

Perumusan Gaya Atraktif Bola Terapung Melalui Pengolahan Citra Digital dengan Metode Eksperimen

Erlina^{(a)*}, Septian Ulan Dini^(b) dan Sparisoma Viridi^(c)

Jurusan Fisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 40132
 Email : ^(a*)rinaerlina106@gmail.com, ^(b)septianulanidini@gmail.com, ^(c)dudung@fi.itb.ac.id

Diterima (09 September 2019), Direvisi (20 Januari 2020)

Abstract. Two floating object interact each other in a certain time when the initial separation distance of them is not greater than the radius. This interaction is caused by asymmetric deformation in the liquid-air boundary plane due to contact with spherical particles. Asymmetric deformation plane of the liquid-air boundary between the two spheres and outside the sphere results an attractive force. This force is experienced by two balls that interact in a certain period of time until they come close to each other and after contact they will bond and difficult to escape. The position of each ball is observed using a video camera with 25 fps specifications and processed using Python and OpenCV and obtained data on the position of the center of mass of the system at any time until both are in contact. From the equation of position to time, the acceleration value of the ball is obtained, so that the magnitude of the attractive force can be known. The attractive force of the object is varied with the density of the object so that the magnitude of attractive force is obtained for each variation of 2 to 9, respectively: 0.304, 0.643, 0.874, 1.279, 1.316, 1.537, 1.406, 1.215, 0.2184 in μN units.

Keywords: attractive force, buoyancy, capillary interaction, floating ball

Abstrak. Dua objek bola terapung saling berinteraksi satu sama lain dalam waktu tertentu ketika jarak pisah awal keduanya tidak lebih dari besar jari-jarinya. Interaksi ini disebabkan karena deformasi asimetris pada bidang batas zat cair-udara akibat kontak dengan partikel bola. Deformasi asimetris bidang batas zat cair-udara yang berada diantara kedua bola dan diluar bola mengakibatkan adanya gaya atraktif. Gaya ini dialami kedua bola yang berinteraksi dalam jangka waktu tertentu hingga saling mendekat dan setelah mengalami kontak keduanya akan berikatan dan sulit lepas. Posisi tiap-tiap bola diamati menggunakan video kamera dengan spesifikasi 25 fps dan diolah menggunakan Python dan OpenCV dan diperoleh data posisi pusat massa bola terhadap pusat massa sistem setiap saat hingga keduanya mengalami kontak. Dari persamaan posisi terhadap waktu, diperoleh nilai percepatan bola, sehingga besar gaya atraktif dapat diketahui. Dilakukan variasi massa jenis objek terhadap besar gaya atraktif sehingga diperoleh besar gaya atraktif untuk masing-masing variasi 1 sampai 9 berturut-turut: 0.304, 0.643, 0.874, 1.279, 1.316, 1.537, 1.406, 1.215, 0.2184 dalam satuan μN .

Kata kunci: Bola terapung, gaya atraktif, gaya apung, interaksi kapiler

PENDAHULUAN

Fenomena pengelompokan gelembung-gelembung udara [1], sereal [2], telur

nyamuk yang terapung di permukaan zat cair[3], serta pemisahan material menggunakan teknik flotasi [1][4][5] merupakan contoh fenomena klusterisasi. Objek terapung juga dapat dikontrol

geraknya menggunakan sinar laser [6] dengan memanfaatkan efek Marangoni [7]. Penelitian ini fokus membahas tentang pola pengelompokan objek-objek terapung (*self assembly*).

