

PERCOBAAN *GRAVITY CURRENT* UNTUK MENGUJI KONSEP HIDRODINAMIKA DAN HUKUM KEKALKAN MASSA PADA FLUIDA INKOMPRESIBEL

EXPERIMENTS ON GRAVITY CURRENT TO EXAMINE CONCEPTS OF HYDRODYNAMICS AND MASS CONSERVATION FOR INCOMPRESSIBLE FLUIDS

T. Prastowo^{1, 2*}, T. N. Ain³

¹Program Studi Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

²Pusat Studi Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

³Program Studi Magister Pengajaran Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Diterima: 14 September 2014. Disetujui: 20 Oktober 2014. Dipublikasikan: Januari 2015

Abstrak

Konsep hidrodinamika membicarakan sistem fisis berupa fluida yang mengalir. Fenomena alam yang berkaitan dengan konsep hidrodinamika adalah penetrasi air laut ke daratan dan limbah aliran sungai ke pantai pada arah yang berlawanan di estuari (tempat pertemuan antara air laut dan air sungai). Fenomena ini dapat dipelajari melalui percobaan *gravity current* di laboratorium sebagai sistem dua fluida dengan beda kerapatan. Tujuan penelitian adalah membuktikan perbedaan kerapatan sebagai gaya penggerak internal sistem tersebut dan keberlakuan kekekalan massa pada fluida inkompresibel (tidak mampu mampat). Serangkaian percobaan dilakukan dengan variasi perbedaan kerapatan dan ketinggian permukaan air dalam tangki. Hasil-hasil percobaan menunjukkan bahwa perbedaan kerapatan merupakan penyebab gerak sistem. Kecepatan tak-berdimensi *gravity current* dalam percobaan ditemukan sebesar $0,45 \pm 0,02$ menunjukkan pengaruh friksi adalah kecil sepanjang perambatan *gravity current* dalam tangki. Perubahan volume terukur relatif terhadap volume awal hanya 0,4% menunjukkan volume dan massa sistem adalah kekal sesuai dengan teori fisika untuk fluida inkompresibel.

Abstract

The concept of hydrodynamics involves moving fluids. Relevant natural phenomena are seawater intruding to the land and a river discharge flowing to the ocean in the opposite direction in estuaries. These can be examined using laboratory experiments on gravity current as a system of two fluids of different densities. The aims of this research are to prove that the density difference is internal driving force for the current and that mass is conserved for incompressible fluids. A number of runs were performed by varying the density difference and the surface height in the reservoirs. The results show that the density difference is a source for the horizontal motion of the current. The non-dimensional current speed is $0,45 \pm 0,02$ implying that friction is small along the propagation of the current. In all runs, a small fraction of only 0,4% is accounted for the change in water volume indicating that volume and mass are conserved for incompressible fluids.

© 2015 Jurusan Fisika FMIPA UNNES Semarang

Keywords: gravity current; internal driving force; incompressible fluids

*Alamat Korespondensi:
Kampus Unesa Ketintang, Surabaya 60231
E-mail: t_prastowo@yahoo.com

PENDAHULUAN

Konsep fisika berkembang melalui perluasan teori dan percobaan pembuktian di laboratorium. Perubahan konsep (*conceptual change*) dari konsep lama menjadi konsep baru yang benar bisa saja terjadi bila terdapat fakta ilmiah hasil percobaan di laboratorium yang sesuai dengan perluasan teori. Salah satu strategi efektif agar terjadi *conceptual change* adalah dengan memberikan fakta ilmiah yang bertentangan dengan konsep awal yang dimiliki dan dikenal sebagai *cognitive conflict strategy* (Dreyfus, 1990; Kang *et al.*, 2010). Strategi ini dilakukan dengan percobaan fisika di laboratorium atau simulasi percobaan fisika di kelas untuk menjelaskan gejala fisis atau fenomena alam yang sulit diamati secara langsung (Conceri *et al.*, 2006; Prastowo, 2010; Budianto *et al.*, 2013). Konsep baru yang benar tidak harus benar-benar baru, namun merupakan pengembangan pemahaman konsep yang diterapkan untuk menjelaskan masalah fisika yang diperluas melalui muatan materi ajar dan metode pengajaran (Abdullah, 2009).

Dua pendekatan pengembangan pemahaman konsep fisika dalam penelitian ini adalah reorientasi dan revitalisasi pengajaran fisika di universitas. Reorientasi adalah tinjauan ulang arah pengajaran fisika yang disampaikan tidak saja melalui diskusi teori fisika di kelas, melainkan juga melalui percobaan fisika di laboratorium yang direkam dalam bentuk foto dan video percobaan. Revitalisasi adalah tinjauan ulang substansi materi fisika yang bertujuan untuk mencari relevansi antara materi pengajaran fisika dan masalah nyata sehari-hari. Kedua pendekatan tersebut ditempuh untuk menumbuhkembangkan sikap-sikap positif individu mahasiswa dalam bentuk kemampuan berpikir kritis, logis dan kreatif serta bersikap adaptif dalam kehidupan sosial (Sutrisno, 2009).

