

Levitasi Magnetik untuk Pemisahan Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) dan Polyvinyl Chloride (PVC)

Gancang Saroja^{1)*}, Suyatman²⁾, Nugraha²⁾

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

²⁾ Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, ITB, Bandung

Diterima 17 September 2012, direvisi 16 Oktober 2012

ABSTRAK

Dalam daur ulang sampah plastik, proses pemisahan mengalami permasalahan dengan sulitnya plastik jenis PET dipisahkan dengan plastik jenis PVC. Penelitian ini bertujuan untuk memisahkan campuran plastik PET dan PVC dengan menggunakan metode levitasi magnetik. Dalam eksperimen, digunakan sampel campuran plastik jenis PET dan PVC yang berasal dari botol bekas kemasan yang ada dipasaran. Sumber medan magnet berasal dari susunan magnet-magnet permanen berbahan Neodimium berbentuk silinder dengan orientasi arah momen magnet sejajar garis sumbunya. Magnet-magnet disusun sehingga menghasilkan gradien medan magnet pada arah vertikal. Induksi magnet pada masing-masing permukaan magnet adalah 0,244, 0,349, 0,412, 0,443, 0,463, dan 0,476 T. Fluida paramagnetik yang digunakan adalah berupa larutan $MnCl_2$ dengan konsentrasi 1, 1,5, 2, 2,5, dan 3 M. Hasil menunjukkan pada B_0 sebesar 0,476 T, fluida dengan konsentrasi 3 M menghasilkan levitasi tertinggi serta pemisahan terbaik plastik PET dan PVC.

Kata kunci: Pemisahan, plastik PET, plastik PVC, levitasi magnetik, induksi magnet, konsentrasi fluida.

ABSTRACT

In the recycling of plastic waste, the process of plastic separation is often faced with the problem of the difficulty of separating PET from PVC plastics. The main objective of this research was to separate a mixed PET and PVC plastics using magnetic levitation. In the experiment, the samples were PET and PVC plastics from used bottles packaging found in the market. The magnetic field was derived from arrangement of the permanent magnets made from Neodymium with a cylinder shape with an orientation of magnetic moment parallel to its axis. Magnets were arranged so as to produce a magnetic field gradient in the vertical direction. The magnetic inductions at the respective surface of each magnet were 0,244, 0,349, 0,412, 0,443, 0,463, and 0,476 T. The paramagnetic fluid used was solution of $MnCl_2$ with a concentration of 1, 1,5, 2, 2,5, and 3 M. The results showed that at B_0 of 0,476 T, the fluid with the concentration of 3 M produced the highest levitation and the best separation of PET from PVC plastics.

Key word: separation, PET plastic, PVC plastic, magnetic levitation, magnetic induction, fluid concentration.

PENDAHULUAN

Dalam tahapan proses daur ulang, plastik-plastik bekas harus dipisahkan sesuai jenisnya sebelum diolah kembali. Alat berupa

separator gravitasi mampu bekerja dengan baik untuk memisahkan berbagai jenis campuran bahan plastik-plastik bekas. Plastik dengan jenis Polypropylene (PP), High Density Polyethylene (HDPE), dan Low Density Polyethylene (LDPE) dapat dipisahkan dengan baik. Namun demikian, alat tersebut tidak dapat memisahkan plastik berjenis PET dan PVC. Hal tersebut disebabkan kedua jenis

*Corresponding author :
E-mail: saroja@ub.ac.id

plastik memiliki rentang nilai densitas yang identik dan saling tumpang tindih [1].

Dalam proses pengolahan, plastik dengan jenis PET harus dipisahkan dengan jenis PVC karena keduanya bersifat *incompatible*. Selain itu, perbedaan nilai titik lelehnya menjadikan temperatur pencetakannya juga berbeda [2]. Oleh karena itu, berbagai metode digunakan untuk memisahkan kedua jenis plastik tersebut.