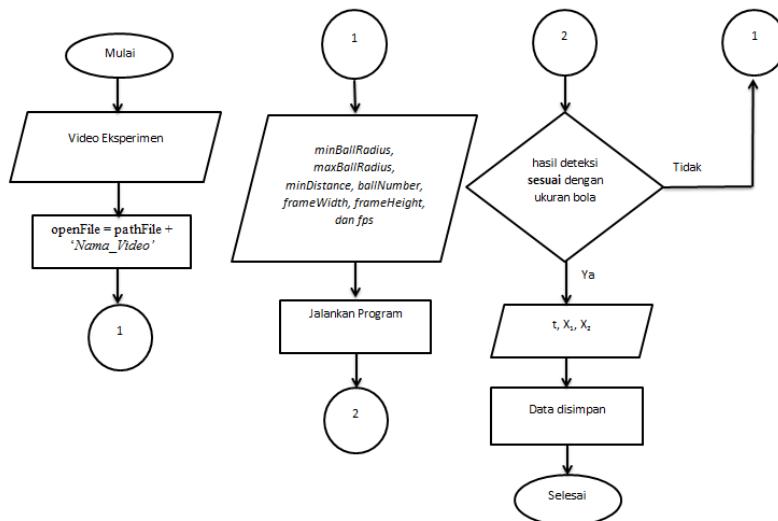
Fenomena ini disebabkan oleh interaksi antar objek yang terperangkap pada bidang batas zat cair-udara dalam periode waktu tertentu. Interaksi ini terjadi akibat deformasi asimetris pada bidang batas zat cair-udara [8]. Deformasi ini diakibatkan sifat zat cair yang mengalami interaksi kapiler ketika mengalami kontak dengan partikel lain hingga menimbulkan meniskus pada bidang batas antara keduanya [9].

Pola pengelompokan objek-objek terapung (*self assembly*) [10] dianalisis dengan metode eksperimen menggunakan objek berbentuk bola berskala milimeter hingga nanometer [9] dan simulasi numerik [11]. Eksperimen menggunakan objek berskala kecil sangat sensitif sehingga efek

termal dan vibrasi menjadi diperhitungkan [dalbe 2011]. Metode numerik juga digunakan untuk perhitungan gaya atraktif antara dua objek bola terapung [12]. Metode ini cukup rumit karena sema faktor penyebab gaya diperhitungkan.

Penelitian ini fokus pada penyederhanaan rumusan gaya atraktif dua objek bola terapung berskala centimeter dengan metode eksperimen melalui pengolahan citra digital. Pengolahan citra digital menggunakan *Library OpenCV* yang diimplementasikan dalam *Python 3.7.3* dengan bantuan *Numpy arrays* [13]. *OpenCV (Open Source Computer Vision)* merupakan *library* yang memiliki banyak fungsi pemrosesan gambar [14]. Perangkat pengolahan citra ini dipilih karena *OpenCV* lebih mudah untuk orang dengan sedikit latar belakang pemrograman dan lebih sederhana dituliskan dalam bahasa pemrograman *Python* [15].

METODE PENELITIAN



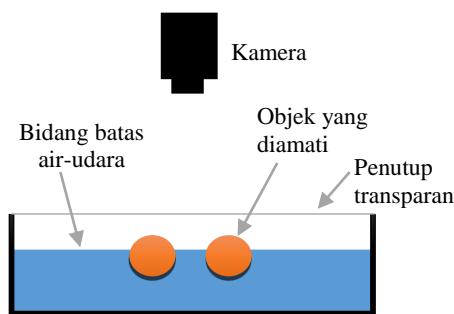
Gambar 1. Digram alir pengolahan citra digital

Set Eksperimen

Eksperimen dilakukan menggunakan wadah berisi air dan 2 objek bola terapung dengan posisi objek tepat di tengah wadah. Hal ini bertujuan untuk menghindari efek meniskus pada dinding wadah sehingga permukaan disekitar objek dianggap datar. Set eksperimen dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Objek diamati dari atas menggunakan kamera yang diletakkan 27 cm dari dasar wadah. Data yang divariasi pada penelitian ini adalah massa jenis objek. Variasi massa jenis objek dilakukan dengan cara mengisi masing-masing objek dengan cairan yang massanya berbeda. Eksperimen dilakukan dengan memposisikan kedua objek berbentuk bola pada jarak 5 cm diukur dari pusat massanya pada bidang batas air-udara yang tenang. Pengambilan video oleh kamera dilakukan sejak kedua objek diletakkan hingga keduanya mengalami kontak.

