

Perambatan *Gravity Current* dalam Skala Laboratorium sebagai Pemodelan Lahar Dingin dan Intrusi Air Laut

Laboratory Experiments on Propagating Gravity Current to Model Lahar Dingin and Saltwater Intrusion

Wawan Eko Budianto,¹ Imam Suchahyo,^{1,2} Tjipto Prastowo,^{1,2,*} Endah Rahmawati^{1,2}

¹Prodi Pendidikan Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

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

ABSTRAK

Dalam konteks *problem-based learning*, simulasi proses intrusi air laut dan banjir lahar dingin melalui percobaan perambatan *gravity current* dengan memanfaatkan tangki kanal air di Laboratorium Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA Unesa merupakan terobosan penelitian pendidikan fisika yang patut dan layak mendapat perhatian. Dengan terobosan tersebut, pembelajaran fisika menjadi pembelajaran bermakna karena melibatkan upaya pengenalan pendidikan mitigasi (sadar, siaga, dan tanggap) bencana untuk mahasiswa Jurusan Fisika. Dalam penelitian ini, karakteristik *gravity current* dipelajari melalui dua besaran fisis, yaitu kecepatan dan kedalaman. Pada tahap pertama, serangkaian percobaan *gravity current* dilakukan dengan mengubah perbedaan salinitas antara larutan garam dan air tawar (1%, 3%, dan 5%) yang dimasukkan ke dalam tangki air pada kedalaman 10 cm dan 20 cm. Pada tahap kedua, percobaan dilakukan dengan menggunakan tangki air berukuran sama panjang tetapi dua kali lebih sempit. Hasil-hasil percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa kecepatan rambat tak-berdimensi *gravity current* adalah $0,44 \pm 0,03$, tidak dipengaruhi oleh lebar tangki. Berbeda dengan kecepatan, kedalaman *gravity current* lebih sulit ditentukan secara langsung karena *mixing*. Dokumentasi percobaan menunjukkan estimasi kedalaman antara $0,32-0,46 H$, H adalah kedalaman air.

Kata kunci: *gravity current*, intrusi air laut, banjir lahar dingin

ABSTRACT

In the context of problem-based learning, gravity current experiment to model saltwater intrusion and "lahar dingin" using a water tank available at the Laboratory of Earth Science in the Department of Physics, the State University of Surabaya is research breakthrough in physics education. This makes physics teaching meaningful as it is part of the introduction of disaster mitigation education to students in the department. The experiments were performed in two stages to determine the speed and depth of gravity current. In the first stage, a number of runs were conducted by varying density difference between saltwater and freshwater (1%, 3%, or 5%). The two fluids were filled in the tank at the total water depth of 10 cm or 20 cm. In the second stage, other runs were conducted using a water tank of the same length but twice narrower. The results show that the dimensionless speed is measured to be 0.44 ± 0.03 , independent of the width of the tank. Relatively compared to the speed, the current depth is difficult to measure owing to the presence of mixing. However, experimental photos show that the current depth is best estimated to be $0.32-0.46 H$, where H is the total depth.

Key words: *gravity current, saltwater intrusion, lahar*

* Alamat Korespondensi:
e-mail: t_prastowo@yahoo.com

PENDAHULUAN

Building Research Institute (BRI) dan *National Graduate Institute for Policy Studies* (2007) melaporkan kajian dampak bencana kebumihan di beberapa negara, yang korban jiwanya dapat ditekan sekecil mungkin bila masyarakat yang tinggal di daerah rawan bencana memiliki pemahaman terhadap potensi dan bahaya bencana kebumihan dalam bentuk kesadaran dan kesiagaan terhadap bencana kebumihan tersebut. Kesadaran dan kesiagaan menghadapi bencana kebumihan dapat dilatihkan secara terstruktur dan berjenjang kepada masyarakat umum dan masyarakat sekolah melalui berbagai cara pendekatan, salah satunya melalui kajian struktur kurikulum sains IPA dan fisika. Struktur kurikulum nasional pada semua jenjang sekolah yang diperlukan saat ini adalah yang sesuai dengan kebutuhan hidup, memuat *necessary life skills* untuk menjawab masalah nyata yang dialami masyarakat, dan harus memiliki unsur pemberdayaan masyarakat.

