui Square Duct Dan Square Elbow 90 Derajat Dengan Double Guide Vane Pada Variasi Sudut Buka dan Damper [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <http://repository.its.ac.id/75893/>
- Saputra, M. R. R. (2017). Pengukuran Laju Aliran. <https://www.slideshare.net/MuhamadRioRizkySapu/pengukuran-laju-aliran>
- Serway, R. A. & Vuille, Ch. (2018). *College Physics*. (11th Ed.). Cengage Unlimited.
- Subagyo, R. (2012). Kaji Eksperimental Koefisien Kerugian Pada Percabangan Pipa Dengan Sudut 450, 600 dan 900. *Jurnal Fisika FLUX*, 9(2), 144–150. <https://ppjp.ulm.ac.id/journal/index.php/f/article/view/6100>
- Suharto. (1991). *Dinamika dan Mekanika: Untuk Perguruan Tinggi* (Edisi Ke-1). Rineka Cipta.
- Sulaiman, A. (2000). *Turbulensi Laut Banda (Studi Pendahuluan ARLINDO Microstructure)* (Edisi Ke-1). Direktorat Teknologi Inventarisasi Sumberdaya Alam BPPT.
- Swartz, E. C. (1981). *Phenomenal Physics*. (First Ed.) Jhon Wiley & Sons.
- Tiwow, V. A. (2015). Analisis Aliran Fluida Newtonian Pada Pipa Tidak Horizontal. *Jurnal Sains Dan Pendidikan Fisika*, 11(1), 104–108. <https://ojs.unm.ac.id/index.php/JSdPF/article/view/1473>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2016). *University Physics with Modern Physics* (14th Ed.). Pearson Education Limited.