

ARTIKEL RISET

Material Magnetoelastik sebagai Alternatif Pengganti Otot Buatan

Arjun Prayoga Aji, Yeti Rafitasari, Harry Miyosi Silalahi, Tanty Dwi Purwita, Febrilian Dwi Laksono, and Fahrudin Nugroho*

Ringkasan

Aktuator elastik merupakan solusi rancang gerak kontinu pada bidang robotika. Penggunaan material magnetoelastik diusulkan sebagai alternatif aktuator elastik tersebut. Pada penelitian ini respon magnetik material magnetoelastik dikarakterisasi menggunakan set alat elektromagnet pada suhu kamar ($T = 27^\circ\text{C}$). Komposisi penyusun sampel magnetoelastik yang digunakan terdiri dari bahan basis silikon (RTV Gasket, RTV 585, RTV 52) dan bahan magnet ferimagnetik magnetite (Fe_2O_3). Respon sampel teramati akibat pengaruh medan magnet luar (\mathbf{B}). Melalui analisis grafik respon magnetik sampel dapat didekati dengan model persamaan kuadratik. Hasilnya adalah terdapat kompetisi antara sifat magnetik pengotor magnetite (Fe_2O_3) dengan total volume material magnetoelastik. Kompetisi kedua parameter tersebut bersifat tidak linier. Kompetisi ini bertanggung jawab atas hasil optimasi jenis dan optimasi konsentrasi. Jenis optimal bahan basis material magnetoelastik pada penelitian ini adalah RTV Gasket dan RTV 52, sedangkan konsentrasi optimal komposisi basis berbanding pengotornya adalah (50 : 50) % . Dalam penelitian ini juga diamati adanya sifat histerisis material magnetoelastik.

Kata Kunci : aktuator, elastik, histerisis, kompetisi, kontinu, tidak linier

Abstract

The elastic actuator is a solution for continuous motion design in robotics. The use of magnetoelastic material is proposed as an alternative to the elastic actuator. In this study magnetic response of magnetoelastic material was characterized using an electromagnetic apparatus at room temperature ($T = 27^\circ\text{C}$). The compositions of the magnetoelastic samples used in the present study consisted of silicone-based material (RTV Gasket, RTV 585, RTV 52) and magnetite ferimagnetic filler (Fe_2O_3). The sample response was observed due to the influence of the external magnetic field (\mathbf{B}). Through graphical analysis the magnetic response of the sample can be approximated by the model of quadratic equation. The result shows that the competition between the magnetic properties of magnetite (Fe_2O_3) and the total volume of magnetoelastic material do exist. The competition of both parameters is not linear and is responsible for the optimization results of type and concentration optimization. The optimal type of basis material of magnetoelastic material in this research is RTV Gasket and RTV 52 type, while the optimal concentration of basis material composition is (50 : 50) %. In this study also observed the hysteresis of magnetoelastic material.

Keywords: actuators; elastic; hysteresis; competition; continuous; non-linear

1 Pendahuluan

Sejauh ini aktuator pada robot-robot sebagian besar berbasis pada motor listrik, beberapa kerugian yang dimiliki, seperti keterbatasan ukuran dan bentuk, transmisi yang kompleks, gerakanya bersifat diskrit,

terbuat dari hard materials. Selain itu, aktuator yang telah ada tidak mudah dikontrol secara akurat, maka diperlukan suatu material lunak, elastis dan terkendali sebagai teknologi masa depan yang berbasis human engineering dan keselarasan antara mesin dan manusia [1]. Hingga saat ini kandidat material paling menjanjikan untuk dijadikan alternatif otot buatan adalah liquid crystal elastomer [2-4].

*Correspondence: fakhrud@ugm.ac.id

Department of Physics, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara PO BOX BLS 21, 55281 Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

Liquid Crystal Elastomer (LCEs) mengkombinasi sifat struktur anisotropik dari liquid crystal dan sifat elastik dari elastomer. Kombinasi ini memperlihatkan perubahan bentuk anisotropik yang reversible ketika diberikan pengaruh dari luar, seperti cahaya dan temperatur. Pengaruh temperatur memungkinkan LCEs untuk mengalami perubahan transisi fase volume. Perubahan volume diinduksi oleh perubahan penataan struktur gel kristal (liquid crystalline gel). Perubahan penataan struktur kristal (*liquid crystalline ordering*), seperti fase nematic dan smectic, merupakan sebab terbesar perubahan bentuk anisotropik LCEs [5-6]. Namun sintesis LCEs cukup sulit dan mahal.

Selain liquid crystal elastomer, pernah diusulkan juga otot buatan (*artificial muscles*) ferogel dan *dielectric elastomers* (DEs). Ferogel merupakan kombinasi sifat magnetik dari filler magnet dan sifat elastik dari hidrogel. Kombinasi sifat inilah menyebabkan perubahan bentuk karena adanya pengaruh medan magnet luar [7-8].

Dielectric elastomers (DEs) adalah material dielektrik lunak yang merespon pemberian voltase dengan perubahan bentuk mekanik (elektromekanik). Karena efek Maxwell *stress*, *membrane* DEs tertekan kemudian mengalami regangan aktuasi. Oleh karenanya DEs mampu mengalami perubahan bentuk mekanik yang cukup besar di bawah pembangkit elektromekanik AC [9].