Dalam konteks *problem-based learning*, simulasi intrusi air laut dan banjir lahar dingin dengan melakukan percobaan perambatan *gravity current* di Laboratorium Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA merupakan suatu langkah terobosan penelitian pendidikan fisika yang patut dan layak mendapat perhatian. Dengan terobosan tersebut, maka pembelajaran fisika baik jenjang SMP dan SMA maupun universitas menjadi pembelajaran yang bermakna. Pengalaman belajar mengamati percobaan *gravity current* sebagai model proses intrusi air laut dan banjir lahar dingin dalam skala laboratorium bagi mahasiswa Prodi Pendidikan Fisika merupakan modal dasar dan bekal yang berharga, baik pada saat melakukan penelitian skripsi maupun pada saat mengajar sebagai guru fisika kelak. Selain memberikan wawasan akademik yang baru, penelitian ini juga digunakan untuk meningkatkan pengetahuan dan pemahaman mahasiswa tentang bencana alam kebumihan.

Percobaan *gravity current* menerapkan konsep fisika tentang hukum hidrodinamika. Dalam hukum hidrodinamika, fluida dikatakan dapat mengalir karena ada perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan sebagai penyebab gerak (*driving force*) dapat berasal dari sumber eksternal dan internal. Pada umumnya, sistem fisis yang ditinjau dalam masalah hidrodinamika adalah fluida dengan kerapatan tertentu yang mengalir karena ada perbedaan tekanan yang berasal dari sumber eksternal, misalnya perbedaan tinggi. Dalam praktik, perbedaan tinggi bisa berasal dari perbedaan posisi ujung-ujung suatu kanal, baik kanal terbuka (aliran air sungai) maupun kanal tertutup (aliran fluida pada pipa). Sumber eksternal lain bisa berasal dari penambahan atau pengurangan tekanan pada salah satu sisi kolom fluida. Untuk sistem fisis tertutup, perbedaan tekanan hanya berasal dari perbedaan tinggi. Dengan demikian, dinamika sistem tertutup dapat direpresentasikan melalui persamaan.

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad (1)$$

Δp menyatakan perbedaan tekanan sebagai akibat perbedaan tinggi dua titik dalam kolom fluida (dalam Nm^{-2}), ρ adalah kerapatan fluida (dalam kgm^{-3}), g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), dan Δh adalah perbedaan tinggi dua titik dalam kolom fluida (dalam m).

Perumusan perbedaan tekanan pada persamaan (1) hanya berlaku untuk sistem tertutup berupa fluida tunggal. Untuk sistem fisis berupa dua jenis fluida dengan beda kerapatan yang ditempatkan dalam wadah horizontal (mula-mula terpisah oleh sekat), maka persamaan (1) tersebut di atas tidak lagi berlaku. Untuk sistem fisis seperti itu, perbedaan tekanan sebagai gaya penggerak sistem berasal dari perbedaan kerapatan. Dalam hal ini, perbedaan kerapatan dua fluida disebut sebagai *internal driving force* dengan dinamika sistem dituliskan sebagai:

$$\Delta p = gh\Delta\rho \quad (2)$$

Δp menyatakan perbedaan tekanan sebagai akibat perbedaan kerapatan dua fluida (dalam Nm^{-2}), h menyatakan kedalaman dua buah titik tersebut diukur dari permukaan fluida (dalam m), dan $\Delta\rho$ menyatakan perbedaan kerapatan dua fluida (dalam kgm^{-3}).

Keberlakuan persamaan (2) di atas dapat dijumpai di alam dalam proses bercampurnya air sungai dan air laut di estuari yang disebut sebagai intrusi air laut dan banjir lahar dingin. Dalam skala laboratorium, intrusi air laut dan banjir lahar dingin dapat dimodelkan melalui perambatan *gravity current*, yaitu fluida dengan kerapatan tertentu merambat dalam fluida lain dengan kerapatan berbeda. Kedua jenis fluida tersebut membentuk aliran fluida dua lapis, perbedaan kerapatan antara kedua fluida dapat dihasilkan dari perbedaan kadar garam (Shin *et al.*, 2004) atau perbedaan konsentrasi partikel terlarut (Necker *et al.*, 2005).