Data berupa video eksperimen dianalisis menggunakan algoritma pengolahan citra digital dengan *library OpenCV* dan bahasa pemrograman *Python*[16]. Diagram alir proses pengolahan citra digital video eksperimen dapat dilihat pada **Gambar 1**. Kurva posisi pusat masa objek terhadap pusat masa sistem setiap saat hasil pengolahan citra, selanjutnya dicocokkan menggunakan metode *curvefitting* dan didapat persamaan posisi terhadap waktu.



Gambar 2. Set Eksperimen Penelitian

Dengan melakukan diferensiasi sebanyak dua kali diperoleh besar percepatan objek. Dengan demikian, besar gaya atraktif dapat diperoleh. Berikut alur pengolahan citra untuk memperoleh data posisi antara pusat massa objek terhadap pusat massa sistem setiap waktu:

1. Input video ke dalam program:
`openFile = pathFile + 'Nama_Video'`
2. Pengaturan Sistem Deteksi:
`minBallRadius, maxBallRadius, minDistance, ballNumber, frameWidth, frameHeight, dan fps).`
3. Jalankan program:
Cek apakah hasil deteksi sesuai atau tidak, jika tidak lakukan pengaturan ulang pada sistem deteksi hingga hasil deteksi tepat sesuai dengan ukuran bola. Hasil deteksi sesuai jika hasil program seperti **Gambar 3** ditunjukkan dengan lingkaran berwarna hijau.
4. Hasil pengolahan citra
Data jarak antarpusat kedua bola (range bola) dan data posisi pusat massa tiap bola (dalam piksel). Nilai ini dikonversi kedalam skala centimeter.

Eksperimen ini dilakukan sebanyak 9 variasi massa jenis objek.



Gambar 3. Hasil Deteksi Lingkaran

Pengolahan Data

Hasil yang diperoleh adalah berupa data posisi pusat massa masing-masing partikel dan jarak antar pusat kedua partikel setiap *frame* atau setiap 1/25 detik (kamera memiliki spesifikasi 25 *frame per second*). Nilai jarak antar pusat kedua partikel saat keduanya mengalami kontak dalam skala cm adalah 4 cm (2R). Nilai ini dijadikan acuan sebagai konversi dari skala piksel ke skala cm. Jika radius partikel adalah r maka untuk mengetahui perubahan posisi tiap partikel dapat ditinjau jarak Euclidean dari dua titik pusat partikel. Persamaannya diberikan ditunjukkan pada **Persaman 1**.

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

Di mana d_{12} merupakan jarak Euclidian partikel 1 dan 2, x_a dan y_a berturut-turut merupakan koordinat sumbu x dan koordinat sumbu y untuk partikel a . Apabila dua partikel tersebut identik dengan radius r maka saat mereka mengalami kontak $d_{12} = 2r$.

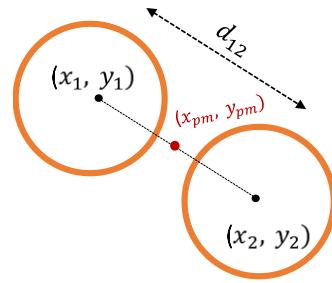
Perumusan pusat massa sistem setiap saat untuk dua partikel yang bergerak ditentukan menggunakan **Persamaan 2** dan **3**:

$$x_{pm} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

$$y_{pm} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

Sehingga posisi objek 1 terhadap pusat massa sistem dapat dirumuskan seerti pada **Persamaan 4**:

$$r_t = \sqrt{(x_1 - x_{pm})^2 + (y_1 - y_{pm})^2} \quad (4)$$



Gambar 5. Ilustrasi jarak antarpartikel dan posisi pusat massa sistem

Gaya-Gaya yang Bekerja pada Bola Terapung

Sistem fisis yang melibatkan interaksi atraktif pada kedua objek bola terapung mematuhi Hukum II Newton yang berbunyi “Resultan gaya pada suatu benda sama dengan perkalian massa benda dan percepatannya”. Dengan menggunakan Hukum II Newton, percepatan partikel i dinyatakan dengan **Persamaan 5** dan **6**.

$$\vec{a} = \frac{1}{m_i} \sum \vec{F}, \quad (5)$$

$$\vec{a} = \frac{1}{m_i} (\vec{G}_i + \vec{B}_i + \vec{D}_i + \vec{C}_i), \quad (6)$$

di mana $\sum \vec{F}$ adalah jumlah semua gaya yang bekerja pada partikel. Gaya-gaya tersebut adalah gaya gravitasi atau gaya berat benda, gaya angkat fluida, gaya gesekan fluida dan gaya kapiler.