Kedua pendekatan pengembangan pemahaman konsep fisika tersebut di atas diterapkan untuk menyelesaikan masalah hidrodinamika sistem dua fluida. Masalah hidrodinamika sistem dua fluida yang melibatkan

internal driving force berupa beda kerapatan dua fluida menyimpan potensi miskonsepsi yang bisa terjadi bila mahasiswa tidak mendapatkan penjelasan yang komprehensif. Oleh karena itu, peneliti melaksanakan serangkaian percobaan *gravity current* di laboratorium untuk memahami faktor-faktor dinamik yang berperan sebagai gaya penggerak internal sistem dua fluida.

Jalannya percobaan di laboratorium didokumentasikan dalam bentuk foto dan video percobaan untuk divisualisasikan dalam perkuliahan. Melalui demonstrasi foto dan video percobaan serta pembahasan teori fisika terkait (hidrodinamika), pemahaman konsep fisika mahasiswa tentang perbedaan tekanan sebagai penyebab gerak fluida yang selama ini disampaikan berasal dari perbedaan ketinggian saja dalam penelitian ini dideduksikan juga bisa berasal dari perbedaan kerapatan massa untuk kasus sistem dua fluida. Sistem fisis ini bisa ditemui di alam dalam bentuk intrusi air laut dan limbah aliran air sungai ke laut yang bisa menimbulkan masalah lingkungan berupa penurunan kualitas air sungai sebagai bahan baku air minum dan pencemaran ekosistem di pantai.

Kajian teori dalam penelitian ini adalah dinamika fluida sebagai sistem fisis kontinu yang dipelajari melalui seperangkat persamaan yang biasa disebut dengan *a set of governing equations*. yang terdiri atas tiga persamaan dasar, yaitu: persamaan Navier-Stokes, persamaan kontinuitas, dan persamaan keadaan (Cushman-Roisin & Beckers, 2009). Persamaan Navier-Stokes merupakan analogi hukum Newton untuk sistem fisis rigid. Persamaan Navier-Stokes dalam sistem koordinat kartesius 3D dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_o \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p - \rho' \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

dengan ρ_o adalah kerapatan fluida referensi, \mathbf{u} adalah kecepatan fluida, p adalah tekanan fluida, ρ' adalah variasi kerapatan fluida, \mathbf{g} adalah percepatan gravitasi, dan μ adalah viskositas dinamik fluida.

Persamaan momentum (1) tersebut dapat diuraikan menjadi komponen horisontal dan vertikal. Komponen vertikal persamaan (1) sering

disebut sebagai persamaan hidrostatik dan dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (2)$$

dengan ρ menyatakan kerapatan massa fluida. Dalam konteks sains oseanografi, persamaan (2) dibaca sebagai tekanan bertambah seiring dengan bertambahnya kedalaman suatu titik di bawah permukaan laut.

Untuk fluida cair yang ditempatkan dalam suatu wadah terbuka, integral persamaan (2) terhadap variabel z menghasilkan bentuk

$$p = p_o + \rho gh \quad (3)$$

dengan p_o merupakan tekanan udara luar sebesar $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan p adalah tekanan hidrostatik total suatu titik pada kedalaman h di bawah permukaan zat cair yang memiliki kerapatan massa ρ . Persamaan (3) tidak saja berlaku untuk fluida cair tunggal dengan kerapatan tertentu, melainkan juga berlaku untuk sistem dua fluida cair yang memiliki beda kerapatan. Untuk sistem dua fluida cair, persamaan (3) memberi pemahaman baru tentang peran perbedaan kerapatan massa fluida sebagai gaya penggerak internal. Peran tersebut muncul sebagai tambahan bagi gaya penggerak eksternal. Bentuk lengkap persamaan gaya penggerak sistem dua fluida yang diturunkan dari persamaan (3) adalah sebagai berikut:

$$\Delta p = \rho g \Delta h + gh \Delta \rho \quad (4)$$

dengan Δp menyatakan perbedaan tekanan hidrostatik dua titik, $\Delta \rho$ menyatakan perbedaan kerapatan massa dua fluida, dan Δh menyatakan perbedaan kedalaman dua titik.

Bila posisi dua buah titik ternyata terletak pada kedalaman yang sama diukur dari permukaan sebagai acuan, atau bila sistem dua fluida tersebut ditempatkan dalam tangki horisontal dengan dasar tangki sebagai acuan, maka berlaku $\Delta h = 0$ (ketiadaan perbedaan tinggi menyebabkan ketiadaan gaya penggerak eksternal). Dengan demikian, persamaan (4) berubah menjadi

$$\Delta p = gh \Delta \rho \quad (5)$$

yang menceritakan bahwa perbedaan tekanan horisontal sebagai gaya penggerak fluida cair dipicu oleh perbedaan kerapatan massa dua fluida (aliran *baroclinic*).

