

# Kontribusi *Filler* Magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4$ pada Efek Histerisis Magneto-Elastisitas Komposit Ferogel

Sunaryono\* dan Ahmad Taufiq

*Jurusan Fisika-FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111 dan  
Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Malang, Kampus UM, Malang 65145*

Nurdin

*Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Malang, Kampus UM, Malang 65145*

Darminto

*Jurusan Fisika-FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111*

## Intisari

Ferogel berbasis partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang diperoleh dari bahan dasar pasir besi Tulungagung telah berhasil difabrikasi. Ferogel merupakan komposit hidrogel (campuran polivinil alkohol dan air) dengan *filler* partikel magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dalam ukuran mikron dan nano. Hasil analisis difraksi sinar-X menunjukkan bahwa partikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ukuran mikron dan nano berturut-turut sesuai dengan pola difraksi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang memiliki no PDF 11-0626 dan no PDF 03-0863. Sedangkan dari hasil karakterisasi SEM dan TEM ukuran mikron partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sekitar 1-10  $\mu\text{m}$  dan ukuran nano partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sekitar 11-15 nm. Kontribusi *filler* magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada komposit ferogel dapat terlihat pada karakterisasi magneto-elastisitasnya. Ketika ferogel dipengaruhi oleh medan magnetik luar yang berubah terhadap fungsi arus listrik, respon gerak ferogel cenderung membentuk pola histerisis dan menyempit seiring berkurangnya konsentrasi. Ferogel dengan *filler* partikel mikron  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  lebih sensitif terhadap pengaruh perubahan medan magnet dibandingkan *filler* partikel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Hal ini disebabkan karena magnet remanen partikel mikron  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (8,233 emu/gr) lebih besar dibandingkan partikel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (7,995 emu/gr). Respon ferogel dalam kajian penelitian ini dapat dikembangkan untuk mensintesa otot buatan dengan pendekatan eksperimen mulai dari yang mirip penggerak pada robot sampai pada penggerak lunak yang lebih canggih.

## ABSTRACT

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  particles-based Ferrogels have been successfully fabricated from iron sands from Tulungagung as a main precursors. Ferrogels are hydrogels composites (Polyvinyl alcohol and water) with magnetite particles  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  as a filler in the range of micro and nanosize. XRD characterizations show that magnetic particles  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with both micro and nanosize are fully matched with XRD patterns of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  PDF number 11-0626 and 03-0863. Meanwhile, SEM and TEM images reveal that  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  microsize ranges from 1 to 10  $\mu\text{m}$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanosize ranges from 6 to 16 nm. Filler contribution of magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  on ferrogels composites can be conducted from its magneto-elasticity characterization. When ferrogels influenced by external magnetic field, the ferrogels response tend to form hysteresis shape and shifted by reducing magnetite concentration. Ferrogel with particles filler of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  microsize is more sensitive in external magnetic field than ferrogels with particles filler in nanosize. This phenomena is caused by remanent magnetic of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in microsize (8,233 emu/gram) which is higher than  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (7,995 emu/gram) in nanosize. Finally, the ferrogels response in this research can be developed as artificial muscles from simple until sophisticated actuator.

KATA KUNCI:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Ferogel, hydrogels, composites, magneto-elasticity

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan penelitian dalam rekayasa bahan material dengan mereduksi ukuran terus berkembang. Rekayasa re-

duksi ukuran partikel ini kita kenal dengan teknologi nano. Dalam bidang biosains dan bioteknologi aplikasi teknologi nano yang telah dikembangkan adalah separasi *Immunomagnetic* dari sel, penentuan dan pelacakan campuran aktif secara biologis, Imobilisasi dan modifikasi campuran aktif secara biologi, agen kontras untuk investigasi MRI, *magnetic fluid/hydrogel hyperthermia*, otot buatan [1]. Khusus pada aplikasi partikel magnetik *hydrogel hyperthermia* dan otot bu-

\*E-MAIL: yonomaterial@gmail.com

atan, partikel magnet dibuat berbentuk gel yang disebut ferogel. Ferogel ini merupakan kombinasi sifat magnetik dari *filler* magnet dan sifat elastik dari hidrogel. Karena pengaruh kombinasi sifat inilah, ferogel terjadi perubahan bentuk dan sifat termal ketika ada pengaruh medan magnet luar. Berbagai macam percobaan telah dilakukan untuk mengetahui kemampuan bahan ferogel yang dapat bersifat magneto-elastisitas dan magneto-termal.