Gaya gravitasi \vec{G}_i yang arahnya menuju pusat bumi dan besarnya bergantung pada massa tiap benda yang dinyatakan dengan **Persamaan 7**.

$$\vec{G} = \frac{1}{6} \pi D_b^3 \rho_b \vec{g} \quad (7)$$

Gaya angkat fluida \vec{B}_i yang menentukan apakah benda akan terapung atau tercelup di zat cair. Ini bergantung dari posisi vertikal permukaan fluida h memenuhi **Persamaan 8** [17].

$$\vec{B}_i = -\rho_f V_i(h) \vec{g} \quad (8)$$

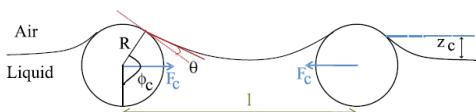
Ketika ada kecepatan relatif antara fluida dan benda, benda tersebut akan mengalami gaya gesekan yang berlawanan dengan arah gerak benda yang dinyatakan dengan **Persamaan 9**.

$$\vec{D}_i = -3\pi\eta_f\sigma_i(\vec{v}_i - \vec{v}_f) \quad (9)$$

Akibat adanya perbedaan deformasi bidang batas zat cair-udara diantara dua bola yang berinteraksi dengan daerah lainnya, terdapat perbedaan gaya kapiler akibat perbedaan tegangan permukaan objek yang bergantung pada sudut kontak objek dan zat cair. Resultan gaya kapiler ini diwakili oleh satu gaya kapiler \vec{C}_i .

Interaksi Dua Partikel Terapung

Partikel berbentuk bola terapung di permukaan air akan mengalami gaya tarik menarik antara molekul zat cair dengan partikel padat. Gaya ini menimbulkan adanya kelengkungan permukaan fluida yang berinteraksi dengan partikel padat. Deformasi kelengkungan pada daerah antara dua partikel yang berdekatan menghasilkan gaya atraktif yang membuat kedua partikel saling tarik-menarik. Pada permukaan air yang berinteraksi dengan partikel akan membentuk cekungan seperti pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Kelengkungan permukaan fluida yang berinteraksi dengan partikel padat [9].

Gaya kapiler C_i merupakan fungsi dari sudut kontak θ yang nilainya ditunjukkan pada **Persamaan 10, 11, dan 12**.

$$\vec{C}_i \approx \vec{C}_{ij} \quad (10)$$

Jika hanya ada satu objek di permukaan zat cair ($r_{ij} \rightarrow \infty$),

$$\vec{C}_{ij}(\theta) = 0 \quad (11)$$

Jika ada lebih dari satu objek di permukaan zat cair, ($r_{ij} \leq R$),

$$\vec{C}_{ij}(\theta) \neq 0 \quad (12)$$

Sehingga total gaya yang bekerja pada satu objek yang berdekatan dengan objek lain yang identik, dapat diwakili oleh satu gaya yang disebut gaya atraktif \vec{A}_{ij} yang diasumsikan nilainya mengikuti **Persamaan 13**.

$$\vec{A}_{ij} = \frac{c}{r_{ij}^n} \hat{r}_{ij} \quad (13)$$

Maka, gaya atraktif yang bekerja mengikuti **Persamaan 14**.

$$\vec{A}_{ij} = m_i \vec{r}_i \quad (14)$$

Dengan menggunakan $\vec{r}_{ij} \equiv \vec{r}$, $r_{ij} \equiv r$, dan $\hat{r}_{ij} \equiv \hat{r}$, maka:

$$\vec{A}_{ij} = \frac{c}{r^n} \hat{r} \quad \text{dan} \quad \vec{A}_{ji} = -\frac{c}{r^n} \hat{r}, \quad (15)$$

sehingga untuk masing-masing partikel:

$$\vec{A}_{ij} = m_i \vec{r}_i \quad \text{dan} \quad -\vec{A}_{ji} = m_j \vec{r}_j \quad (16)$$