Metode pemisahan plastik PET dan PVC yang digunakan diantaranya adalah pemisahan berdasarkan perbedaan sifat fisiknya, yaitu: perbedaan sifat permukaan bahan [2,3], perbedaan sifat termal [4], perbedaan serapan terhadap gelombang elektromagnetik [5], serta perbedaan sifat elektrik bahan plastik [6]. Namun demikian, metode-metode tersebut masih memiliki berbagai permasalahan. Dalam metode pemisahan berdasarkan perbedaan sifat permukaan dengan teknik *flotation*, terdapat beberapa masalah, yaitu: (i) *treatment* pada air sisa proses berkaitan dengan penggunaan kembali atau pembuangannya, (ii) harga *wetting reagent* yang mahal, (iii) pencucian dan pengeringan kembali setelah proses pemisahan [7]. Sementara itu, permasalahan pada metode pemisahan termal adalah memerlukan banyak energi karena diperlukan panas hingga titik leleh material. Pemanasan tersebut dapat mendegradasi sifat salah satu komponen dari campuran plastik. Untuk pemisahan dengan penyortiran menggunakan metode spektroskopi NIR memiliki keuntungan dapat membedakan jenis PET dan PVC dengan sangat cepat. Namun demikian, metode ini menggunakan perangkat yang rumit dan dinilai masih mahal [5]. Sedangkan metode pemisahan dengan perbedaan sifat elektrik menggunakan banyak energi listrik dan sangat dipengaruhi oleh kelembaban udara. Oleh karena itu, untuk lingkungan dengan kelembaban udara yang tinggi, efisiensi pemisahan PET dan PVC menjadi turun.

Berdasarkan sifat kemagnetannya, plastik termasuk kedalam bahan diamagnetik yang memiliki nilai susceptibilitas negatif. Salah satu sifat bahan diamagnetik, ketika berada didalam fluida magnetik maka akan dapat mengalami levitasi jika diberikan gradien

medan magnet [8]. Fenomena tersebut dikenal dengan levitasi magnetik. Levitasi bahan diamagnetik dalam fluida magnetik dipengaruhi oleh faktor kuat medan magnet, densitas bahan dan fluida, serta nilai susceptibilitas bahan dan fluida magnetik.

Plastik berjenis PET dan PVC termasuk dalam kategori material diamagnetik. Namun demikian, keduanya memiliki nilai susceptibilitas yang berbeda, yaitu sebesar -0,0075 untuk PVC dan sebesar -0,0063 untuk PET [9, 10]. Karena bersifat diamagnetik, bahan tersebut akan dapat mengalami levitasi magnetik dalam fluida paramagnetik. Dalam pengaruh suatu gradien medan magnet, plastik PET dan PVC akan mengalami gaya magnetik yang berbeda karena perbedaan nilai susceptibilitasnya sehingga levitasi pada kedua plastik juga akan berbeda.

METODE PENELITIAN

Levitasi Magnetik. Benda-benda diamagnetik memiliki sifat menolak medan magnet eksternal. Ketika berada dalam fluida magnetik, benda diamagnetik dengan densitas yang lebih besar dari pada fluida magnetik akan dapat mengalami levitasi magnetik. Sesuai dengan hukum Archimedes, ketika suatu benda diamagnetik dimasukkan kedalam fluida magnetik, akan terdapat sejumlah fluida yang dipindahkan oleh benda. Oleh karena itu, akan terdapat gaya yang bekerja pada benda tersebut sebesar gaya yang bekerja pada fluida magnetik yang dipindahkan. Dalam kesetimbangan, benda diamagnetik yang terlevitasi dalam suatu fluida magnetik mengalami dua buah gaya yaitu gaya gravitasi dan gaya magnetik yang sama besar namun arahnya saling berlawanan. Dalam keadaan tersebut, gaya-gaya yang bekerja memenuhi persamaan berikut [11].

$$\vec{F}_g + \vec{F}_{mag} = (\rho_s - \rho_m)V\vec{g} + \frac{(\chi_s - \chi_m)}{\mu_0}V(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} = 0 \quad (1)$$

Dimana, $\vec{F}_g$ dan $\vec{F}_{mag}$ adalah gaya berat dan gaya magnetik (N), ρ_s dan ρ_m adalah densitas dari benda diamagnetik dan fluida magnetik

(kg/m³), V adalah volume dari benda (m³), $\vec{g}$ adalah percepatan gravitasi (m/s²), χ_s dan χ_m adalah susceptibilitas magnet dari benda diamagnetik dan fluida magnetik, μ_0 adalah permeabilitas magnet dari hampa ($= 4\pi \times 10^{-7}$ N.A⁻²), serta $\vec{B}$ adalah induksi magnet (T).