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki komposisi bahan yang optimal dengan karakteristik dan parameter-parameter tertentu, sehingga didapat material dasar sebagai alternatif otot buatan atau *soft actuators*. Karakter pokok yang dikembangkan adalah gerakan kontinu dan terkendali. Sifat ini diperoleh dari kombinasi bahan magnetis dan bahan elastis, yang kemudian disebut magnet elastik (*magnetoelastic*).

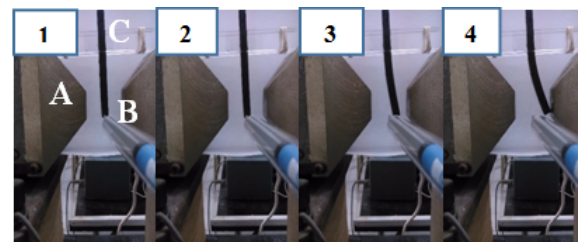
Pada aplikasinya yang lebih luas, material ini dapat bermanfaat pada bidang robotika, industri aeronautika, optik adaptif, biomedis dan pengamatan kesehatan struktural dan lain-lain [10]. Pada bidang robotika contohnya, pada kasus-kasus tertentu, rancang gerak robot merupakan hal yang esensial, sedemikian rupa sehingga dibutuhkan pergerakan yang kontinu dan terkendali.

2 Metode Eksperimen

Pada penelitian ini digunakan tiga jenis bahan elastis yaitu gasket, silikon RTV tipe 585 dan silikon RTV tipe 52. Sedangkan bahan bersifat magnetis yang digunakan berupa serbuk feromagnetik (Fe_3O_4) ukuran mikrometer (μm). Kedua macam bahan ini dicampurkan untuk masing-masing jenis dengan persentase konsentrasi Fe_3O_4 : bahan elastis bervariasi

antara lain 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30. Pencampuran bahan dilakukan pada gelas beker IWAKI 100 ml sebagai wadah takaran. Untuk mempermudah pengamatan data, campuran bahan dicetak pada cetakan yang didesain khusus. Cetakan material magnetoelastik dirancang dari bahan akrilik dengan dimensi ($1 \times 1 \times 10$) cm. Cetakan juga dilapisi mirror glaze agar pelepasan sampel magnetoelastik dari cetakan menjadi lebih mudah.

Uji bahan yang dilakukan adalah uji kelengkungan sampel magnetoelastik terhadap pemberian medan magnet dari luar. Maka diperlukan set alat pembangkit medan magnetik. Set alat yang digunakan adalah pembangkit medan magnet dengan power supply arus listrik DC 7 Ampere. Sebagai fungsi kontrol besar medan magnet yang dihasilkan digunakan pendeteksi medan magnet *Gaussmeter Lake Shore Model 475*.



Gambar 1 Skema percobaan untuk mengukur pengaruh medan magnet luar terhadap simpangan yang dibentuk oleh material magnetoelastik. Secara berurutan A, B, dan C adalah pembangkit medan magnet, probe *Gaussmeter*, sampel magnetoelastik. Dari kiri ke kanan 1,2,3, dan 4 menunjukkan medan magnet divariasikan semakin besar dan efeknya terhadap sampel.

Gambar 1 merupakan skema uji medan magnet luar terhadap sampel magnetoelastik. Medan magnet dari kiri ke kanan diberikan terhadap sampel magnetoelastik menyebabkan sampel ikut bergerak sesuai arah medan magnet dengan membentuk simpangan sudut dari titik seimbangannya. Simpangan sudut ini diamati menggunakan kamera CANON series EOS70D dengan pengambilan citra digital. Citra yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan software ImageJ sehingga diperoleh data simpangan (θ) untuk setiap pemberian medan magnet luar (B). Data tersebut kemudian diolah sehingga diperoleh sketsa grafik beserta besaran fisis karakteristik yang dicari.

3 Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini karakterisasi material magnetoelastik dilakukan. Material magnetoelastik yang digunakan menggunakan bahan pengotor serbuk magnetite (Fe_3O_4) ukuran mikro. Sedangkan bahan

basis karet yang digunakan antara lain: RTV Gasket, RTV 52, RTV 585.

Karakterisasi yang dilakukan adalah uji respon magnetik terhadap material magnetoelastik menggunakan set peralatan *electromagnet*. Sehingga diperoleh data variabel bebas medan magnet luar (**B**) dan variabel terikat sudut simpangan (θ) pada variabel kontrol suhu ruang ($T = 27^{\circ}C$). Kemudian beberapa analisis data digunakan untuk mengetahui karakteristik material magnetoelastik baik kualitatif maupun kuantitatif.