Dengan melakukan reduksi pada persamaan (12) diperoleh:

$$\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right) \vec{A}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j \quad (17)$$

$$\frac{1}{\mu} \vec{A}_{ij} = \vec{r}_{ij}$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{c}{r^n} \hat{r} = \vec{A}_{ij} \quad (18)$$

$$\vec{r}_i = \sum_{n=0}^2 c_n t^n = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \quad (19)$$

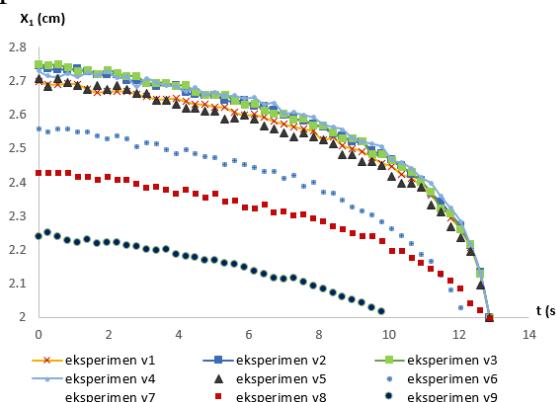
Persamaan (14) merupakan persamaan diferensial dari r dimana $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_{ij}(t)$ dengan mengasumsikan,

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi	ρ_b (kg/m ³)	m (g)	$x(t)$	$a(t)$ (x 10 ⁻² m/s ²)	Gaya Atraktif (x 10 ⁻⁶ N)
1	98.508	3.3	$x(t) = -0.0046t^2 + 0.0216t + 2.6539$	0.92	0.304
2	188.060	6.3	$x(t) = -0.0047t^2 + 0.0194t + 2.7013$	1.02	0.643
3	277.612	9.3	$x(t) = -0.0047t^2 + 0.0182t + 2.7103$	0.94	0.874
4	367.164	12.3	$x(t) = -0.0052t^2 + 0.0281t + 2.6815$	1.04	1.279
5	456.716	15.3	$x(t) = -0.0043t^2 + 0.0149t + 2.6667$	0.86	1.316
6	546.269	18.3	$x(t) = -0.0042t^2 + 0.0134t + 2.5297$	0.84	1.537
7	635.821	21.3	$x(t) = -0.0033t^2 + 0.0094t + 2.4883$	0.66	1.406
8	725.373	24.3	$x(t) = -0.0025t^2 + 0.0033t + 2.4139$	0.50	1.215
9	814.925	27.3	$x(t) = -0.0004t^2 - 0.0179t + 2.2575$	0.08	0.2184

Tabel 1. Hasil pencocokan kurva untuk setiap variasi massa jenis partikel

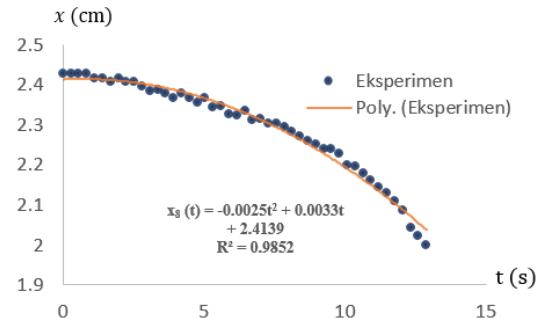
Hasil pengolahan citra berupa kurva jarak antara pusat massa objek dengan pusat massa sistem dua partikel terhadap waktu untuk variasi 1 sampai 9 ditampilkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik jarak pusat massa partikel-pusat massa sistem terhadap waktu

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada **Gambar 6** diperoleh persamaan posisi pusat massa partikel dengan pusat massa sistem terhadap waktu. Persamaan tersebut kemudian didifferensiasi sebanyak dua kali

diperoleh nilai percepatan objek. Percepatan objek disubtitusi ke **Persamaan (5)** sehingga diperoleh besarnya resultan gaya yang bekerja pada objek. Hasil *curve fitting* pada salah satu data grafik ditunjukkan pada **Gambar 6** untuk variasi 8.