Plastik PET dan PVC. Dalam eksperimen ini, digunakan serpihan-serpihan plastik jenis PET dan PVC yang berasal dari botol bekas kemasan yang ada dipasaran. Botol plastik PET diambil dari bekas botol wadah larutan pencuci mulut sedangkan plastik PVC dari bekas botol kemasan larutan pembasmi serangga. Validitas bahan plastik didasarkan pada terdapatnya kode jenis plastik dan nilai densitas dari kedua jenis plastik tersebut. Langkah pertama, kedua plastik dibersihkan melalui proses pencucian dengan deterjen dan dikeringkan. Kemudian, botol dipotong-potong menjadi serpihan-serpihan. Nilai densitas dari kedua jenis sampel diukur secara tidak langsung. Massa plastik ditimbang menggunakan timbangan *electronic precision scale/balance* seri BEB produksi BOECO Germany dengan ketelitian 0,001 gram. Volume serpihan diukur dengan menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm. Pengukuran sifat magnetik bahan plastik dilakukan menggunakan Remacomp tipe D-50996, Magnet Fhiziks Germany. Data-data fisika dari serpihan plastik yang digunakan dalam penelitian seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Data fisik plastik PET dan PVC

No	Data Fisik	PET	PVC
1	Densitas (g/cm ³)	1,357 ± 0,2	1,337 ± 0,2
2	Warna	Bening	Kuning
3	Frek.: (Hz)	15.000	15.000
4	B_r (T)	0,062	0,115
5	H_c (A/cm)	1,022	1,076
6	B_{max} (T)	0,069	0,128
7	H_{max} (A/cm)	1,35	1,415
8	Ukuran serpihan (mm)	P 2 ± 0,5 L 2 ± 0,5 T 0,5 ± 0,1	P 2 ± 0,5 L 2 ± 0,5 T 0,7 ± 0,1

Fluida Paramagnetik. Fluida paramagnetik yang digunakan adalah berupa larutan MnCl₂.4H₂O produksi Merck KgaA, Germany, dalam air distilasi. Nilai densitas dari larutan, diukur secara tidak langsung dimana massa sampel larutan ditimbang dengan menggunakan *electronic precision scale/balance* seri BEB produksi BOECO Germany. Volume larutan diukur dengan gelas ukur terkalibrasi berukuran 10 ± 0,5 ml. Larutan paramagnetik berupa MnCl₂ akan memiliki susceptibilitas magnetik molar yang dirumuskan sebagai berikut [12, 13].

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

Dimana: χ_M adalah susceptibilitas magnetik molar (cm³ mol⁻¹), T adalah temperatur absolut (K), k_B adalah tetapan Boltzman (1.38065×10^{-23} JK⁻¹), N_A adalah bilangan Avogandro (6.02×10^{23}), m adalah momen magnet efektif molekul/ μ_B , serta χ_{diamag} adalah susceptibilitas diamagnetik molar (H₂O = -13×10^{-6} cm³ mol⁻¹). Nilai densitas dan susceptibilitas larutan MnCl₂ terukur dalam eksperimen ini tersaji dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Nilai densitas dan susceptibilitas larutan MnCl₂ terukur pada suhu 25 °C

No	[MnCl ₂] (M)	χ ($\times 10^{-4}$)	$d\chi$	ρ (kg/m ³)	$\pm d\rho$ (kg/m ³)
1	1,0	7,99	7,4E-07	1.089	0,001
2	1,5	8,25	7,4E-07	1.124	0,001
3	2,0	8,74	1,5E-06	1.189	0,002
4	2,5	8,97	1,5E-06	1.221	0,002
5	3,0	9,13	3,0E-06	1.242	0,004

Sumber Gradien Medan Magnet.

Dalam eksperimen digunakan pembangkit gradient medan berupa magnet permanent berbahan Neodimium (NIB atau NdFeB) berbentuk silinder dengan orientasi momen magnet sejajar sumbu. Magnet memiliki bentuk geometri berupa silinder dengan diameter 2 cm sejumlah enam buah. Induksi magnet pada permukaan kutub-kutubnya B_0 .

diukur dengan Gauss meter FH 54, MAGNET-PHYSIK, Germany. Induksi magnet pada permukaan kutub magnet yang digunakan adalah sebesar 0,244, 0,349, 0,412, 0,443, 0,463, dan 0,476 T. Induksi magnet pada jarak x sepanjang sumbunya dinyatakan dalam persamaan 3) berikut.

