

Levitasi Magnetik untuk Pengukuran Densitas Bahan Diamagnetik: Studi Teoritik

Gancang Saroja^{1)*}

¹⁾Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

Diterima 18 Maret 2014, direvisi 01 April 2014

ABSTRAK

Telah dilakukan studi teoritik untuk mengukur densitas bahan diamagnetik dengan menggunakan metode levitasi magnetik. Dalam penelitian ini, magnet permanen berbentuk silinder digunakan sebagai pembangkit gradien medan magnet dan fluida paramagnetik sebagai medium levitasi. Dua metode yang diteliti adalah levitasi magnetik dengan menggunakan sumber medan magnet tunggal dan ganda. Parameter yang terukur adalah tinggi levitasi bahan. Hasil studi menunjukkan bahwa kedua metode levitasi magnetik tersebut dapat digunakan untuk mengukur densitas sampel bahan diamagnetik.

Kata kunci : levitasi magnetik, diamagnetik, medan magnet, densitas.

ABSTRACT

A theoretical study was conducted to measure the density of diamagnetic materials using magnetic levitation method. In this study, cylindrical permanent magnet was used for generating a magnetic field gradient and a paramagnetic fluid as media of levitation. Both methods which using a single and double source were studied. The measureable parameter was the high of material levitation. The results showed that both methods can be used to measure the density of the diamagnetic sample.

Keywords : magnetic levitation, diamagnetic, magnetic field, density.

PENDAHULUAN

Densitas suatu bahan merupakan representasi populasi penyusun bahan tersebut. Di laboratorium, banyak dijumpai sampel bahan diamagnetik, seperti bahan-bahan organik yang memiliki ukuran sampel yang relatif kecil sehingga diperlukan alat-alat khusus untuk mengukur densitasnya. Alat-alat tersebut antara lain *floating bulb hydrometer*, kolom gradien, piknometer, densitimeter tabung osilasi, dan resonator saluran mikro tersuspensi [1]. Oleh karena itu, masih diperlukan suatu metode pengukuran densitas yang mudah, cepat, dan akurat.

Salah satu sifat bahan diamagnetik adalah dapat mengalami levitasi jika diberikan suatu gradien medan magnet. Fenomena tersebut

dikenal dengan levitasi magnetik. Hal yang sama juga terjadi ketika benda diamagnetik berada didalam suatu fluida magnetik dimana terjadi levitasi yang dikenal dengan levitasi magneto-Archimedes [2]. Ketinggian levitasi suatu bahan diamagnetik dalam fluida magnetik dipengaruhi oleh faktor kuat gradien medan magnet, densitas bahan dan fluida, serta nilai suseptibilitas bahan dan fluida magnetik.

Teori Levitasi Magnetik. Dalam pengaruh suatu gradien medan magnet, pada benda diamagnetik yang berada didalam fluida magnetik akan bekerja dua buah gaya yaitu gaya berat di dalam fluida dan gaya magnetik [3]. Gaya-gaya tersebut dituliskan sesuai dengan persamaan berikut.

$$\vec{F}_g + \vec{F}_{mag} = (\rho_s - \rho_m)V\vec{g} + \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0}V(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} \quad (1)$$

dimana, \vec{F}_g adalah gaya berat benda di dalam fluida (N), \vec{F}_{mag} adalah gaya magnetik

*Corresponding author :

E-mail: gancang.saroja@gmail.com

(N), ρ_s adalah densitas dari benda diamagnetik (kg/m^3), ρ_m adalah densitas dari fluida magnetik (kg/m^3), V adalah volume dari benda (m^3), \vec{g} adalah percepatan gravitasi (m/s^2), χ_s adalah susceptibilitas benda diamagnetik, dan χ_m adalah susceptibilitas dari fluida magnetik. Berikutnya $\vec{B} \cdot \nabla \vec{B}$ adalah gradien medan magnet (T^2m^{-1}), μ_0 merupakan permeabilitas magnet dari hampa ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$), serta \vec{B} adalah induksi magnet (T). Dalam keadaan setimbang maka besar gaya yang bekerja adalah nol.