Persamaan berikutnya yang mendeskripsikan gerak fluida adalah persamaan kontinuitas yang menceritakan hukum kekekalan massa dalam bentuk

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

Untuk fluida cair inkompresibel, diasumsikan bahwa tidak ada perubahan kerapatan massa (tidak ada variasi spasial dan temporal) sepanjang lintasan gerak, atau berlaku $\frac{d\rho}{dt} = 0$. Dengan demikian, persamaan (6) berubah menjadi

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

Persamaan ke tiga yang mendeskripsikan gerak fluida adalah persamaan keadaan atau sering juga disebut sebagai persamaan kerapatan massa. Dengan mengadopsi rumusan yang diberikan oleh Gill (1982) dan Prastowo (2008), maka persamaan keadaan dituliskan sebagai

$$\rho = \rho_o \{1 - \alpha(T - T_o) + \beta(S - S_o)\} \quad (8)$$

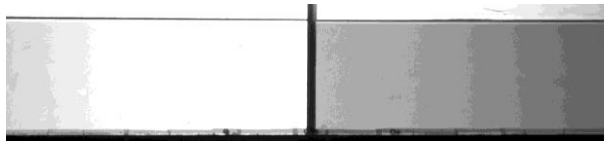
dengan ρ_o adalah kerapatan air tawar ($0,998234 \text{ g/cm}^3$) pada temperatur $T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ dan salinitas $S_o = 35$ sebagai kerapatan referensi, α adalah koefisien ekspansi termal ($1,7 \times 10^{-4}/\text{K}$) dan β adalah koefisien kontraksi salinitas ($7,1 \times 10^{-4}$).

Tujuan penelitian ini adalah membuktikan validitas persamaan (5) yang secara eksplisit menceritakan peran perbedaan kerapatan sebagai gaya penggerak internal sistem dua fluida yang ditempatkan dalam tangki horisontal di laboratorium. Pembuktian dilakukan dengan serangkaian percobaan *gravity current*. Hipotesa penelitian ini adalah semakin besar perbedaan kerapatan massa, maka semakin besar perbedaan tekanan horisontal yang memicu gerak horisontal sistem dua fluida dan dengan demikian semakin besar pula kecepatan gerak sistem dua fluida tersebut. Selain itu, validitas persamaan (6) dan (7) yang menceritakan kekekalan massa dan volume fluida inkompresibel dalam penelitian ini dapat dibuktikan melalui pengukuran akurat ketinggian permukaan dua fluida sebelum dan sesudah percobaan *gravity current* dilaksanakan.

METODE

Percobaan *gravity current* dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Dasar, Instrumentasi dan

Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA Unesa dengan memanfaatkan dua tangki air berukuran panjang 200 cm, lebar 10 cm dan 20 cm. Mengadopsi metode Simpson (1997) dan Prastowo (2010), tangki air tersebut diisi air tawar sampai kedalaman 10 cm atau 20 cm sesuai dengan kebutuhan. Sesudah sekat kedap air sebagai pembatas dimasukkan pada bagian tengah tangki, kemudian sejumlah garam ditambahkan ke dalam salah satu reservoir. Setelah pengadukan sampai merata, maka terbentuklah reservoir air tawar dan reservoir larutan garam berisi air tawar dan larutan garam dengan kedalaman yang sama. Gambar 1 menunjukkan keadaan awal percobaan *gravity current* dengan fluida sebelah kiri sekat adalah air tawar (terang) dan fluida sebelah kanan sekat adalah larutan garam (gelap) yang membentuk sistem dua fluida dengan beda kerapatan.



Gambar 1. Sistem fisis reservoir air tawar (kiri) dan reservoir larutan garam (kanan) dalam tangki.

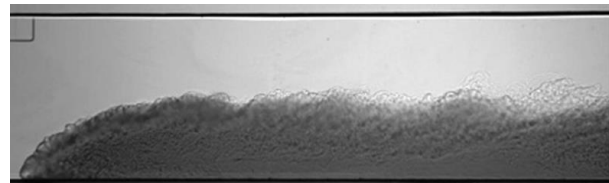
Ketinggian permukaan air dalam percobaan diukur dari dasar tangki sebagai posisi acuan dengan *digital micrometer gauge* yang memiliki ketelitian 0,01 mm, sedangkan kerapatan fluida diukur dengan hidrometer dengan ketelitian $0,0001 \text{ g/cm}^3$ pada 27°C . *Digital stopwatch* dengan ketelitian 0,01 s digunakan untuk mengukur *travel time* dari sekat sampai ujung dinding kiri tangki. *Digital still camera* tipe DSLR dan *video camera* 14,2 mega pixel digunakan untuk pengambilan foto dan video percobaan selama percobaan *gravity current* di laboratorium berlangsung.