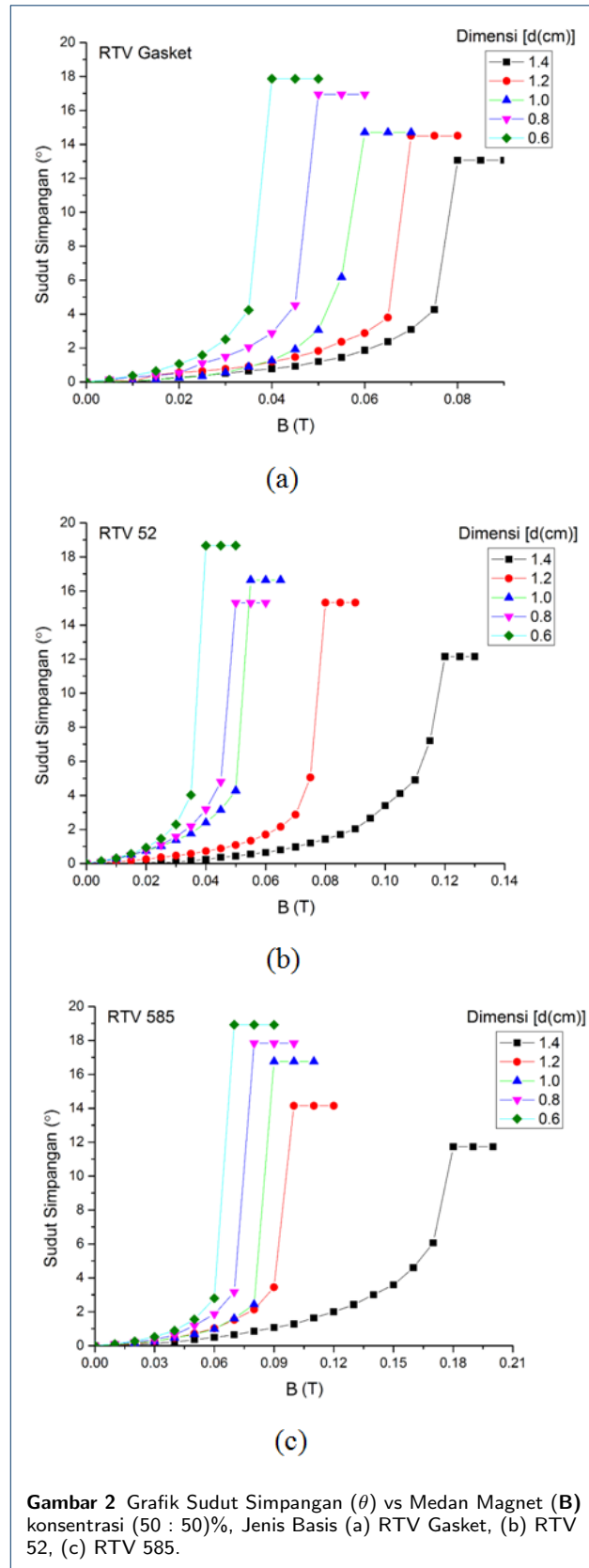
Berdasarkan data eksperimen, diperoleh grafik pada gambar 2. Secara visual grafik pada gambar 2, hubungan antara sudut simpangan θ dengan medan **B** teramati tidak linier melainkan kuadratik. Kemudian data terakhir pada kurva pada gambar 2 merupakan fenomena simpangan sampel magnetoelastik mengalami jenuh akibat simpangan maksimal yakni ketika material menyentuh kutub *electromagnet*. Pada konsentrasi ini, sampel dengan basis RTV Gasket teramati memiliki respon terbesar, yakni sudut simpangan θ teramati optimal dengan pemberian medan **B** yang lebih kecil dibanding sampel dengan basis lain.

Berdasarkan data dan grafik yang diperoleh, hubungan antar variabel diekspresikan secara kuantitatif melalui pengambilan nilai gradien dari kurva tersebut menggunakan persamaan 1 yang diusulkan sebagai berikut :

$$\theta = \chi_m \mathbf{B}^2 + C \tag{1}$$

Persamaan tersebut didefinisikan secara umum sebagai kemampuan material magnetoelastik untuk merespon pemberian medan magnet luar. Dalam hal ini, suseptibilitas magnetik (χ_m) material merupakan besaran fisis yang dilambangkan sebagai kuantitas kerentanan bahan. Suseptibilitas magnetik berbanding lurus dengan parsial derivative simpangan sudut (θ) terhadap kuadrat medan magnet (**B**) [11]. Kuadrat dari medan magnet luar (\mathbf{B}^2) direpresentasikan sebagai sifat material magnetoelastik yang mampu bergerak luwes (elastis) baik ke arah kanan maupun kiri sesuai arah medan magnet luar (**B**) yang diberikan. Kemudian *C* merupakan konstanta eksperimen. Sehingga dapat disimpulkan bahwa suseptibilitas magnetik (χ_m) merupakan besaran kuantitatif yang menunjukkan respon suatu material ferimagnetik terhadap pemberian medan magnet luar (**B**).

Nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) diperoleh melalui penarikan gradien menggunakan metode *fitting* data yang mungkin pada grafik 2 menggunakan persamaan



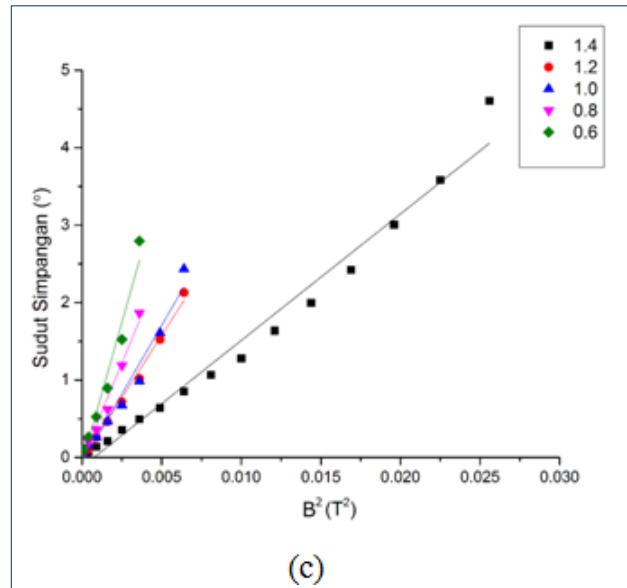
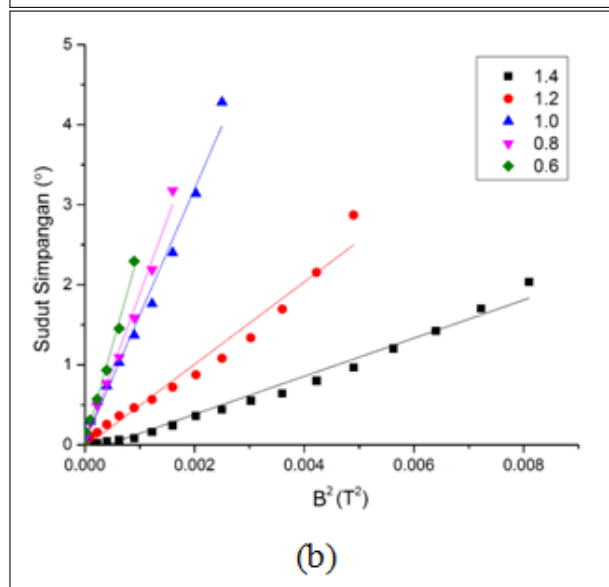
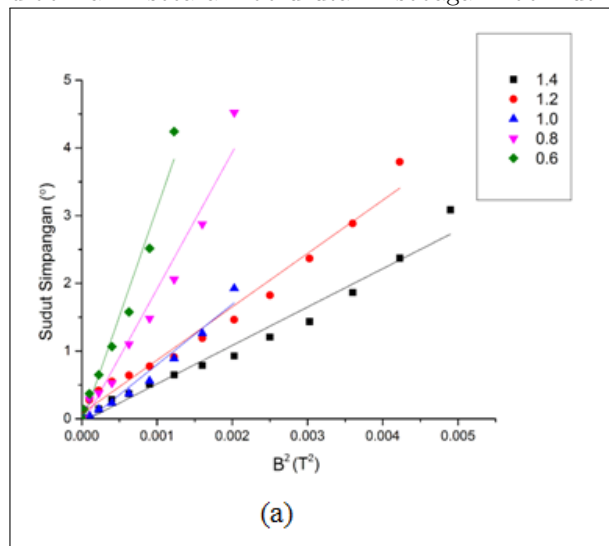
Gambar 2 Grafik Sudut Simpangan (θ) vs Medan Magnet (**B**) konsentrasi (50 : 50)%, Jenis Basis (a) RTV Gasket, (b) RTV 52, (c) RTV 585.

1, sehingga bentuk persamaannya menjadi seperti persamaan 2 berikut ini :

$$\chi_m = \frac{\partial \theta}{\partial B^2} + C \tag{2}$$

Melalui nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) ini nantinya proses optimasi data dilakukan.

Kemudian dijelaskan mengenai penarikan nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) sampel magnetoelastik dan optimasi sampel berdasarkan faktor-faktor tertentu. Dengan menggunakan persamaan 2 yakni persamaan yang menyatakan hubungan linier antara θ dengan B , ditarik gradien yang mungkin dari data hasil eksperimen. Penarikan nilai gradien dilakukan untuk masing-masing kurva pada gambar 2, kemudian plot gradien diberikan secara berurutan sebagai berikut :



Gambar 3 Grafik Sudut Simpangan (θ) vs Kuadrat Medan Magnet (B^2) konsentrasi (50 : 50)%, Jenis Basis (a) RTV Gasket, (b) RTV 52, (c) RTV 585 dengan dimensi bervariasi.

Grafik pada gambar 3.2 merupakan penarikan garis gradien dari grafik pada gambar 3.1 dengan metode fitting data yang mungkin. Teramati perbedaan respon untuk dimensi yang berbeda-beda. Hubungan linier antara respon sudut simpangan (θ) dengan pemberian kuadrat medan magnet (B) teramati. Oleh karena itu pendekatan persamaan yang diusulkan, dinilai mampu menggambarkan fenomena yang terjadi.