Mengingat arti penting perambatan *gravity current* sebagai model intrusi air laut dan banjir lahar dingin, maka dilakukan penelitian untuk mempelajari karakteristik *gravity current* melalui pengukuran kecepatan karakteristik dan kedalaman *gravity current*. Prastowo (2009) melaporkan bahwa kecepatan rambat tak-berdimensi *gravity current* adalah $0,48 \pm 0,02$ dan kedalaman tak-berdimensi *gravity current* berkisar antara $0,38-0,47$. Dalam literatur klasik (Simpson, 1997) disebutkan bahwa dengan mengasumsikan tidak ada energi yang hilang dalam proses perambatan *gravity current*, kecepatan rambat teoretis *gravity current* adalah

$$v = 0,5 \sqrt{g'H} \quad (3)$$

$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ adalah percepatan gravitasi tereduksi, g adalah percepatan gravitasi lokal ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ menyatakan *fractional density difference* dengan adalah perbedaan kerapatan antara dua fluida dan ρ_0 adalah

kerapatan referensi diambil sama dengan kerapatan air tawar sebesar $0,9978 \text{ grcm}^{-3}$ pada suhu kamar dan H menyatakan ketinggian air.

Penelitian ini diarahkan untuk mempelajari karakteristik perambatan *gravity current* sepanjang tangki air yang tersedia di Laboratorium Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA. Fokus perhatian adalah penentuan kecepatan karakteristik dan kedalaman *gravity current* serta pengaruh geometri tangki air terhadap laju rambat dan kedalaman *gravity current*. Hal ini dilakukan dengan tujuan meningkatkan pengetahuan mahasiswa prodi pendidikan fisika sebagai calon guru fisika tentang bencana alam kebumihan, khususnya intrusi air laut dan banjir lahar dingin. Dengan pemahaman aspek kebencanaan yang lebih baik, maka diharapkan pada saat terjun sebagai anggota masyarakat, baik sebagai masyarakat awam maupun sebagai guru fisika SMP dan SMA atau dosen di universitas, mahasiswa prodi pendidikan fisika dapat mengajarkan pengetahuan tentang pengelolaan dan pendidikan mitigasi bencana.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober-Desember 2012 di Laboratorium Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA Unesa. Pada tahap awal, peneliti membuat tangki kanal air panjang 200 cm dengan lebar 20 cm dan 10 cm sebagai tempat percobaan *gravity current*. Untuk mengukur ketinggian permukaan air tawar dan larutan garam, peneliti menggunakan mikrometer digital dengan ketelitian 0,1 mm. Untuk mengukur densitas fluida, peneliti menggunakan *hydrometer* dengan tingkat ketelitian $0,0001 \text{ g/cm}^3$ pada suhu 27°C . *Digital stopwatch* dengan batas ketelitian 0,1 s digunakan untuk mengukur waktu rambat *gravity current* sepanjang dasar tangki air. Jalannya percobaan direkam dengan kamera DSLR dan kamera video dengan resolusi 14,2 mega piksel.

Pada tahap pertama penelitian, percobaan perambatan *gravity current* dilakukan dengan menggunakan tangki kanal air sepanjang 200 cm dan lebar 20 cm. Tangki dibagi menjadi dua bagian sama panjang dan dipisahkan oleh pembatas di tengah. Bagian sebelah kiri pembatas diisi air tawar (kuning) dan bagian sebelah kanan pembatas diisi larutan garam (biru) (Gambar 1).

Volume kedua fluida (air tawar dan larutan garam) dibuat sama dengan cara mengisikan air tawar dan larutan garam sama tinggi (10 cm atau 20 cm) pada

kedua reservoir. Dengan tidak ada perbedaan tinggi permukaan, maka perbedaan tekanan hidrostatis antara dua titik pada kedalaman yang sama (diukur dari permukaan) hanya berasal dari perbedaan kerapatan air tawar dan larutan garam (1%, 3%, atau 5%). Perbedaan kerapatan tersebut dihasilkan dari sejumlah garam yang ditambahkan pada reservoir kanan. Sesudah dilakukan pengadukan sampai merata sehingga menjadi larutan garam homogen, air tawar dan larutan garam diberi warna berbeda untuk memudahkan pengamatan pada saat percobaan berlangsung.