Percobaan *gravity current* dimulai dengan menarik keluar sekat pembatas dari dalam tangki air, sehingga *gravity current* terbentuk dan merambat sepanjang dasar tangki. Percobaan dihentikan ketika *gravity current* telah sampai pada ujung dinding kiri tangki dengan cara memasukkan kembali sekat ke dalam tangki air. Variasi percobaan dilakukan dengan mengubah perbedaan kerapatan antara air tawar dan larutan

garam $\Delta\rho/\rho_0$ (1%, 3% dan 5%), dengan ρ_0 adalah kerapatan air tawar pada temperatur ruang percobaan di Laboratorium Elektronika Dasar, Instrumentasi dan Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA Unesa sebesar $0,9978 \text{ g/cm}^3$, beda kerapatan $\Delta\rho$ didefinisikan sebagai $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ dengan ρ_2 dan ρ_1 menyatakan kerapatan larutan garam dan air tawar, dan ketinggian permukaan fluida H (10 cm dan 20 cm). Variasi nilai $\Delta\rho/\rho_0$ dan H serta lebar tangki dilakukan dalam percobaan untuk menguji pengaruh perubahan variabel dinamik dan geometri tangki terhadap gaya penggerak internal sistem dua fluida.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini fokus pada dinamika sistem dua fluida yang memiliki beda kerapatan. Persamaan gerak fluida seperti diberikan oleh persamaan (4) menceritakan bahwa fluida hanya bisa mengalir bila ada perbedaan tekanan sebagai gaya gerak (*driving force*) yang mendorong fluida ke arah tertentu. Perbedaan tekanan bisa berasal dari faktor eksternal berupa perbedaan tinggi kolom fluida Δh atau faktor internal berupa perbedaan kerapatan fluida $\Delta\rho$ (untuk sistem fisis dua fluida). Penelitian ini membahas peran perbedaan kerapatan dalam dinamika sistem dua fluida yang memiliki ketinggian permukaan yang sama diukur dari dasar tangki horisontal. Data kualitatif dalam penelitian ini diperoleh melalui dokumentasi foto dan rekaman video percobaan. Gambar 2 menunjukkan foto *gravity current*, di mana larutan garam (warna gelap) dengan kerapatan 3% lebih tinggi dari kerapatan air tawar (warna terang) bergerak sepanjang dasar tangki.



Gambar 2. Perambatan *gravity current* yang terbentuk dari larutan garam dan air tawar.

Rekaman video semua percobaan (9 kasus berbeda) menunjukkan gejala fisis yang

sama, yaitu perambatan *gravity current* sebagai sistem dua fluida dikontrol secara internal oleh perbedaan kerapatan dua fluida (Simpson, 1997; Prastowo, 2009). Untuk semua percobaan, kecepatan gerak *gravity current* secara visual teramati dan terukur berbeda untuk variasi perbedaan kerapatan dan tinggi permukaan air. Bila tidak terdapat beda tinggi antara permukaan larutan garam dan air tawar pada saat awal percobaan ($\Delta h = 0$), maka faktor utama pemicu gerak horisontal sistem tersebut adalah beda kerapatan $\Delta\rho$. Situasi seperti itu dapat dijumpai dalam bentuk pertemuan antara air laut dan air sungai di estuari, atau dikenal sebagai intrusi air laut ke daratan dan limbah air sungai ke laut. Dengan demikian, percobaan *gravity current* dalam skala laboratorium dapat juga dipandang sebagai pemodelan proses intrusi air laut yang menekankan aspek dinamik penyebab gerak sistem dua fluida (Prastowo, 2010; Budianto *et al.*, 2013).

Konsep tekanan hidrostatik dalam pengajaran fisika di sekolah dan di universitas merupakan persamaan umum hidrostatik (2) yang diturunkan dari komponen vertikal persamaan momentum pada persamaan (1). Dalam pembelajaran di kelas, tekanan hidrostatik didefinisikan sebagai tekanan suatu titik pada kedalaman tertentu di bawah permukaan zat cair yang diam. Masalah umum yang dibahas dan sering dijadikan contoh dalam diskusi kelas adalah fluida cair tunggal yang memiliki kerapatan tertentu. Tekanan hidrostatik dimasukkan sebagai bagian dari topik bahasan fluida statis dan tidak dibahas dalam konteks sistem dua fluida cair yang mengalir (hidrodinamika). Potensi miskonsepsi pada konsep tekanan hidrostatik adalah variabel dinamik pada persamaan (3) hanyalah h . Pada kasus sistem fluida tunggal, persamaan (3) sering didefinisikan sebagai kebergantungan tekanan hidrostatik pada kedalaman.