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

Dimana L adalah tebal magnet dan R adalah jari-jari dari magnet.

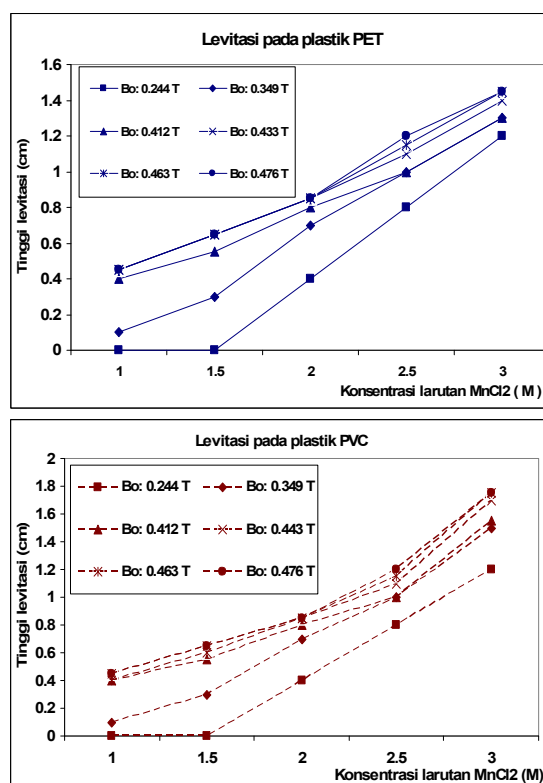
Desain Eksperimen. Dalam eksperimen, digunakan tabung berbahan kaca yang memiliki diameter lebih kecil dari diameter silinder magnet dengan dimensi; diameter luar (d_L): $1,300 \pm 0,005$ cm, diameter dalam (d_D): $1,050 \pm 0,005$ cm, dan tinggi (h): $5 \pm 0,05$ cm. Tabung yang berisi fluida paramagnetik disusun diatas magnet silinder dengan posisi sumbu segaris. Dengan demikian, rapat fluks medan magnet pada jarak x dari magnet akan mendekati rapat fluks medan magnet sepanjang garis sumbu.

Langkah Eksperimen. Sampel berupa campuran serpihan-serpihan plastik PET dan PVC, dimasukkan kedalam fluida paramagnetik. Dalam keadaan tanpa pengaruh medan magnet eksternal, campuran serpihan kedua bahan plastik akan tenggelam dan berada di dasar tabung fluida. Kemudian diberikan medan magnet eksternal yang bersumber dari magnet silinder dengan orientasi medan arah vertikal serta tabung diberikan getaran secara perlahan. Dalam pengaruh gradien medan magnet, kedua plastik akan mengalami levitasi magnetik. Dalam kesetimbangan levitasi, akan bekerja gaya berat karena gravitasi bumi dan gaya magnetik yang arahnya saling berlawanan dengan besar resultan gaya adalah nol. Kemudian, levitasi dan pemisahan yang terjadi pada kedua jenis sampel diamati dan diukur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi Konsentrasi. Hasil eksperimen untuk variasi konsentrasi larutan dengan kuat sumber medan magnet tetap terlihat pada

Gambar 1. Ketika konsentrasi larutan $MnCl_2$ ditingkatkan, levitasi pada kedua bahan juga meningkat di hampir semua sumber medan magnet yang digunakan.

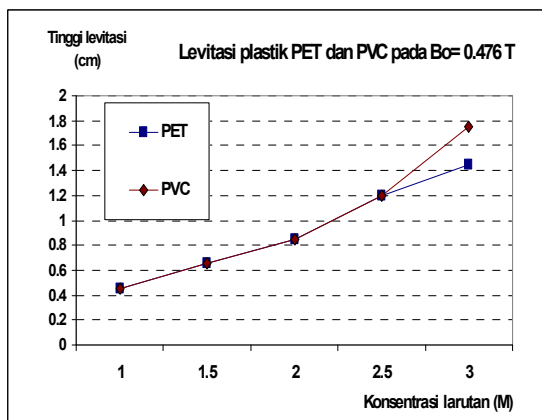


Gambar 1. Levitasi pada Plastik PET dan PVC.