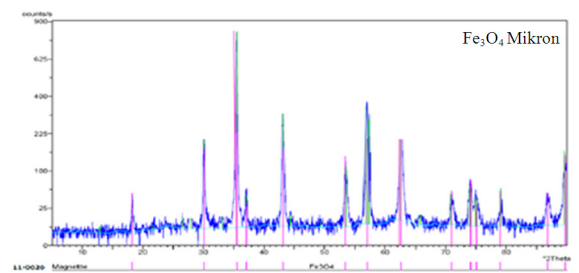
Ferogel mewakili sebuah jenis bahan baru yang menarik sebagai kombinasi sifat magnetik dengan sifat elastik dari sebuah jaringan. Ferogel (atau gel magnetik) terdiri dari partikel nano magnetik yang dilarutkan di dalam sebuah pengikat silang jaringan polimer. Kebergantungan jenis dan/atau konsentrasi salah satu polimer mampu mengontrol sifat viskoelastik dari bahan [2]. Ditambahkan, sifat-sifat magnetik dapat juga dibuat sebagai fungsi dari sifat dasar dan konsentrasi dari partikel nano [3]. Pencapaian pelarutan homogenitas yang baik dari partikel nano magnetik yang berada di dalam polimer merupakan sebuah persoalan penting. Percobaan pelarutan dalam menentukan jumlah nanopartikel di dalam sebuah polimer bulk telah menunjukkan bahwa nanopartikel cenderung teraglomerasi. Jika pelarutan dicoba didalam larutan polimer maka kemungkinan besar terjadi sedimentasi dari nano partikel, oleh karena itu bahan tidak akan terdistribusi secara uniform. Sebuah pendekatan dalam menentukan larutan homogen dari nano partikel di dalam polimer.

Dalam pengembangan sifat magneto-elastisitas ferogel, Li *et al.* [4] telah membuat gel dengan bahan dasar polimer yaitu *poly n-isopropyl acrylamide* (PNIPA) dan *polyacrylamide*. Zrinyi *et al.* [5] mengembangkan gel yang sensitif terhadap medan magnet. Dalam gel tersebut terdapat partikel magnet berbentuk koloid yang terdispersi didalamnya. Kemudian R.V. Ramanujan dan L.L. Lao [6] telah membuat komposit dengan bahan polivinil alkohol dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (ferrit). Penelitian yang dikembangkan adalah mensintesa otot buatan dengan pendekatan eksperimen mulai dari yang mirip penggerak pada robot sampai pada penggerak lunak yang lebih canggih. Mereka memadukan sifat elastik dari PVA gel dan sifat magnetik dari partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  berukuran mikrometer.

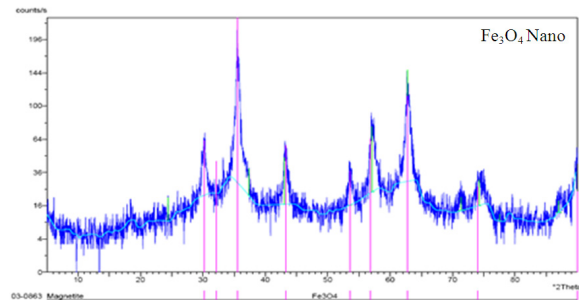
Kajian lebih mendalam dalam mempelajari perilaku mekanik ferogel perlu dilakukan untuk mengkarakterisasi sensitivitas konsentrasi *filler*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  di dalam ferogel untuk aplikasi otot buatan dengan pendekatan eksperimen mulai dari yang mirip penggerak pada robot sampai pada penggerak lunak yang lebih canggih.

## II. PROSEDUR EKSPERIMEN

Sintesis  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dalam ukuran mikron diperoleh dengan mengekstrak pasir besi menggunakan magnet permanen. Pasir besi hasil ekstrakan digerus dengan menggunakan *planetary ball milling* hingga terbentuk partikel berukuran mikron. Partikel hasil penggerusan di karakterisasi XRD, SEM, dan VSM untuk mengetahui berapa jumlah fasa, ukuran partikel dan sifat kemagnetannya. Dan sintesis  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dalam ukuran nano dilakukan dengan cara mengekstrak pasir besi menggunakan magnet permanen. Pasir besi hasil ekstrakan dilarutkan



(a)



(b)

Gambar 1: Hasil pola difraksi sinar-X dari partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ukuran (a) mikron dan (b) nano.