Secara empiris, sumber utama penyebab gerak horisontal sistem dua fluida yang memiliki beda kerapatan dan ditempatkan dalam wadah horisontal adalah perbedaan kerapatan dua fluida tersebut. Hal ini berarti bahwa secara teoretis persamaan (3) harus dibaca dengan lebih teliti dan

dalam lagi, yaitu variabel dinamik pada persamaan (3) bukan hanya h melainkan juga ρ . Aplikasi persamaan (3) bergantung pada sistem fisis yang dimaksud merupakan sistem fluida tunggal atau sistem dua fluida. Untuk sistem fluida tunggal yang memiliki kerapatan tertentu, maka gaya gerak sistem ditentukan oleh perbedaan tinggi kolom fluida sehingga persamaan (3) menjadi

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad (9)$$

Persamaan (9) bertanggung jawab pada aliran air dari ketinggian tertentu di atas permukaan tanah, baik melalui saluran alam seperti sungai, parit, atau celah batuan di perbukitan maupun melalui saluran buatan, misalnya kanal pembuangan air dengan kemiringan tertentu.

Meskipun efektif untuk menjelaskan beberapa gejala fisika, namun persamaan (9) tersebut tidak dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena alam angin laut pada siang hari dan angin darat pada malam hari. Pada kedua kasus tersebut, aliran udara baik pada siang maupun malam hari terjadi karena ada perbedaan tekanan horisontal yang disebabkan oleh perbedaan kerapatan molekul-molekul udara di atas permukaan tanah daratan dan permukaan laut. Perbedaan kerapatan di atas permukaan daratan dan permukaan laut bisa terjadi karena ada perbedaan kemampuan menyimpan panas antara tanah daratan dan permukaan laut.

Pada kasus sistem dua fluida yang memiliki beda kerapatan dan menjadi tema sentral dalam penelitian ini, peran penting persamaan (5) dalam memberikan penjelasan logis gerak horisontal sistem dua fluida dengan beda kerapatan sangatlah vital. Peran foto dan video percobaan fisika sebagai media dalam pengajaran fisika tidak lagi bisa diabaikan, khususnya untuk menjelaskan gejala alam yang tidak diakomodasi oleh persamaan matematis yang biasa diajarkan di ruang kelas. Pada titik inilah terdapat perbedaan mendasar antara penelitian ini dengan penelitian Muslim & Suhandi (2012) yang lebih menekankan pada aspek pengembangan perangkat pembelajaran untuk meningkatkan pemahaman konsep fisika.

Tabel 1 berikut memberikan data hasil percobaan *gravity current*. Untuk mempermudah pemahaman, maka peneliti fokus pada dua temuan, yaitu: (1) temuan seri percobaan 1, 2 dan 3 ketika dibandingkan dengan seri percobaan 4, 5 dan 6; dan (2) temuan seri

percobaan 4, 5 dan 6 ketika dibandingkan dengan seri percobaan 7, 8 dan 9. Temuan-temuan tersebut dibahas secara rinci dan terpisah dalam dua kelompok bahasan.

Tabel 1. Hasil percobaan *gravity current* dengan variasi beda kerapatan dan tinggi permukaan air.

No	ρ_o (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	$\Delta\rho/\rho_o$ (%)	H (cm)	L (cm)	t (s)	U (cm/s)
1	0,9978	1,0072	1,0	10	20	23,02	4,34
2	0,9978	1,0273	3,0	10	20	13,15	7,60
3	0,9978	1,0464	5,0	10	20	9,90	10,10
4	0,9978	1,0084	1,0	10	10	23,86	4,35
5	0,9978	1,0278	3,0	10	10	13,58	7,64
6	0,9978	1,0472	5,0	10	10	10,24	10,13
7	0,9978	1,0070	1,0	20	10	16,63	6,24
8	0,9978	1,0276	3,0	20	10	9,57	10,84
9	0,9978	1,0468	5,0	20	10	7,19	14,42

Kelompok bahasan pertama adalah seri percobaan dengan menggunakan lebar tangki L yang berbeda, yaitu $L = 20$ cm untuk percobaan 1, 2 dan 3, dan $L = 10$ cm untuk percobaan 4, 5 dan 6. Semua percobaan memiliki tinggi permukaan air yang sama, yaitu $H = 10$ cm. Terlihat dari hasil-hasil pasangan percobaan dengan kondisi awal yang sama, yaitu percobaan 1 dan 4 ($\Delta\rho/\rho_o = 1\%$), percobaan 2 dan 5 ($\Delta\rho/\rho_o = 3\%$), dan percobaan 3 dan 6 ($\Delta\rho/\rho_o = 5\%$), masing-masing pasangan memiliki kecepatan teramati U yang tidak berbeda secara signifikan dalam batas-batas estimasi ketakpastian kecepatan *gravity current* ($\pm 0,05$ cm/s) berdasarkan pengukuran waktu tempuh. Hal ini berarti perubahan lebar tangki air dari $L = 20$ cm menjadi $L = 10$ cm tidak memberikan pengaruh signifikan pada kecepatan *gravity current*. Alih-alih lebar tangki air, perubahan variabel $\Delta\rho/\rho_o$ (1%, 3% dan 5%) pada seri percobaan 1, 2 dan 3 dan seri percobaan 4, 5 dan 6 jelas memberikan efek dinamik berupa kecepatan *gravity current* yang semakin besar. Temuan ini sesuai dengan hipotesa penelitian yang meramalkan adanya korelasi positif antara

perbedaan kerapatan massa dua fluida dan kecepatan gerak *gravity current*. Hal yang sama juga dilaporkan oleh Prastowo (2009; 2010) dan Wardani *et al.* (2013) melalui persamaan yang mendeskripsikan kecepatan propagasi *gravity current* dalam skala laboratorium.