Kenaikan levitasi yang terjadi pada saat konsentrasi ditingkatkan adalah sesuai dengan persamaan 2). Pada saat konsentrasi dinaikkan maka susceptibilitas dan densitas larutan juga meningkat. Kenaikan susceptibilitas berakibat pada kenaikan gaya magnetik pada kedua bahan, sedangkan kenaikan densitas berakibat turunnya gaya berat efektif plastik dalam fluida yang sesuai dengan persamaan 1). Hal tersebut mengakibatkan nilai gradien medan yang dibutuhkan untuk terlevitasi semakin kecil sehingga levitasi terjadi pada jarak yang makin jauh dari permukaan magnet. Dengan kata lain, levitasi semakin tinggi.

Pada konsentrasi larutan 1 dan 1,5 M dengan B_0 sebesar 0,244 T, kedua plastik belum terlevitasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa gaya berat efektif kedua plastik masih lebih besar dari pada gaya magnetik yang

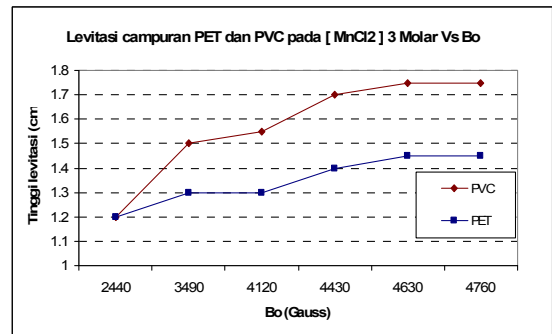
bekerja pada kedua plastik. Oleh karena itu, gaya magnetik yang bekerja pada plastik belum mampu membuat sampel plastik terlevitasi. Pada konsentrasi lebih tinggi, campuran plastik PET dan PVC terlevitasi untuk semua nilai B_0 yang digunakan. Namun demikian, belum terjadi pemisahan campuran plastik hingga konsentrasi larutan 2,5 M. Pemisahan serpihan PET dan PVC terjadi pada konsentrasi larutan 3 M dan terlihat paling jelas pada saat B_0 sebesar 0,476 T seperti terlihat pada Gambar 2. Dengan demikian, konsentrasi larutan $MnCl_2$ yang dapat menghasilkan pemisahan serpihan plastik PET dan PVC adalah konsentrasi 3 M.



Gambar 2 Levitasi campuran plastik PET dan PVC pada B_0 sebesar 0,476 T dengan variasi konsentrasi larutan

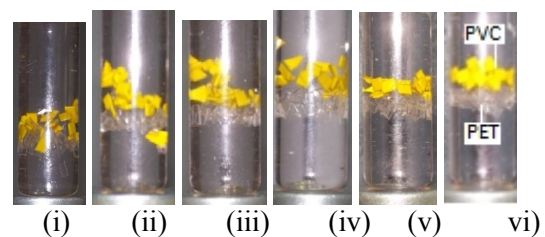
Variasi Kuat Sumber Medan Magnet.

Hasil eksperimen levitasi magnetik dengan memvariasikan B_0 pada konsentrasi larutan $MnCl_2$ sebesar 3 M terlihat pada Gambar 3. Pada konsentrasi larutan 3 M, kedua jenis plastik terlevitasi untuk semua harga B_0 . Pada sumber medan sebesar 0,244 T, kedua plastik terlevitasi pada ketinggian 1,20 cm namun belum terpisah. Keadaan terlevitasi akan tetapi belum terpisah disebabkan oleh dua hal; (i) karena selisih densitas antara kedua plastik sama besar dengan selisih gaya magnetik per satuan volume plastik yang bekerja pada kedua sampel (persamaan 2), (ii) perbedaan levitasi yang terjadi jauh lebih kecil dari pada ukuran serpihan plastik.