Fluida Magnetik. Fluida magnetik adalah suatu fluida yang mengandung partikel-partikel magnet sehingga bersifat seperti bahan magnet. Sebagai medium untuk melevitasi bahan diamagnetik, diperlukan fluida magnetik dengan nilai susceptibilitas molar yang sesuai. Semakin tinggi nilai susceptibilitas molarnya, semakin besar gaya magnetik yang akan dihasilkan. Untuk keperluan melevitasi bahan diamagnetik dengan densitas antara 1–2 kali densitas air, diperlukan medium fluida magnetik dengan sekitar nilai susceptibilitas magnetik sebesar $10^{-5} - 10^{-3}$ [3]. Salah satu jenis fluida magnetik adalah larutan MnCl_2 yang bersifat fluida paramagnetik.

Secara teoritik, larutan paramagnetik berupa MnCl_2 akan memiliki susceptibilitas magnetik molar yang dirumuskan sebagai berikut [4, 5].

$$\chi_M = m^2 \frac{N_A}{3k_B T} + \chi_{diamag} \quad (2)$$

dimana: χ_M adalah susceptibilitas magnetik molar ($\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$), T adalah temperatur absolut (K), k_B adalah tetapan Boltzman ($1,38065 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), N_A adalah bilangan Avogandro ($6,02 \times 10^{23}$), m adalah momen magnet efektif molekul/ μ_B , serta χ_{diamag} adalah susceptibilitas diamagnetik molar (untuk $\text{H}_2\text{O} = -13 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$). Nilai susceptibilitas dari larutan MnCl_2 disajikan dalam Tabel berikut.

Berdasarkan Tabel 1, larutan MnCl_2 memenuhi kriteria sebagai medium levitasi. Selain itu, dalam aplikasinya larutan MnCl_2 memiliki keunggulan sebagai berikut (i) memiliki nilai susceptibilitas magnet molar

yang tinggi, (ii) transparan sehingga memudahkan pengamatan, dan (iii) relatif lebih murah [3]

Tabel 1 Nilai susceptibilitas larutan MnCl_2 [2]

No	$[\text{MnCl}_2](\text{M})$	$\chi (\times 10^{-4})$	$d\chi (\times 10^{-7})$
1	1,0	7,99	7,4
2	1,5	8,25	7,4
3	2,0	8,74	15
4	2,5	8,97	15
5	3,0	9,13	30

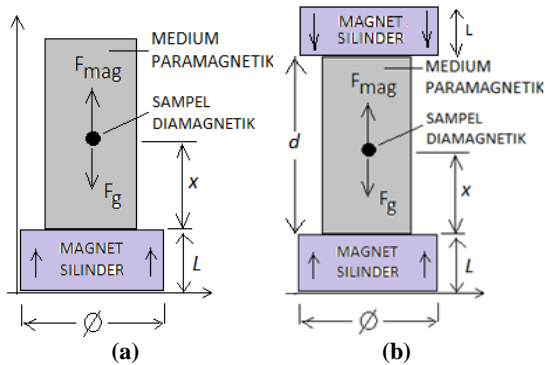
Sumber Gradien Medan Magnet. Suatu gradien medan magnet dapat dibangkitkan dengan menggunakan magnet permanen atau elektromagnet. Untuk keperluan melevitasi bahan diamagnetik dengan medium fluida paramagnetik kuat, diperlukan kuat medan magnet pada sumber B_0 sebesar 0,375 T [3]. Hal tersebut dapat dipenuhi oleh suatu magnet permanen berbentuk silinder berbahan Neodimium dimana B_0 bisa mencapai 0,5 T. Suatu magnet permanen berbentuk silinder, akan menghasilkan medan magnet di sekitarnya dengan arah medan ditentukan oleh arah orientasi momen magnetiknya. Suatu magnet permanen berbentuk silinder dengan radius R dan ketebalan L serta arah orientasi momen magnetik sejajar arah sumbu, akan menghasilkan fluks magnet yang ditentukan oleh kuat magnet dan jaraknya x [2]. Fluks magnet pada jarak x sepanjang sumbunya dinyatakan sebagai berikut,

$$B_x(x) = \frac{B_0}{2} \left[\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right] \quad (3)$$