Kelompok bahasan ke dua adalah seri percobaan dengan menggunakan ketinggian air H yang berbeda, yaitu $H = 10$ cm untuk percobaan 4, 5 dan 6, dan $H = 20$ cm untuk percobaan 7, 8 dan 9. Semua seri percobaan dalam kelompok ini memanfaatkan tangki dengan lebar $L = 10$ cm. Percobaan dengan kondisi awal yang sama, yaitu pasangan percobaan 4 dan 7 ($\Delta\rho/\rho_o = 1\%$), pasangan percobaan 5 dan 8 ($\Delta\rho/\rho_o = 3\%$), dan pasangan percobaan 6 dan 9 ($\Delta\rho/\rho_o = 5\%$) menunjukkan kecepatan teramati U yang berbeda signifikan dalam batas estimasi ketakpastian kecepatan rambat *gravity current* ($\pm 0,05$ cm/s). Hal ini berarti tinggi permukaan air pada saat awal memberikan pengaruh pada kecepatan *gravity current*. Semakin tinggi permukaan air, maka semakin cepat pula *gravity current* merambat. Rumusan matematis yang menggambarkan

hubungan kualitatif antara tinggi permukaan air dan kecepatan *gravity current* telah dilaporkan oleh Wardani *et al.* (2013). Semua percobaan pada Tabel 1 membuktikan bahwa faktor utama pemicu gerak *gravity current* adalah perbedaan kerapatan. Untuk semua kasus yang ditinjau, semakin besar perbedaan kerapatan dua fluida maka semakin besar pula kecepatan *gravity current*. Hasil-hasil percobaan pada Tabel 1 membuktikan bahwa hipotesa penelitian adalah benar.

Berdasarkan data pada Tabel 1, peneliti menghitung besaran kecepatan teoretik *gravity current* yang didefinisikan sebagai $\sqrt{g'H}$ (untuk membedakan dengan kecepatan teramati *gravity current* U) dan kecepatan tak-berdimensi *gravity current* yang didefinisikan sebagai $U/\sqrt{g'H}$ (lihat Tabel 2). Untuk semua seri percobaan, diperoleh

kecepatan rata-rata tak berdimensi *gravity current* adalah $0,45 \pm 0,02$, tidak berbeda signifikan dengan temuan terdahulu, yaitu $0,48 \pm 0,02$ (Prastowo, 2009), $0,44 \pm 0,03$ (Budianto *et al.*, 2013), dan $0,45 \pm 0,03$ (Wardani *et al.*, 2013). Kecepatan tak berdimensi *gravity current* yang bernilai kurang dari setengah menunjukkan bahwa dalam proses perambatan sepanjang dasar tangki ada sebagian energi mekanik yang hilang karena *turbulent dissipation* akibat *mixing* dan friksi sepanjang dasar tangki (Simpson, 1997; Prastowo, 2008; Prastowo 2009). Temuan ini memberikan dukungan empiris pada teori fisika hukum kekekalan energi mekanik yang hanya berlaku untuk situasi dan kondisi ideal tanpa ada friksi selama gerak atau hal lain yang menjadi penyebab hilangnya sebagian energi.

Tabel 2. Hasil perhitungan kecepatan tak berdimensi *gravity current* dari semua percobaan.

No	ρ_o (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	$\Delta\rho/\rho_o$ (%)	g' (cm/s ²)	H (cm)	$\sqrt{g'H}$ (cm/s)	U (cm/s)	$\frac{U}{\sqrt{g'H}}$
1	0,9978	1,0072	1,0	9,21	10	9,60	4,34	0,45
2	0,9978	1,0273	3,0	28,92	10	17,01	7,60	0,45
3	0,9978	1,0464	5,0	47,64	10	21,83	10,10	0,46
4	0,9978	1,0084	1,0	10,39	10	10,19	4,35	0,43
5	0,9978	1,0278	3,0	29,41	10	17,15	7,64	0,45
6	0,9978	1,0472	5,0	48,42	10	22,01	10,13	0,46
7	0,9978	1,0070	1,0	9,02	20	13,43	6,24	0,46
8	0,9978	1,0276	3,0	29,21	20	24,17	10,84	0,45
9	0,9978	1,0468	5,0	48,03	20	30,99	14,42	0,47

Selain penentuan faktor utama pemicu gerak horisontal *gravity current* sebagai sistem fisis dua fluida, penelitian ini juga membuktikan keberlakuan persamaan kontinuitas pada persamaan (6) yang mendeskripsikan hukum kekekalan massa untuk fluida inkompresibel melalui kekekalan volume seperti terlihat pada persamaan (7). Dalam semua seri percobaan, volume awal dan akhir cairan diukur melalui pengukuran tinggi permukaan air sebelum dan sesudah tiap percobaan. Tabel 3 memberikan rincian data pengukuran akurat tinggi permukaan air tawar h_1 dan larutan garam h_2 serta tinggi

permukaan fluida di dalam tangki sesudah percobaan h' .