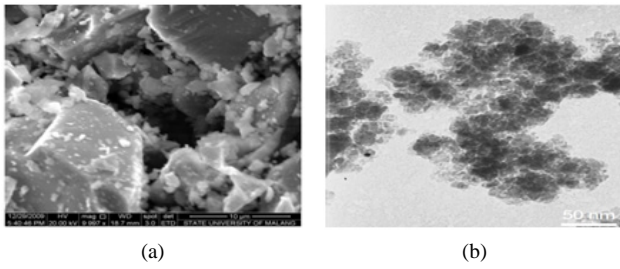
dalam HCl dan diendapkan di dalam larutan  $\text{NH}_4\text{OH}$  dengan metode kopresipitasi. Partikel hasil pengendapan di karakterisasi XRD, TEM, dan VSM untuk mengetahui berapa jumlah fasa, ukuran partikel dan sifat kemagnetannya.

Ferogel disintesis dengan mencampur PVA dan aquades dengan perbandingan massa 23:100. Campuran kemudian diaduk dan dipanaskan dalam magnetic stirrer pada suhu antara 70-90°C untuk meningkatkan kelarutan PVA dalam aquades. Setelah PVA benar-benar larut dalam aquades, kemudian  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dimasukkan dalam larutan dan diaduk hingga merata, dan larutan didinginkan dan dipanaskan secara berulang-ulang hingga terbentuk gel yang diinginkan. Ferogel yang telah terbentuk kemudian dibuat silinder dengan panjang 10 cm dan diameter 6 mm untuk karakterisasi magneto-elastisitas. Karakterisasi magneto-elastisitas ferogel dapat diketahui dari proses penyimpangan dan pemuluran ferogel dengan memvariasi perubahan kuat arus listrik.

## III. HASIL DAN DISKUSI

### A. Karakterisasi oksida besi ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

Gambar 1 adalah hasil pencocokan partikel mikron dengan *search match*. Hasil *search-match* menunjukkan bahwa partikel ukuran mikron memiliki pola difraksi yang sama dengan pola difraksi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang memiliki no PDF 11-0626. Sedangkan partikel ukuran nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  menunjukkan bahwa puncak yang terdeteksi pada pola difraksi didominasi fasa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Analisis *search match* untuk sampel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$



Gambar 2: Struktur mikro pengujian SEM partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hasil penggerusan dengan alat planetary ball milling (a), foto pengujian TEM partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hasil sintesis dengan metode kopresipitasi (b).

TABEL I: Besaran-besaran magnetisasi dan medan magnet partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

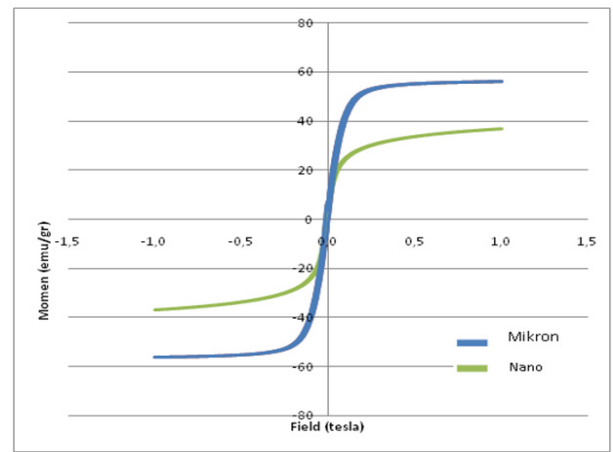
| Ukuran Partikel | M <sub>r</sub> (emu/gram) | M <sub>s</sub> (emu/gram) | H <sub>c</sub> (Tesla) |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1 - 10 μm       | 8,233                     | 56,220                    | 0,0169                 |
| 6 - 16 nm       | 7,995                     | 36,682                    | 0,0142                 |

menghasilkan pola difraksi yang sama dengan pola difraksi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang memiliki no PDF 03-0863.