Gambar 3 Levitasi serpihan PET dan PVC pada konsentrasi larutan 3 M

Semakin kuat sumber medan magnet yang digunakan, levitasi yang terjadi semakin tinggi. Selain itu, selisih jarak levitasi antara PET dan PVC juga semakin jauh. Hal tersebut disebabkan oleh kenaikan nilai gradien medan yang mengakibatkan kenaikan besar gaya magnetik yang bekerja pada plastik (persamaan 3). Gaya levitasi magnetik yang bekerja pada PVC lebih besar dari pada PET karena plastik PVC bersifat lebih diamagnetik dari pada PET (Tabel 1). Pada saat yang bersamaan, bekerja gaya berat plastik yang bergantung pada nilai densitas plastik. Plastik PET dengan nilai densitas terukur lebih besar dari PVC akan memiliki gaya berat yang lebih besar. Dengan demikian, levitasi yang dihasilkan pada plastik PVC akan lebih tinggi dari PET. Pada sumber medan B_0 sebesar 0,476 T, plastik PVC terpisah dari plastik PET dengan baik. Serpihan-serpihan plastik PVC terkumpul diatas kumpulan serpihan-serpihan plastik PET seperti terlihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Separasi serpihan PET dan PVC pada larutan 3 M dengan B_0 : 0,244(i), 0,349 (ii), 0,412 (iii), 0,443 (iv), 0,463 (v), dan 0,476 (vi) T

KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil dan pembahasan, dapat diambil kesimpulan bahwa campuran serpihan plastik jenis PET dan PVC dapat dipisahkan dengan menggunakan metode levitasi magnetik. Pada B_0 tetap, semakin tinggi konsentrasi yang digunakan, levitasi pada plastik PET dan PVC juga semakin tinggi. Pada konsentrasi tetap, semakin besar B_0 yang digunakan, levitasi pada kedua plastik semakin tinggi dan beda levitasi juga semakin lebar. Pada B_0 sebesar 0,476 T, larutan paramagnetik $MnCl_2$ dengan konsentrasi 3,0 M menghasilkan levitasi pada PET dan PVC tertinggi serta beda levitasi dengan jarak terbesar sehingga plastik PET dan PVC dapat terpisah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E., (2009), Plastics recycling: challenges and opportunities, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 2115-2126.
- [2] Burat, F., Güney, A., and Kangal, M.O., (2009), Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method, *Waste Management*, **29**, 1807-1813.
- [3] Takoungsakdakun, T. and Pongstabodee, S., (2007), Separation of mixed post-consumer PET-POM-PVC plastic waste using selective flotation, *Separation and Purification Technology*, **54**, 248 – 252.
- [4] Dvorak, R. and Kosior, E., (diunduh November 2011), Development of a continuous thermal separation system for the removal of PVC contamination in post-consumer PET flake, *IRIS*, Swinburne Univ. of Tech, Melbourne, Australia.
- [5] Scott, D.M., (1994), A Two-colour Near-infrared Sensor for Sorting Recycled Plastic Waste, *Meas. Sci. Technol.*, **6**, 156 – 159.
- [6] Park, C., Jeon, H., Hyo-Shinyu, Oh-Hyunghan, and Park, J., (2008), Application of Electrostatic Separation to the Recycling of Plastic Wastes: Separation of PVC, PET, and ABS, *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 249-255.
- [7] Dodbiba, G. and Fujita, T., (2004), Progress in Separating Plastic Materials for Recycling, *Physical Separation in Science and Engineering*, Vol. **13**, No.3-4, 165-182
- [8] Raj, K., (1987), Ferrofluids- Properties and Applications, *Materials & Design*, Vol. **18**, No. 4.
- [9] National Physical Laboratory, (2012), Magnetic Properties of Materials (www.kayelaby.npl.co.uk/).
- [10] Tanimoto, Y., Fujiwara, M., Sueda, M., Inoue, K., and Akita, M., (2005), Magnetic Levitation of Plastic Chips: Applications for Magnetic Susceptibility Measurement and Magnetic Separation, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. **44**, No. 9A, pp. 6801-6803.
- [11] 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.
- [12] Malerich, C., and Ruff, P.K., (2004), Demonstrating and Measuring Relative Molar Magnetic Susceptibility Using a Neodymium Magnet, *Journal of Chemical Education*, Vol. **81** (8), 1155.
- [13] Egami, S., Monjushiro, H., dan Watarai, H., (2006), Magnetic Susceptibility Measurements of Solutions by Surface Nanodisplacement Detection, *Analytical Sciences*, September, Vol. **22**.