Untuk semua seri percobaan baik menggunakan tangki lebarnya 10 cm atau 20 cm, baik dengan tinggi awal permukaan air 10 cm atau 20 cm, terlihat dari Tabel 3 bahwa perubahan volume relatif terhadap volume awal adalah 0,4% (rata-rata). Oleh karena tangki dengan lebar 10 cm yang diisi dengan air setinggi 10 cm memberikan volume total tidak kurang dari 2×10^4 cm³ (20 liter), maka dalam batas ketelitian *digital micrometer gauge* dan ketidakpastian pengukuran tinggi permukaan fluida sebelum dan sesudah

percobaan volume fluida dapat dianggap tetap, yang berarti bahwa persamaan (7) adalah valid. Hal ini merupakan bukti empiris (dari pengukuran langsung) keberlakuan kekekalan volume untuk

fluida inkompresibel sekaligus merupakan bukti hukum kekekalan massa. Dengan demikian, persamaan (6) sebagai persamaan kontinuitas yang berlaku umum adalah valid.

Tabel 3. Pengukuran dan pembuktian kekekalan volume pada percobaan *gravity current*

No	ρ_o (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	$\Delta\rho/\rho_o$ (%)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h' (mm)	$\Delta V/V$ (%)
1	0,9978	1,0072	1,0	100,21	100,38	100,10	0,2
2	0,9978	1,0273	3,0	100,10	101,06	100,20	0,4
3	0,9978	1,0464	5,0	99,50	99,74	99,20	0,4
4	0,9978	1,0084	1,0	99,50	100,01	99,26	0,5
5	0,9978	1,0278	3,0	100,05	100,07	99,59	0,5
6	0,9978	1,0472	5,0	99,80	100,00	99,59	0,3
7	0,9978	1,0070	1,0	200,03	200,03	198,78	0,5
8	0,9978	1,0276	3,0	200,24	200,30	199,19	0,5
9	0,9978	1,0468	5,0	198,00	198,00	197,35	0,3

Keakuratan hasil-hasil percobaan *gravity current* bergantung pada keakuratan pengukuran kerapatan fluida yang diukur dengan hidrometer. Hasil ukur kerapatan fluida dengan hidrometer dapat dikalibrasi terlebih dahulu dengan membandingkan antara nilai kerapatan fluida yang diperoleh dari pengukuran dan persamaan (8). Dengan memasukkan data temperatur ruang Lab Elektronika Dasar, Instrumentasi dan Sains Kebumihan, Jurusan Fisika sebesar $T = 27^\circ\text{C}$ dan memasukkan nilai salinitas air laut $S = 36$ dan nilai kerapatan air tawar $\rho_o = 0,998234 \text{ g/cm}^3$ pada $T_o = 20^\circ\text{C}$ (sebagai kerapatan referensi), maka diperoleh nilai kerapatan massa air tawar hasil perhitungan $\rho = 0,99775 \text{ g/cm}^3$ (kerapatan air tawar hasil ukur adalah $\rho = 0,9978 \text{ g/cm}^3$ seperti yang dilaporkan pada Tabel 3). Nilai kerapatan air tawar hasil perhitungan berdasarkan persamaan (8) sangat dekat dengan nilai yang diperoleh dari pengukuran langsung dengan menggunakan hidrometer yang tersedia di laboratorium. Perbedaan kerapatan sebesar $0,00005 \text{ g/cm}^3$ akan terukur oleh hidrometer dengan batas ketelitian $0,0001 \text{ g/cm}^3$ sebagai dua angka yang sama. Berdasarkan perbedaan kerapatan massa yang kecil tersebut, validitas hasil ukur kerapatan

fluida dengan menggunakan hidrometer yang tersedia di lab dapat dipertanggungjawabkan. Dengan demikian, validitas hasil ukur perbedaan kerapatan fluida sebagai faktor utama pemicu gerak horisontal *gravity current* sangat baik. Dengan kata lain, semua hasil-hasil percobaan *gravity current* pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3 adalah valid.