Hasil pengujian SEM (Gambar 2) dengan perbesaran 10.000 kali menunjukkan bahwa ukuran Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> untuk partikel mikron sekitar 1-10 μm dan pengujian TEM (Gambar 2) dengan perbesaran 150.000 kali memperlihatkan bahwa distribusi ukuran Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> untuk partikel nano sekitar 11-15 nm. Hasil pengujian ini tidak jauh berbeda dengan ukuran kristal hasil difraksi sinar-X melalui perhitungan dengan persamaan Scherrer yaitu sekitar 5,857 nm. Dengan hasil ini dapat dikatakan bahwa partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> termasuk partikel primer, di mana partikelnya terdiri dari domain tunggal.

Data hasil keluaran pengujian VSM partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> berupa kurva histerisis magnetisasi (M) dengan medan magnet (T), seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Kurva histerisis hasil pengujian menentukan nilai magnetisasi saturasi (M<sub>s</sub>), magnetisasi remanen (M<sub>r</sub>), dan medan koersivitas (H<sub>c</sub>) dari partikel mikron dan nano, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Hasil pengujian VSM menunjukkan bahwa partikel mikron mempunyai nilai magnetisasi dan medan magnet yang lebih tinggi daripada partikel nano. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan ukuran diameter partikel. Diameter partikel dapat dibedakan menjadi dua bagian daerah yaitu daerah dengan domain tunggal dan domain jamak. Menurut Morrish dan Yu [7] partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> merupakan domain tunggal ketika diameternya 50 nm atau kurang, bahkan di dalam buku berjudul *the iron oxides* mengatakan bahwa partikel magnetik secara umum menjadi domain tunggal ketika partikel tersebut lebih kecil dari 100 nm dan batas ini merupakan fungsi dari sifat-sifat material [8]. Dari hasil difraksi sinar-X menunjukkan ukuran kristal Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> untuk partikel nano sekitar 5,857 nm dan diameter partikel hasil pengujian TEM sekitar 11-15 nm. Hasil ini dapat dikategorikan bahwa partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hasil sintesis termasuk partikel pada daerah domain tunggal.



Gambar 3: Kurva histerisis partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Dengan demikian partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hasil sintesis memiliki nilai magnetisasi dan medan koersivitas lebih rendah dari pada partikel mikro Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang termasuk daerah domain jamak.

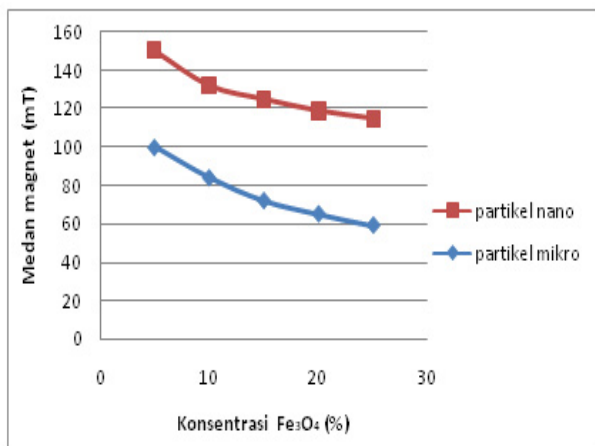
Ukuran partikel yang besar terdiri dari domain jamak yang memiliki momen-momen magnetik tertentu yang berbeda arah setiap domainnya. Ketika partikel diberi medan magnet luar, momen-momen magnetik akan berusaha menyesuaikan sesuai dengan arah garis gaya magnet dari luar tersebut. Semakin banyak momen magnetik yang tidak searah dengan medan luar, energi yang dibutuhkan untuk memagnetisasi akan lebih besar. Hal inilah yang mengakibatkan magnetisasi saturasi (M<sub>s</sub>) menjadi meningkat.

Semakin besar nilai magnetisasi remanen, maka semakin besar pula magnetisasi saturasi (M<sub>s</sub>) dan medan koersivitas (H<sub>c</sub>). Hal ini diakibatkan medan yang dibutuhkan untuk menghilangkannya semakin besar, karena magnetisasi remanen merupakan besarnya magnetisasi sisa yang masih bisa dimiliki oleh suatu bahan ketika medan luar mulai dihilangkan. Pada Tabel 1 dapat dilihat nilai magnetisasi remanen (M<sub>r</sub>) partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 8,233 emu/gram lebih besar dibandingkan partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 7,995 emu/gram, begitu juga untuk medan koersivitas (H<sub>c</sub>) pada partikel mikro Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> memiliki nilai yang lebih besar yaitu 0,0142 T dibandingkan dengan partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang besarnya 0,0169 T. Maka dapat disimpulkan bahwa partikel mikro Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> memiliki sifat kemagnetan yang lebih besar dibandingkan dengan partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