Dengan menggunakan analisis regresi dan standar deviasi, diperoleh nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) seluruh sampel magnetoelastik tersebut sebagaimana diberikan pada tabel 1 berikut :

Tabel 1 Nilai suseptibilitas ($\chi_m \pm \Delta\chi_m$) (0,017 rad/T²) sampel magnetoelastik pada konsentrasi (50 : 50)% dengan panjang teruji $l = 6, 5$ cm

d (cm)	RTV Gasket	RTV 585	RTV52
1,4	(567 ± 24)	(163 ± 5)	(242 ± 12)
1,2	(787 ± 25)	(322 ± 10)	(514 ± 24)
1,0	(889 ± 55)	(354 ± 23)	(1576 ± 56)
0,8	(2019 ± 132)	(489 ± 29)	(1862 ± 64)
0,6	(3191 ± 225)	(728 ± 56)	(2416 ± 88)

Tabel 1 merupakan data kuantitatif dari suseptibilitas magnetik (χ_m). Suseptibilitas χ_m sendiri merupakan parameter yang menunjukkan tingkat respon magnetik material magnetoelastik terhadap pemberian medan magnet luar (B). Dari tabel tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai standar deviasi untuk pengukuran dengan metode ini berkisar antara 3%-10%.

Secara kuantitatif, sampel dengan basis RTV Gasket mendominasi respon magnetik optimal jika

dibandingkan dengan sampel basis lainnya pada kondisi dimensi dan konsentrasi yang sama. Namun untuk dimensi 1,0 cm nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) optimal dimiliki oleh sampel dengan basis RTV 52. Proses seperti ini merupakan salah satu dari beberapa proses optimasi.

Proses optimasi bertujuan untuk memperoleh sampel magnetoelastik dengan respon optimal. Respon optimal yang dimaksud diwakili oleh nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) yang optimal. Melalui proses optimasi ini diharapkan diperoleh sampel material yang tergolong *soft magnetic material*.

Optimasi dilakukan berdasarkan faktor-faktor tertentu. Pada optimasi di atas, nilai (χ_m) optimal ditinjau pada faktor jenis basis sampel berbeda dengan faktor dimensi dan konsentrasi yang sama. Optimasi ini disebut **optimasi jenis** basis sampel. Optimasi lainnya adalah optimasi konsentrasi. **Optimasi konsentrasi** merupakan peninjauan nilai (χ_m) optimal pada faktor konsentrasi berbeda dengan faktor dimensi dan jenis basis yang sama. Proses optimasi efektif dilakukan setelah nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) terselidiki seluruhnya. Berdasarkan data eksperimen, diperoleh tabel optimasi sebagai berikut

		KONSENTRASI (BASIS : PENGOTOR)							
		(30:70)	(40:60)	(50:50)	(60:40)	(70:30)	(80:20)	(90:10)	
DIMENSI (d)	1.4	618	208	567	696	2	438	200	RTV GASKET
	1.2	437	330	787	541	144	271	308	
	1	410	788	889	726	303	210	777	
	0.8	652	1042	2019	1102	499	421	565	
	0.6	336	2196	3191	1074	1374	458	212	
DIMENSI (d)	1.4	67	107	163	358	90	76	44	RTV 585
	1.2	88	197	322	32	181	157	21	
	1	94	297	354	366	239	206	97	
	0.8	208	344	498	1009	670	110	114	
	0.6	406	2166	728	836	864	742	281	
DIMENSI (d)	1.4	265	606	242	82	120	284	401	RTV 52
	1.2	117	334	514	110	77	155	225	
	1	225	260	1576	452	454	213	147	
	0.8	961	912	1862	367	216	468	84	
	0.6	3366	5283	2416	2516	2511	601	338	

(a)

		(30:70)	(40:60)	(50:50)	(60:40)	(70:30)	(80:20)	(90:10)	
		RTV GASKET	1.4	618	208	567	696	2	
1.2	437		330	787	541	144	271	308	
1	410		788	889	726	303	210	777	
0.8	652		1042	2019	1102	499	421	565	
0.6	336		2196	3191	1074	1374	458	212	
RTV 585	1.4	67	107	163	358	90	76	44	
	1.2	88	197	322	32	181	157	21	
	1	94	297	354	366	239	206	97	
	0.8	208	344	498	1009	670	110	114	
	0.6	406	2166	728	836	864	742	281	
RTV 52	1.4	265	606	242	82	120	284	401	
	1.2	117	334	514	110	77	155	225	
	1	225	260	1576	452	454	213	147	
	0.8	961	912	1862	367	216	468	84	
	0.6	3366	5283	2416	2516	2511	601	338	

(b)

Gambar 4 Nilai Suseptibilitas Magetik (χ_m) pada Proses (a) Optimasi Jenis (b) Optimasi Konsentrasi Sampel Magnetoelastik

Hasil optimasi pada gambar 4 tersebut sebagai berikut :