PENUTUP

Serangkaian percobaan *gravity current* di laboratorium telah dilakukan untuk menguji peran perbedaan kerapatan sebagai gaya penggerak internal sistem dua fluida yang ditempatkan dalam tangki air horisontal dan untuk menjawab hipotesa penelitian yang meramalkan adanya korelasi antara perbedaan kerapatan dua fluida dan kecepatan gerak *gravity current*, serta untuk menguji hukum kekekalan massa pada fluida inkompresibel. Pengamatan langsung yang didokumentasikan dalam bentuk foto dan video percobaan serta analisis data hasil-hasil percobaan *gravity current* memberikan temuan utama, yaitu semakin besar perbedaan kerapatan

massa dua fluida, maka semakin besar kecepatan gerak *gravity current*. Untuk semua percobaan, kecepatan tak-berdimensi *gravity current* adalah $0,45 \pm 0,02$ (mendekati harga teoretik kecepatan tak-berdimensi sebesar 0,5), membuktikan bahwa sejumlah energi hilang yang diasosiasikan dengan friksi sepanjang perambatan *gravity current* dalam tangki di laboratorium. Selain temuan utama tersebut, kekekalan massa untuk fluida inkompresibel dalam penelitian ini dibuktikan melalui kekekalan volume yang berlaku dalam batas-batas ketelitian alat ukur yang digunakan. Perubahan volume total relatif terhadap volume awal hanya 0,4%. Hasil-hasil penelitian ini dapat digunakan oleh komunitas guru fisika dan dosen fisika untuk memperluas cakrawala berpikir melalui pengembangan pemahaman konsep fisika tentang hidrodinamika sistem dua fluida dengan beda kerapatan. Pengembangan pemahaman konsep fisika terkait topik penelitian ini sangat bermanfaat untuk memahami beberapa fenomena alam terkait dengan dinamika sistem dua fluida yang memiliki beda kerapatan, misalnya pertemuan aliran intrusi air laut ke daratan dan limbah aliran sungai ke laut di muara estuari. Keterkaitan topik penelitian ini dengan masalah nyata sehari-hari menjadikan pembelajaran fisika lebih bermakna.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pelaksanaan penelitian ini menggunakan dana hibah Penelitian Strategis Nasional (Stranas), Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DP2M), Dirjen Dikti Kemendikbud melalui SP3 Penelitian Stranas No.037/SP2H/PL/Dit.Litabmas /III/2012/7-3-2012. Tim peneliti juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada kolega dan mahasiswa Jurusan Fisika Unesa, staf teknik Laboratory of Geophysical Fluid Dynamics (GFD), Research School of Earth Sciences (RSES), The Australian National University (ANU) untuk bantuan teknis yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, M. (2009). Kreatif dan inovatif dalam pengajaran sains. *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah*, 1(2), 27-28.

- Budianto, W. E., Sucahyo, I., Prastowo, T. & Rahmawati, E. (2013). Perambatan gravity current dalam skala laboratorium sebagai pemodelan lahar dingin dan intrusi air laut. *Jurnal Sains dan Matematika*, 1(2), 64-68.
- Conceri, S., Giorgi, S., Camara, C. & Giacosa, N. (2006). Didactic strategies using simulations for physics teaching. *Current Developments in Technology-Assisted Education*, 3, 2042-2046.
- Cushman-Roisin, B & Beckers, J. M. (2009). *Introduction to Geophysical Dynamics: physical and numerical aspects*. Hanover, NH: Academic Press.
- Dreyfus, A. (1990). Applying the cognitive conflict strategy for conceptual change: some implications, difficulties and problems. *Science Education*, 74(5), 555-569.
- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Hanover, NH: Academic Press.
- Kang, H., Scharmann, L. C., Kang, S., & Noh, T. (2010). Cognitive conflict and situational interest as factors influencing conceptual change. *International Journal of Environmental & Science Education*, 5(4), 383-405.
- Muslim & Suhandi, A. (2012). Pengembangan perangkat pembelajaran fisika sekolah untuk meningkatkan pemahaman konsep dan kemampuan berargumentasi calon guru fisika. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 8(2), 174-183.
- Prastowo, T. (2008). *Mixing in buoyancy-driven exchange flows* (Unpublished Doctoral Dissertation). Research School of Earth Sciences (RSES), Australian National University (ANU), Canberra.
- Prastowo, T. (2009). On the nature of gravity currents. *Jurnal Matematika dan Sains*, 14(3), 76-80.
- Prastowo, T. (Eds.). (2010). Propagating gravity current in a uniform channel as a laboratory model for salt intrusion. *Proceedings of The Second International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
- Simpson J. E. (1997). *Gravity currents in the environment and the laboratory* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Sutrisno, W. (2009). Penumbuhan sikap-sikap positif melalui pembelajaran fisika. *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah*, 1(1), 14-17.
- Wardani, A. K., Sucahyo, I., Prastowo, T. & Anggaryani, M. (2013). Tinjauan ulang materi ajar gerak lurus beraturan melalui percobaan gravity current dalam skala laboratorium. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 9 (2), 113-122.