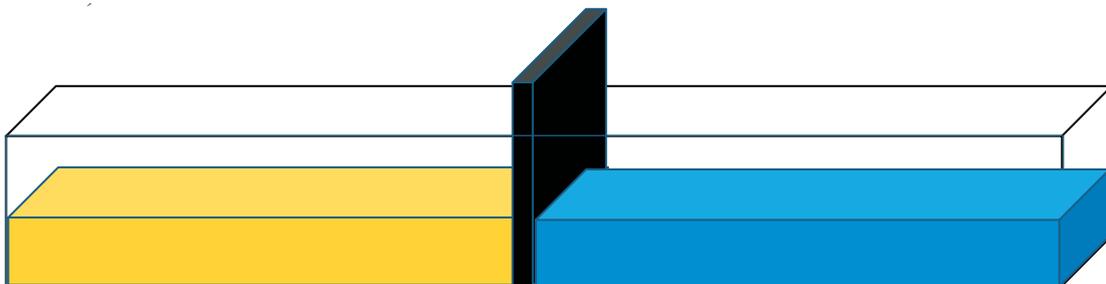
Percobaan dimulai dengan jalan menarik keluar pembatas dari dalam tangki sehingga memicu bentuk khas kepala *gravity current* yang merambat sepanjang dasar tangki air. Percobaan dihentikan dengan jalan memasukkan kembali pembatas ke dalam tangki air ketika kepala *gravity current* telah sampai pada ujung reservoir kiri.

Pada tahap kedua penelitian, percobaan dilakukan dengan menggunakan tangki air sepanjang 200 cm dan lebar 10 cm. Perubahan ukuran lebar tangki untuk menguji pengaruh geometri tangki air tempat *gravity current* merambat terhadap dinamika *gravity current*. Relevansi perubahan lebar tangki dengan kasus nyata yang ditemui di alam adalah apakah laju intrusi air laut atau aliran lahar dingin dipengaruhi oleh faktor fisik lebar sungai.

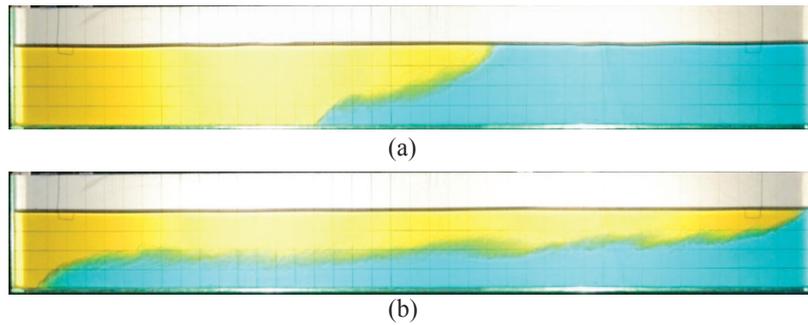
Percobaan *gravity current* dilakukan dalam dua tahap, yang mana serangkaian percobaan dilakukan dengan mengubah perbedaan kerapatan air tawar dan larutan garam $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ (1%, 3%, dan 5%) dan ketinggian permukaan air H (10 cm dan 20 cm). Variasi perbedaan kerapatan air tawar dan larutan garam $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ diambil mulai dari 1% mewakili perbedaan kadar garam kecil, 3% mewakili perbedaan kadar garam sedang, dan 5% mewakili perbedaan kadar garam besar untuk merepresentasikan semua jangkauan perbedaan salinitas yang mungkin ditemui di alam. Variasi ketinggian permukaan air H diambil 10 cm untuk mewakili *shallow water cases* dan 20 cm untuk mewakili *deep water cases*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara garis besar, hasil penelitian *gravity current* berupa data kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif, Gambar 2 memperlihatkan foto percobaan *gravity current*



Gambar 1. Sistem dua fluida dengan beda kerapatan dalam tangki air horizontal



Gambar 2. Tipikal *gravity current* dalam skala laboratorium. (a) kondisi segera sesudah pembatas dibuka; dan (b) kondisi ketika kepala *gravity current* hampir menyentuh ujung dinding reservoir kiri.

yang dibangkitkan dari sistem dua fluida dengan beda kerapatan. Segera sesudah pembatas antara air tawar dan larutan garam diambil, lapisan larutan garam (biru) bergerak ke kiri sepanjang dasar tangki dan lapisan air tawar (kuning) bergerak ke kanan sepanjang permukaan. Pergerakan simetri kedua jenis fluida tersebut dipahami sebagai mekanisme untuk mempertahankan kekekalan volume (massa) sesuai dengan prinsip kontinuitas yang berlaku untuk fluida inkompresibel. Perhatian lebih ditujukan pada lapisan larutan garam yang bergerak sepanjang dasar tangki karena lapisan larutan garam cocok merepresentasikan baik proses intrusi air laut maupun banjir lahar dingin.