**B. Analisis data kontribusi filler magnetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> pada ferojel**

**Karakterisasi penyimpanan ferojel dalam pengaruh elektromagnetik**

Karakterisasi penyimpanan ferojel terhadap perubahan kuat arus listrik dilakukan untuk mengetahui perilaku simpanan dan respon filler Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> di dalam pengaruh elektromagnetik. Sebelum dilakukan karakterisasi penyimpanan ferojel akibat medan magnet perlu dilakukan pengujian



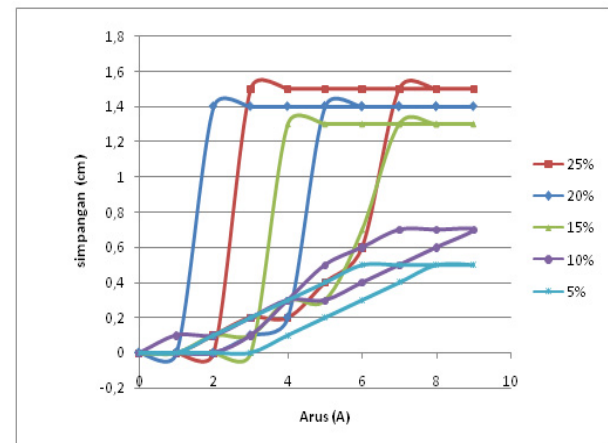
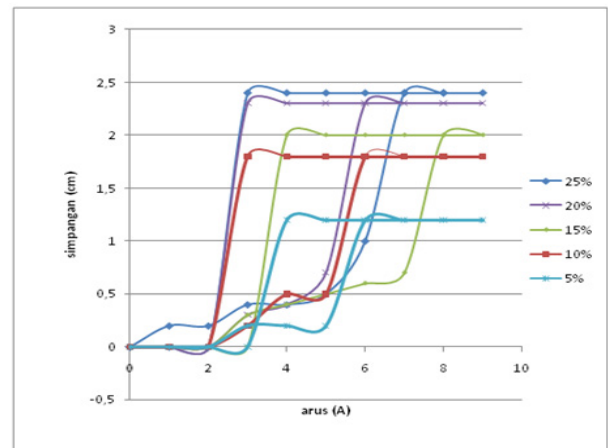
Gambar 4: Grafik batas ambang medan magnet dan konsentrasi *filler* magnetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

batas ambang medan magnet ferogel saat mulai menyimpang. Grafik hubungan batas ambang medan magnet dengan konsentrasi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dapat dilihat pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan bahwa partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> lebih sensitif terhadap medan magnet dari pada partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, hal ini ditunjukkan oleh lebih cepatnya respon ferogel dengan *filler* partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dibandingkan dengan partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Kesensitifitasan ini karena adanya pengaruh besarnya kandungan magnetisasi partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang terkandung pada ferogel.

Pola histerisis penyimpangan ferogel dilakukan dengan menaikkan dan menurunkan arus listrik yang mengalir melalui elektromagnetik. Kuat arus listrik divariasi antara 0 sampai 9 A dengan kuat medan magnet tertinggi sekitar 200 mT antara kutub elektromagnetik. Gambar 5 menunjukkan pola grafik hubungan antara kuat arus listrik terhadap simpangan ferogel pada berbagai konsentrasi. Saat arus listrik dinaikkan maka simpangan ferogel akan bertambah, sebaliknya jika arus listrik diturunkan maka simpangan ferogel akan turun. Lintasan ferogel saat arus dinaikkan berbeda dengan lintasan saat arus diturunkan. Naik turunnya simpangan ferogel akibat pengaruh medan magnet, membentuk suatu lintasan dengan pola histerisis. Pola histerisis ini dipengaruhi oleh dua hal yaitu adanya magnet remanen yang dimiliki oleh *filler* ferogel dan posisi awal antara ferogel dengan elektromagnetik. Magnet remanen yang dikandung ferogel mengakibatkan adanya magnet sisa pada ferogel, hal ini mengakibatkan ketika kuat medan magnet dikurangi maka ferogel tidak langsung lepas melainkan masih terus menyimpang.