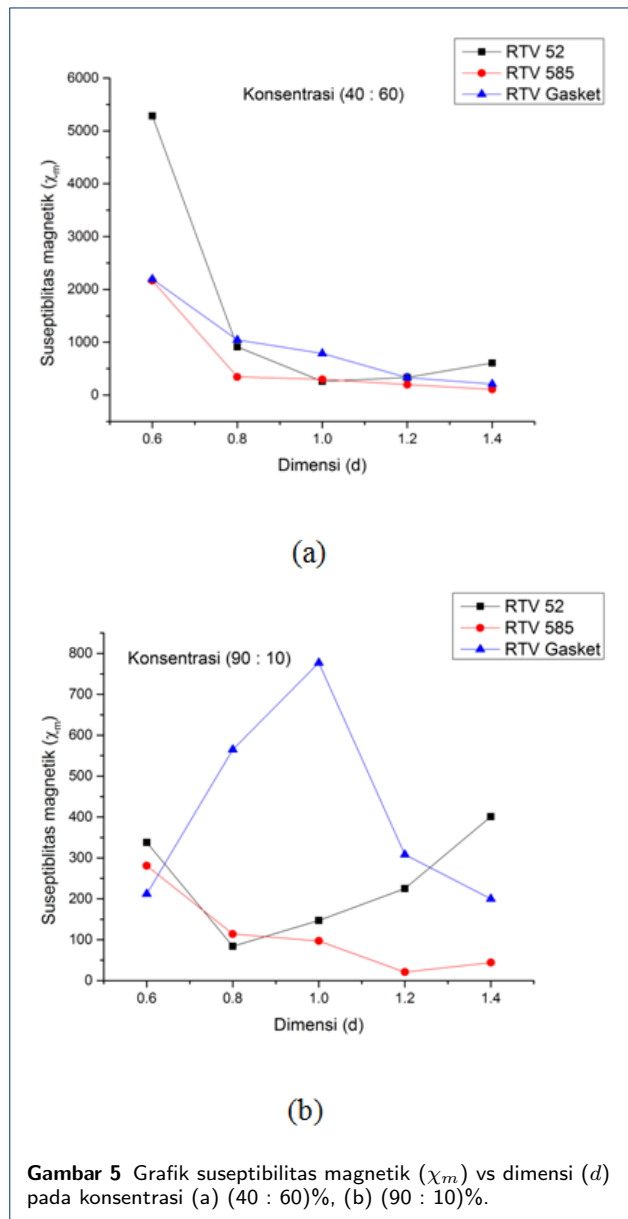
- 1 Optimasi konsentrasi berada di sekitar konsentrasi Fe_3O_4 : Basis Karet (50:50) %
- 2 Optimasi Jenis diperoleh RTV Gasket dan RTV 52 merupakan jenis optimal.

Jika tabel optimasi pada gambar 4. diamati dari sisi dimensi dengan faktor jenis dan konsentrasi tetap, maka didapati sampel magnetoelastik dengan dimensi kecil ($d = 0,6$ cm) dominan memiliki nilai suseptibilitas magnetic (χ_m) terbesar. Namun hal tersebut tidak terjadi di beberapa keadaan terutama pada konsentrasi serbuk magnetite (Fe_3O_4)10%.

Berdasarkan fenomena ini, diduga terdapat kompetisi antara bahan magnetis dan bahan elastis pada material magnetoelastik dalam merespon pemberian medanmagnet luar (B). Kompetisi ini dapat diwakilkan oleh besaran-besaran fisis melalui analogi dengan kompetisi yang terjadi pada persamaan rapat volume. Persamaan yang diusulkan adalah sebagai berikut :

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \rho_v = \frac{V_m}{V_{total}} \tag{3}$$

Berdasarkan persamaan 3 di atas, variabel yang mungkin untuk mewakilinya adalah suseptibilitas magnetik (χ_m) sebagai variabel yang mewakili volume magnetik (V_m) dan dimensi (d) sampel mewakili (V_{total}). Sehingga diperoleh beberapa grafik sebagai berikut :



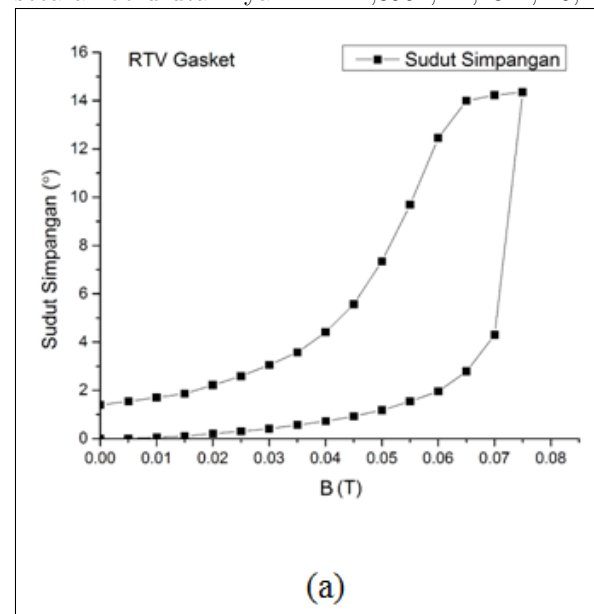
Gambar 5 merupakan grafik hubungan antara suseptibilitas (χ_m) dengan dimensi (d) sampel magnetoelastik. Gambar (a) merupakan grafik sampel