Secara kuantitatif, Tabel 1 memberikan rangkuman data hasil percobaan *gravity current*. Data 15 percobaan dalam dua tahap penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan salinitas antara larutan garam dan air tawar (terukur dalam persentase perbedaan kerapatan kedua fluida), maka semakin besar pula kecepatan rambat teramati *gravity current* (*observed speed*). Demikian pula bila permukaan air (air tawar dan larutan garam) semakin tinggi dalam percobaan, maka semakin cepat pula *gravity current* itu merambat. Pengamatan terhadap laju rambat *gravity current* ini sesuai dengan *theoretical speed* yang diberikan oleh persamaan (3), dengan nilai kecepatan *gravity current* ditentukan oleh dua besaran, yaitu perbedaan kerapatan antara dua fluida $\Delta\rho$ dan ketinggian permukaan air H .

Dalam banyak studi perambatan *gravity current* dalam skala laboratorium (Simpson, 1997; Shin *et al.*, 2004; Necker *et al.*, 2005; Prastowo, 2009), karakteristik *gravity current* direpresentasikan oleh besaran *dimensionless speed* sebagai laju rambat karakteristik dan *dimensionless depth*. Berdasarkan data 15 percobaan pada Tabel 1 tersebut, terlihat bahwa kecepatan karakteristik perambatan *gravity current* adalah $0,44 \pm 0,03$ (merujuk pada batas ketelitian *digital stopwatch*, *micrometer gauge*, dan mistar berskala pengukur jarak tempuh). Hasil tersebut tidak jauh berbeda dengan ramalan teori *gravity current* dari Benjamin yang memprediksi kecepatan tak-berdimensi *gravity current* sebesar 0,5.

Dalam penelitian ini, *experimental set up* dan beberapa alat ukur yang digunakan dalam percobaan *gravity current* serta teknik pengukuran yang diadopsi dari Prastowo (2009) tidak berjalan sebagaimana mestinya

dengan baik sehingga hasil pengukuran kecepatan teramati dan perhitungan kecepatan tak-berdimensi berbeda dengan hasil yang dilaporkan Prastowo (2009), yaitu $0,48 \pm 0,02$. Namun, perbedaan tersebut masih bisa diterima dalam batas-batas ketelitian alat ukur dan teknik pengukuran yang digunakan dalam percobaan. Dalam konteks kekekalan energi, maka hasil yang diperoleh sesuai dengan fakta dalam percobaan di mana sebagian energi mekanik yang tersedia untuk perambatan *gravity current* dikonversi menjadi energi kinetik turbulen yang bertanggung jawab terhadap proses *mixing* antara larutan garam dan air tawar.

Dengan mempertimbangkan dan mengacu pada persamaan (3), maka hasil perhitungan kecepatan rambat tak-berdimensi *gravity current* dalam penelitian ini $0,44 \pm 0,03$ sekaligus juga kecepatan rambat tak-berdimensi $0,48 \pm 0,02$ yang dilaporkan oleh Prastowo (2009) menunjukkan bahwa kecepatan intrusi air laut dan aliran lahar dingin bernilai tidak kurang dari 80% kecepatan teoretis yang dapat diprediksi dari perbedaan kerapatan (salinitas) air laut dan air sungai atau kerapatan lumpur vulkanik yang dibawa oleh aliran sungai dalam kasus banjir lahar dingin. Hasil-hasil pengukuran tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar energi mekanik diubah menjadi energi kinetik translasi intrusi air laut dan aliran lahar dingin.

Berbeda dengan pengukuran kecepatan rambat, pengukuran kedalaman *gravity current* lebih sulit dilakukan karena permukaan air selalu berada dalam keadaan tidak stabil akibat berbagai hal baik teknis maupun nonteknis. Dokumentasi foto-foto percobaan dari dua tahap penelitian memberikan jangkauan harga kedalaman tak berdimensi antara 0,32–0,46 H ; H adalah ketinggian permukaan air. Karena energi kinetik ditentukan juga oleh besaran massa (dan volume), sedangkan massa (dan volume) ditentukan oleh geometri atau ukuran wadah fluida, maka pengetahuan tentang kecepatan rambat tak-berdimensi ini dalam praktik sesungguhnya harus diterapkan dengan mempertimbangkan geometri sungai, baik untuk kasus intrusi air laut maupun aliran banjir lahar dingin. Dalam kasus banjir lahar dingin, daya hantam atau rusak aliran lumpur lahar dingin ditentukan oleh seberapa besar kandungan energi potensial yang diubah menjadi energi kinetik. Dengan demikian diperlukan penelitian tentang