METODE PENELITIAN

Digunakan dua metode pembangkitan gradien medan magnet, yaitu dengan menggunakan sumber medan magnet tunggal dan ganda seperti pada Gambar 1. Mula-mula, material diamagnetik tenggelam di dalam medium paramagnetik. Kemudian, magnet silinder disusun dengan susunan tunggal ataupun ganda sehingga memberikan gradient medan magnet yang menghasilkan gaya tolak magnetik sehingga material terlevitasi.

Pada sumber medan magnet tunggal, fluks medan magnet akan turun dengan cepat secara eksponensial sebagai fungsi jarak, sesuai dengan persamaan (3). Sedangkan pada sumber medan magnet ganda, fluks medan magnet diantara kedua magnet dapat dijabarkan sebagai berikut. Digunakan sistem koordinat kartesian dengan mengambil bidang datar horizontal sebagai bidang (y, z), sedangkan arah vertikal sebagai arah sumbu-x.



Gambar 1. Metode pembangkitan gradient medan dengan menggunakan (a) sumber medan magnet tunggal (b) sumber medan magnet ganda

Dengan demikian, medan magnet arah horizontal sumbu - y dan z adalah simetris. Sedangkan fluks medan magnet sepanjang garis sumbu diantara kedua magnet dirumuskan sebagai berikut.

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_y \\ B_z \\ B_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2B_0}{d}x + B_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode sumber medan magnet tunggal.

Pada saat terlevitasi stabil pada suatu ketinggian x, pada sampel bahan akan berlaku kesetimbangan gaya $\sum \vec{F} = 0$. Dengan demikian, persamaan (1) dapat ditulis kembali dalam bentuk sebagai berikut.

$$(\rho_s - \rho_m)V\vec{g} = \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0}V(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} \quad (5)$$

Dengan membagi kedua ruas dalam persamaan (5) dengan volume dan percepatan gravitasi, serta densitas medium dipindah

keruas kanan maka persamaan diatas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\rho_s = \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0 g}(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} + \rho_m \quad (6)$$

dimana vektor gardien dari fluk magnet B dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan.

$$(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} = B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} \quad (7)$$

Dengan memasukan nilai fluks magnet B_x sesuai persamaan (3) ke dalam persamaan (7), akan diperoleh nilai gradien berikut.

$$B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} = B_x \left(\frac{B_0}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{(L+x)^2}{\sqrt{(R^2 + (L+x)^2)^3}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + x^2}} + \frac{x^2}{\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} \right) \right) \quad (8)$$

dimana, x merupakan ketinggian sampel saat terlevitasi dengan stabil. Jika dimisalkan nilai $B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} = \alpha$, persamaan (6) akan menjadi sebagai berikut.

$$\rho_s = \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0 g}(\alpha) + \rho_m \quad (9)$$

Persamaan (9) menunjukkan bahwa nilai densitas sampel bahan dapat diperoleh. Untuk mendapatkan nilai densitas sampel, terdapat dua macam variable dalam persamaan (9), yaitu variabel tetap dan variabel berubah. Variabel tetap berupa nilai densitas dari fluida magnetik ρ_m , percepatan gravitasi \vec{g} , permeabilitas magnet dari hampa μ_0 , susceptibilitas benda diamagnetik χ_s , dan suseptibilitas dari fluida magnetik χ_m . Sedangkan variabel yang berubah adalah gradien medan magnet α yang merupakan fungsi dari B_x yang besarnya tetap dan tinggi levitasi x. Dengan mengetahui nilai ketinggian levitasi x, gradien medan dapat diperoleh sehingga nilai densitas bahan dapat diukur.

Metode sumber medan magnet ganda.