Gambar 7. Grafik jarak pusat massa partikel dengan pusat massa sistem terhadap waktu untuk $\rho_b = 725.373 \text{ kg/m}^3$

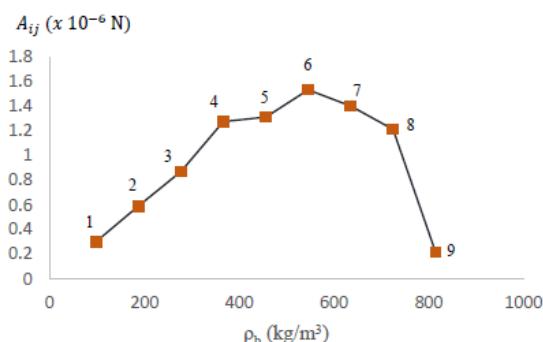
Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, diperoleh persamaan hasil

pencocokan kurva yang ditunjukkan pada **Persamaan 20**.

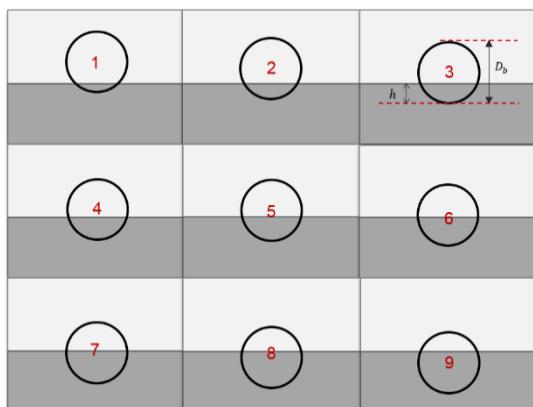
$$x_8(t) = -0.0046t^2 + 0.0216t + 2.653 \quad (20)$$

Sehingga, setelah dilakukan diferensiasi sebanyak dua kali, nilai percepatan objek dapat diketahui. Tahap ini dilakukan untuk semua variasi sehingga dihasilkan data pada **Tabel 1** dengan rentang nilai R^2 dari 0.94-0.98.

Grafik variasi massa jenis objek terhadap besarnya gaya atraktif ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Grafik variasi massa jenis partikel terhadap besar gaya atraktif



Gambar 9. Variasi kedalaman Objek terhadap permukaan air akibat variasi massa jenis objek

Tabel 2. Nilai kedalaman objek terhadap permukaan air

No.	ρ_b (kg/m^3)	h (cm)
1	98.477	0.78
2	188.002	1.11
3	277.526	1.39
4	367.051	1.64
5	456.576	1.88
6	546.100	2.12
7	635.625	2.37
8	725.150	2.62
9	814.674	2.89

Berdasarkan hasil yang diperoleh, pada **Gambar 8** ditunjukkan bahwa massa jenis partikel terapung berbentuk bola, berpengaruh terhadap besar gaya atraktif. Besar gaya atraktif mencapai nilai maksimum saat massa jenis partikel sebesar $546.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ dimana kedalaman objeknya hampir tepat di tengah-tengah bola seperti **Gambar 8** untuk bola 6. Besar massa jenis partikel berpengaruh pada kedalaman partikel terhadap permukaan air. Berdasarkan grafik pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**, ternyata dari D gaya atraktif meningkat dari $h=0.78 \text{ cm}$ sampai $h=2.12 \text{ cm}$ atau mendekati setengah dari jari-jari bola. Kemudian mengalami pengurangan hingga tidak terjadi gaya atraktifnya sama dengan nol pada $h>2.89 \text{ cm}$.