Tabel 1. Tabel hasil percobaan perambatan *gravity current*

| <i>Exp</i> | $\Delta\rho/\rho_0$ (%) | <i>H</i> (cm) | <i>Theoretical Speed</i> (cm/s) | <i>Observed Speed</i> (cm/s) | <i>Dimensionless Speed</i> | <i>Dimensionless Depth</i> |
|------------|----------------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 1,0 | 10,0 | 4,8 | 4,3 | 0,45 | 0,32 |
| 2 | 3,0 | 10,0 | 8,5 | 7,5 | 0,44 | 0,33 |
| 3 | 5,0 | 10,0 | 11,0 | 10,0 | 0,46 | 0,34 |
| 4 | 1,0 | 20,0 | 6,8 | 6,0 | 0,44 | 0,34 |
| 5 | 3,0 | 20,0 | 12,0 | 10,0 | 0,42 | 0,32 |
| 6 | 5,0 | 20,0 | 15,5 | 13,3 | 0,43 | 0,36 |
| 7 | 1,0 | 10,0 | 4,8 | 4,2 | 0,44 | 0,39 |
| 8 | 3,0 | 10,0 | 8,7 | 7,7 | 0,44 | 0,42 |
| 9 | 5,0 | 10,0 | 10,8 | 10,0 | 0,46 | 0,45 |
| 10 | 1,0 | 10,0 | 5,1 | 4,5 | 0,44 | 0,44 |
| 11 | 3,0 | 10,0 | 8,6 | 7,7 | 0,45 | 0,45 |
| 12 | 5,0 | 10,0 | 11,0 | 9,9 | 0,45 | 0,43 |
| 13 | 1,0 | 20,0 | 6,7 | 5,9 | 0,44 | 0,46 |
| 14 | 3,0 | 20,0 | 12,1 | 10,9 | 0,45 | 0,45 |
| 15 | 5,0 | 20,0 | 15,4 | 14,8 | 0,48 | 0,45 |

perambatan *gravity current* yang membahas kekekalan energi mekanik. Fokus studi adalah mengetahui distribusi transfer energi, berapa persen dari energi mekanik yang tersedia diubah menjadi energi kinetik *gravity current* dan berapa persen untuk energi *mixing*.

SIMPULAN

Simulasi proses intrusi air laut dan banjir lahar dingin untuk membelajarkan sains berbasis fenomena alam yang relevan dengan bencana alam kebumihan melalui percobaan *gravity current* telah dilaksanakan di Laboratorium Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA. Simulasi tersebut berguna bagi mahasiswa Jurusan Fisika dalam upaya untuk memberikan pengenalan pendidikan mitigasi bencana. Hasil pengukuran kecepatan rambat tak-berdimensi *gravity current* adalah $0,44 \pm 0,03$ dan kedalaman tak berdimensi terukur adalah $0,32-0,46 H$ dengan H menyatakan kedalaman air. Kecepatan rambat tak-berdimensi yang dikenal sebagai kecepatan karakteristik *gravity current* adalah besaran yang relevan dengan masalah nyata studi bencana alam kebumihan, yaitu laju intrusi air laut dan banjir lahar dingin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian mata kuliah kolokium penulis pertama. Peralatan percobaan *gravity current* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hibah Penelitian Stranas Tahun Pertama dengan dana berasal dari Direktorat Litabmas, Dirjen Dikti, Kemendikbud yang diberikan kepada penulis kedua dan tim melalui SP3 Penelitian Stranas No.037/SP2H/PL/Dit.Litabmas/III/2012/7-3-2012

DAFTAR PUSTAKA

- Building Research Institute (BRI) and National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS), 2007. *Disaster Education*. Paris: Section for Disaster Reduction UNESCO.
- Necker F, Härtel C, Kleiser L, and Meiburg E, 2005. Mixing and dissipation in particle-driven *gravity currents*. *J. Fluid Mech.* 545: 339-372.
- Prastowo T, 2009. On the nature of *gravity currents*. *Jurnal Matematika dan Sains*, 14(3): 76-80.
- Shin, JO, Dalziel SB, and Linden PF, 2004. *Gravity currents* produced by lock exchange. *J. Fluid Mech.* 521: 1-34.
- Simpson JE, 1997. *Gravity currents in the environment and the laboratory*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, UK.