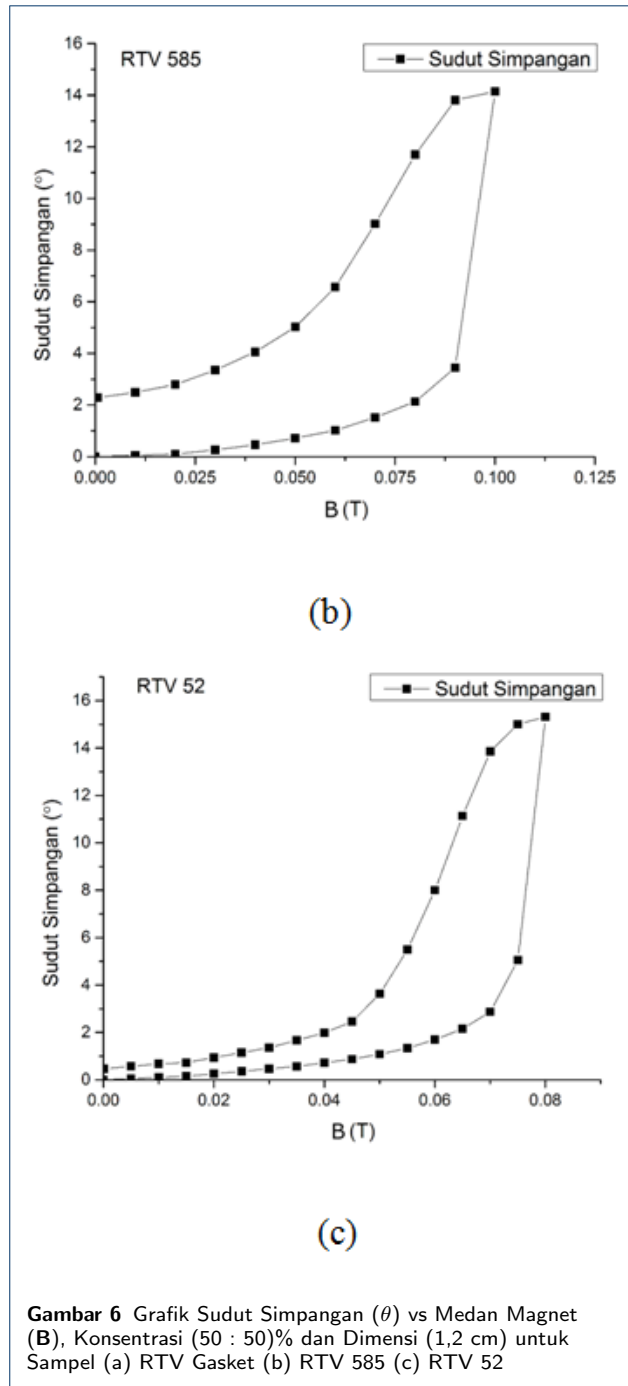
dengan konsentrasi magnetite (Fe_3O_4) mencapai 60% sedangkan gambar (b) hanya 10%. Grafik terlihat menunjukkan kurva naik dan turun (anomali) yang acak. Pada konsentrasi Fe_3O_4 tinggi, nilai suseptibilitas magnetik (χ_m) semakin menurun secara tidak linier dengan bertambahnya volume sampel. Ini menunjukkan sifat elastis sampel mendominasi hubungan kurva tersebut. Pada konsentrasi Fe_3O_4 rendah, kurva naik dan turun (tidak linier) teramati. Kurva turun menunjukkan sifat elastis sampel mendominasi dengan bertambahnya volume sampel. Sedangkan kurva naik menunjukkan sifat magnetis sampel mendominasi dengan bertambahnya volume sampel.

Dari kedua gambar tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa terjadi kompetisi antara volume pengotor (V_m) dengan volume total (V_{total}) yang mana kompetisi tersebut bersifat tidak linier pada tinjauan penelitian ini.

Kemudian dilakukan analisis histerisis material magnetoelastik. Berdasarkan data eksperimen, diperoleh grafik hubungan antara sudut simpangan (θ) vs medan magnet luar (B) pada gambar 6.

Berdasarkan grafik pada gambar 6 melalui pengamatan visual, histerisis teramati pada material magnetoelastik. Histerisis menunjukkan bahwa terdapat magnetisasi (M) yang tersisa pada keadaan sampel terbebas dari medan luar (B). Besaran fisis yang mewakili fenomena histerisis ini adalah magnetisasi remanen (M_r). Pada grafik di atas (M_r) tidak teramati, namun terdapat besaran fisis yang mampu mewakilinya keberadaannya, yakni sudut simpangan remanen (θ_r). Nilai θ_r untuk sampel RTV gasket, RTV 585 dan RTV 52 secara berurutan yakni : 1,395°, 2,284°, 0,464°.