Keadaan sampel bahan terlevitasi stabil akan memenuhi hukum kesetimbangan gaya yaitu bahwa $\sum \vec{F} = 0$. Keadaan setimbang tersebut akan memenuhi persamaan (1) yang nilainya akan sama dengan nol.

$$(\rho_s - \rho_m)V\vec{g} + \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0}V(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} = 0 \quad (10)$$

Besar vektor gradien dari fluks magnet B diperoleh dengan memasukan persamaan (4) ke dalam persamaan gradien medan magnet (7) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} (\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} &= B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} = \left(-\frac{2B_0}{d}x + B_0\right)\left(-\frac{2B_0}{d}\right) \\ &= \frac{4B_0^2}{d^2}x - \frac{2B_0^2}{d} \end{aligned} \quad (11)$$

Setelah itu, persamaan (11) dimasukan ke dalam persamaan (10) sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$-(\rho_s - \rho_m)V\vec{g} + \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0}V\left(\frac{4B_0^2}{d^2}x - \frac{2B_0^2}{d}\right) = 0 \quad (12)$$

Kemudian, dengan membagi persamaan (12) dengan volume V dan menempatkan variabel densitas di ruas kiri dari persamaan, akan didapatkan bentuk persamaan berikut.

$$(\rho_s - \rho_m) = \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0 g} \left(\frac{4B_0^2}{d^2}x - \frac{2B_0^2}{d}\right) \quad (13)$$

atau

$$\rho_s = \frac{(\chi_s - \chi_m)4B_0^2}{\mu_0 g d^2}x - \frac{(\chi_s - \chi_m)2B_0^2}{\mu_0 g d} + \rho_m \quad (14)$$

Persamaan (14) menunjukkan bahwa nilai densitas sampel bahan dapat ditentukan dari ketinggian levitasinya. Persamaan tersebut mengandung variabel berubah yaitu ketinggian levitasi x . Sedangkan variabel yang lain berupa nilai densitas fluida magnetik ρ_m , percepatan gravitasi \vec{g} , permeabilitas magnet dari hampa μ_0 , susceptibilitas benda diamagnetik χ_s , dan susceptibilitas dari fluida magnetik χ_m merupakan variable tetap.

Dengan demikian, suatu benda diamagnetik dengan nilai densitas 1–2 kali densitas air akan dapat diukur densitasnya menggunakan metode levitasi magnetik dengan medium fluida paramagnetik serta menggunakan pembangkit gradien medan magnet dari magnet permanen. Dalam hal ini, dimensi ukuran berupa volume

sampel bahan tidak disyaratkan sehingga secara teoritik sampel bahan dengan ukuran relatif sangat kecil pun akan dapat diukur densitasnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa secara teoritik metode levitasi magnetik dengan sumber medan magnet tunggal dan ganda dapat digunakan untuk mengukur densitas suatu bahan diamagnetik. Pengukuran densitas dilakukan dengan cara melevitasi bahan diamagnetik dalam fluida magnetik serta mencatat ketinggian levitasi. Dari ketinggian levitasi tersebut nilai densitas sampel bahan dapat diketahui.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Katherine A. Mirica, Scott T. Phillips, Charles R.M., and George M. Whiteside, (2010). Magnetic Levitation in the Analysis of Foods and Water, *J. Agric. Food Chem.*, **58**, 6565–6569
- [2] Saroja, G., Suyatman, dan Nugraha, (2012). Levitasi Magnetik untuk Pemisahan Plastik PET dan PVC, *Natural B*, **1**(4).
- [3] Mirica, K.A., Shevkoplyas S.S., Phillips S.T., Gupta M., and Whitesides G.M., (2009) Measuring Densities of Solids and Liquids Using Magnetic Levitation: Fundamentals, *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 10049-10058
- [4] Malerich, C., and Ruff, P.K., (2004) Demonstrating and Measuring Relative Molar Magnetic Susceptibility Using a Neodymium Magnet, *Journal of Chemical Education*, **81** (8), 1155
- [5] Egami, S., Monjushiro, H., dan Watarai, H., (2006) Magnetic Susceptibility Measurements of Solutions by Surface Nanodisplacement Detection, *Analytical Sciences* **22**, September.