Gambar 5 menunjukkan kecenderungan pola histerisis partikel mikron dengan konsentrasi *filler* Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> antara 5% hingga 25% dari berat ferogel. Karakterisasi histerisis membentuk pola menyempit dan menurun seiring berkurangnya konsentrasi. Peristiwa ini disebabkan adanya perbedaan kemampuan ferogel untuk menyimpang dan kembali ke posisi semula di dalam pengaruh perubahan kuat arus listrik. Perbedaan kemampuan tersebut dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi *filler* Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang mengisi ferogel. Semakin besar



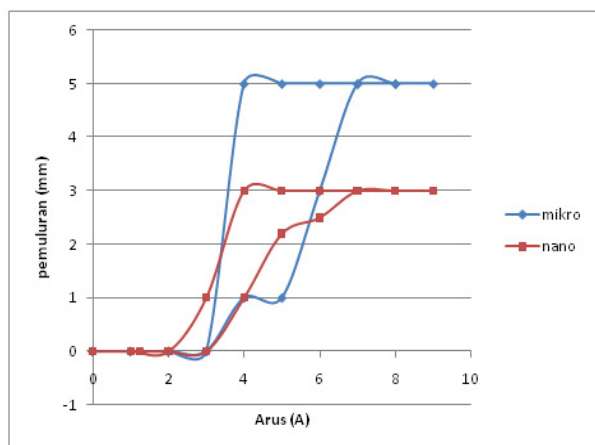
Gambar 5: Grafik hubungan antara simpangan ferogel terhadap perubahan kuat arus listrik, dengan variasi konsentrasi *filler* 5%, 10%, 15%, 20%, 25% untuk (a) partikel mikron (b) partikel nano.

konsentrasinya maka semakin besar pula kemampuan ferogel untuk menyimpang, dan sebaliknya ferogel akan memerlukan medan magnet yang cukup lemah untuk lepas ketika pengaruh kuat arus listrik dikurangi atau dihilangkan. Hal ini terkait dengan kandungan magnet remanen yang dimiliki ferogel. Semakin besar konsentrasi *filler* Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> maka kandungan magnet remanennya juga semakin besar.

Kecenderungan pola histerisis simpangan ferogel dengan *filler* partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sama dengan yang dialami oleh ferogel dengan *filler* partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Pola histerisis membentuk pola menyempit seiring berkurangnya konsentrasi. Pola histerisis ferogel dengan *filler* partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> lebih lebar daripada ferogel dengan *filler* partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Perbedaan ini dipengaruhi oleh kandungan magnetisasi saturasi yang dimiliki oleh masing-masing partikel sebagai akibat perbedaan ukuran partikel. Magnetisasi saturasi partikel mikron Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sebesar 56,05 emu/gram sedangkan partikel nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 36,26 emu/gram.

**Karakterisasi pemuluran ferogel dalam pengaruh elektromagnetik**

Hasil karakterisasi pola histerisis pemuluran ferogel di-



Gambar 6: Grafik hubungan antara pemuluran ferogel dan perubahan kuat arus listrik dengan konsentrasi *filler* magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

tunjukkan pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan grafik hubungan antara pemuluran ferogel dan perubahan kuat arus listrik dengan konsentrasi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  25% dari berat ferogel. Dalam penelitian ini karakterisasi hanya menggunakan ferogel dengan konsentrasi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sebesar 25% , karena pada konsentrasi dibawah 25% sulit diamati pemulurannya. Hal ini diakibatkan oleh terbatasnya medan magnet maksimum yang digunakan hanya sebesar 200 mT. Medan magnet yang lebih besar tidak dapat dihasilkan karena keterbatasan peralatan.

Gambar 6 memperlihatkan bahwa pola histeresis ferogel dengan *filler* berukuran nano lebih sempit daripada pola histeresis ferogel dengan *filler* yang berukuran mikro. Perbedaan ini disebabkan karena adanya perbedaan sifat kemagnetannya. Hasil VSM menunjukkan bahwa partikel nano mempunyai magnetisasi remanen yang lebih kecil dibandingkan dengan magnetisasi remanen partikel berukuran mikro. Magnetisasi remanen partikel mikro sebesar 8,233 emu/gr sedangkan partikel nano sebesar 7,995 emu/gram. Semakin kecil magnetik remanen maka semakin menyempit pola histeresisnya.