Perumusan gaya atraktif secara teori diperoleh menggunakan **Persamaan 18**, diperoleh gaya antraktif yang ditunjukkan pada **Persamaan 21**.

$$\frac{1}{\mu} \frac{c}{r^n} \hat{r} = \vec{A}_{ij}, \text{ dengan } n = 0 \quad (21)$$

KESIMPULAN

Telah dilakukan eksperimen interaksi dua bola terapung dengan berbagai variasi massa jenis sehingga menghasilkan variasi kedalaman. Diperoleh hubungan besarnya gaya atraktif terhadap perubahan kedalaman. Hubungan ini menunjukkan bahwa gaya atraktif untuk variasi massa jenis objek dari variasi 1 hingga 9 diperoleh hasil berturut-turut sebesar 0.304, 0.643, 0.874, 1.279, 1.316, 1.537, 1.406, 1.215, dan 0.218 dalam satuan μN sehingga perumusan gaya atraktif diperoleh

$$\vec{A}_{ij} = \frac{1}{\mu} \frac{c}{r^n} \hat{r} \text{ dengan } n=0.$$

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Bantuan Kegiatan Mahasiswa Fisika ITB tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Drzymala and P. B. Kowalcuk, “Classification of Flotation Frothers,” vol. 777, no. 888, 2018.
- [2] D. Vella and L. Mahadevan, “The ‘Cheerios effect,’” *Am. J. Phys.*, vol. 73, no. 9, pp. 817–825, 2005.
- [3] J. C. Loudet and B. Pouliquen, “How do mosquito eggs self-assemble on the water surface?,” *The European Physical Journal E.*, vol. 34, no. 8, pp. 76, 2011.
- [4] Y. Yu, L. Ma, M. Cao, and Q. Liu, “Slime coatings in froth flotation : A review,” *Minerals Engineering*, vol. 114, pp. 26–36, 2017.
- [5] R. I. Jeldres, L. Uribe, L. A. Cisternas, L. Gutierrez, and W. H. Leiva, “Applied Clay Science : The Effect Of Clay Minerals On The Process Of Fl Otation Of Copper Ores - A critical review,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 170, pp. 57–69, 2019.
- [6] D. E. Lucchetta, F. Simoni, L. Nucara, and R. Castagna, “Controlled-Fotion Of Floating Macro- Objects Induced By Light,” *AIP Advances*, vol. 5, no. 7, pp. 077147, 2016.
- [7] M. Schmitt and H. Stark, “Marangoni Flow At Droplet Interfaces : Three-Dimensional Solution And Applications,” *Physics of Fluids*, vol. 28, no. 1, pp. 012106, 2016.
- [8] D. xia Feng and A. V. Nguyen, “Effect Of Contact Angle And Contact Angle Hysteresis On The Floatability Of Spheres At The Air-Water Interface,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 248, pp. 69–84, 2017.
- [9] M. J. Dalbe, D. Cosic, M. Berhanu, and A. Kudrolli, “Aggregation of frictional particles due to capillary attraction,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 83, no. 5, pp. 1–10, 2011.
- [10] D. Lee and D. Vella, “Soft Matter Self-Assembly Of Repulsive Interfacial Particles Via Collective Sinking,” *Soft Matter*, vo. 13, no. 1, pp.212-221, 2016.
- [11] P. Singh, D. Joseph, And N. Aubry, “Dispersion And Attraction Of Particles Floating On Fluid – Liquid Surfaces,” *Soft Matter*, vol.6, no.18, pp. 4310-4325, 2010.
- [12] P. Liyanaralage and H. Manoj, “Between Objects at Liquid,” *Disertation University of Cambridge*, 2014.
- [13] B. Usage, “The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation,” pp. 22–30.

- [14] OpenCV dev team, “The OpenCV Tutorials,” 2019. [Online]. Available: <https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/tutorials.html>. [Accessed: 10-Oct-2019].
- [15] B. Gupta, “Study on Object Detection using Open CV - Python,” vol. 162, no. 8, pp. 17–21, 2017.
- [16] A. Z. Fairuza, “Multi Ball Detection,” 2019. [Online]. Available: <https://github.com/azfairuza/multiBallDetc>. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [17] S. Viridi, J. Sabaryati, and D. Mulyati, “Two-Dimensional Dynamics Of Spherical Grain Floating On The Propagating Wave,” vol. 3, no. 3, pp. 133–142, 2018.