Pola histeresis hasil penelitian ini hampir sama dengan hasil yang diteliti oleh Zrinyi. Besar pemuluran yang didapatkan dalam penelitian yang dilakukan Zrinyi lebih besar hasil penelitian ini. Penelitian Zrinyi mampu menghasilkan pemuluran hingga 40% panjang semula sedangkan dalam penelitian ini untuk konsentrasi *filler* 15% dengan *filler* beruku-

ran mikro mampu menghasilkan pemuluran 13% panjang semula sedangkan *filler* berukuran mikro mampu menghasilkan pemuluran 7% panjang semula. Perbedaan ini terkait dengan dua hal yaitu bahan utama yang dipakai dan kuat medan magnet. Dalam penelitian ini bahan yang dipakai menggunakan PVA sedangkan Zrinyi menggunakan GDA (*glutardialdehyde*). Kuat medan magnet maksimum yang dipakai dalam penelitian ini sebesar 200 mT sedangkan Zrinyi mampu hingga 840 mT [9].

#### IV. SIMPULAN

Karakterisasi ferogel berbahan dasar pasir besi Tulungagung telah dilakukan. Berikut hasil-hasil yang dapat dilaporkan dari hasil eksperimen dan analisis data, yaitu:

1. Partikel mikro  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki sifat kemagnetan yang lebih besar dibandingkan dengan partikel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Hasil VSM menunjukkan bahwa partikel mikro memiliki nilai magnetisasi remanen ( $M_r$ ), magnetisasi saturasi ( $M_s$ ) dan medan koersifitas ( $H_c$ ) lebih besar dibandingkan dengan partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  berukuran nano. Nilai magnetisasi remanen ( $M_r$ ) partikel mikro sebesar 8,233 emu/gram sedangkan partikel nano sebesar 7,995 emu /gram. Magnetisasi saturasi pada partikel mikro sebesar 56,220 emu/gram, sedangkan partikel nano sebesar 36,682 emu/gram. Partikel mikro mempunyai medan koersifitas sebesar 0,0169 T sedangkan partikel nano sebesar 0,0142 T.
2. Perubahan medan magnet terhadap penyimpangan ferogel membentuk pola histeresis. Pola histeresis ini cenderung menyempit seiring berkurangnya kontribusi *filler* magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Perubahan konsentrasi mempengaruhi lebar pola histeresis kurva karena perbedaan kandungan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Lebar kurva histeresis pada partikel mikro lebih besar daripada lebar kurva histeresis partikel nano. Hal ini disebabkan magnet remanen partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  berukuran mikron lebih besar dibandingkan partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  berukuran nano.
3. Pola histeresis ferogel dengan *filler* berukuran nano lebih sempit daripada pola histeresis ferogel dengan *filler* yang berukuran mikro. Perbedaan ini disebabkan karena adanya perbedaan sifat kemagnetannya.

[1] R.V. Ramanujan, *Clinical application of magnetic nanomaterials*, Proceeding First International Bioengineering Conference, Singapore, 2004.  
 [2] R. Hernandez, *et al.*, *Polymer*, **45**(16), 5543-9 (2004).  
 [3] M. Zrinyi, *et al.*, *Polym Gels Networks*, **5**, 415-27 (1997).  
 [4] Y. Li, *et al.*, *J.Appl. Polym.Sci.*, **63**, 1173-8 (1997).  
 [5] M. Zrinyi and D. Szabo, *Muscular contraction mimicked by magnetic gels*, Proc. 7th Int. Conf. on Elektro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions (Honolulu, July 1999) ed. R Tao (Singapore: World Scientific) pp 11-7, 2000.  
 [6] R.V. Ramanujan, and L.L. Lao, *The mechanical behaviour of*

*smart magnet-hydrogel composites* (Institute of Physics Publishing, Smart Materials and Structures 15, 2006).

[7] A. H. Morrish, and S. P. Yu, *Physical Review*, **102**, 670-673 (1956).  
 [8] R.M. Cornell, and U. Schwertmann, *The Iron Oxides*(2nd ed. Weinheim. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2003).  
 [9] M. Zrinyi, *et al.*, *Direct observation of discrete and reversible shape transition in magnetic field sensitive polymer gels*, 2003, Available online: <http://www.kfki.hu/chem-info/hun/olvaso/zrinyi/polygel.html>