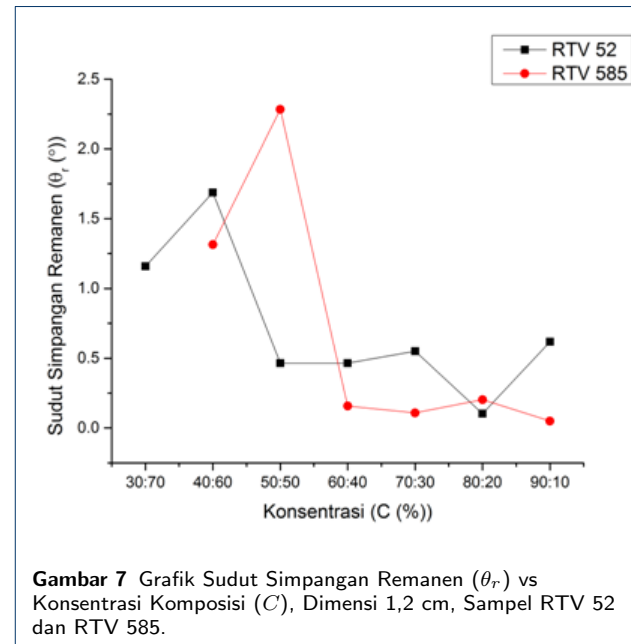


Untuk menelisik sifat histerisis sampel magnetoelastik lebih lanjut, plot hubungan antara sudut simpangan remanen (θ_r) dengan konsentrasi dilakukan. Tabel data hubungan tersebut diberikan oleh tabel 2.

Grafik hubungan dari tabel 2 tersebut diberikan pada gambar 7 berikut ini :

Tabel 2 Nilai sudut simpangan remanen (θ_r) sampel magnetoelastik terhadap konsentrasi (C) dengan panjang teruji $l = 6,5$ cm dan dimensi alas $d = 1,2$ cm.

$C(\%)$	$\theta_r(^{\circ})$ RTV52	$\theta_r(^{\circ})$ RTV585
(30:70)	1,159	-
(40:60)	1,688	1,314
(50:50)	0,464	2,284
(60:40)	0,464	0,157
(70:30)	0,550	0,108
(80:20)	0,102	0,203
(90:10)	0,618	0,05



Berdasarkan gambar 7, nilai kuantitatif simpangan remanen (θ_r) untuk masing masing bahan teramati berbeda-beda dan menunjukkan kurva yang tidak linier.

4 Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1 Respon material magnetoelastik terhadap pemberian medan magnet luar (B) dapat didefinisikan secara kuantitatif melalui pendekatan model kuadratik.
- 2 Diperoleh persamaan empiris yang menggambarkan fenomena magnetoelastik dalam pengaruh medan magnet luar :

$$\chi_m = \frac{\partial \theta}{\partial B^2} + C$$

Persamaan ini merupakan persamaan empiris yang menggambarkan adanya hubungan linier

antara sudut simpangan (θ) yang dibentuk dengan kuadrat pemberian medan magnet (**B**).

3. Campuran material feromagnetik (Fe_3O_4) dengan berbagai jenis karet telah dilaksanakan. Sehingga diperoleh konsentrasi optimal campuran kedua bahan tersebut adalah 50% volume Fe_3O_4 dan 50% volume karet. Sedangkan jenis optimal dimiliki oleh sampel magnetoelastik berbahan material gasket atau RTV 52.
 4. Material magnetoelastik mengalami histerisis terhadap pemberian medan magnet luar (**B**).
 5. Terdapat kompetisi antara volume magnetik pengotor magnetite Fe_3O_4 (V_m) dengan volume total (V_{total}) material magnetoelastik dalam merespon pemberian medan magnet luar (**B**).
 6. Kompetisi antara volume magnetik pengotor magnetite Fe_3O_4 (V_m) dengan volume total (V_{total}) material magnetoelastik dalam merespon pemberian medan magnet luar (**B**) bersifat tidak linier.
8. Zubarev, A.Yu., Elkady, A.S. : Magnetodeformation and elastic properties of ferrogels and ferroelastomers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **vol 413**, 400–408 (2014)
 9. Li, B., Zhang, J., Chen, H., Li, D.: Voltage-induced pinnacle response in the dynamics of dielectric elastomers. *Physical Review E* **vol 93**, 052506 (2016)
 10. Nguyen, V. Q., Ahmed, A. S. and Ramanujan, R. V. : Morphing Soft Magnetic Composites. *Advanced Materials* **vol 24**, 4041–4054 (2012)
 11. Zubarev, A.Yu., Borin, D.Yu. : Effect of Particle Concentration on Ferrogel Magnetodeformation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **Vol 377** , 373–377(2015)

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada RISTEKDIKTI yang telah membiayai kegiatan penelitian ini sehingga pelaksanaan kegiatan ini dapat berjalan lancar .

Pustaka

1. Yu, Ye dan Ikeda, T. : Soft Actuators based on Liquid-Crystalline Elastomers. *Angewandte Chemie International Edition* **vol 45**, 5416 – 5418(2006)
2. Yusuf, Y, Huh. Jong-Hoon, Cladis. P. E., Brand. H. R., Finkelmann. H, and Kai. S : Low-voltage-driven electromechanical effects of swollen liquid-crystal elastomers. *Physical Review E* **vol 71**, 061702 (2005)
3. Yusuf, Y, Ono. Y, Sumisaki. Y, Cladis. P. E., Brand. H. R, Finkelmann. H, and Kai.S : Swelling dynamics of liquid crystal elastomers swollen with low molecular weight liquid crystals. *Physical Review E* **vol 69**, 021710 (2004)
4. Yusuf, Y dan Triyana .K. : Kajian Dinamika Swelling dan Efek-Efek Termomekanik dan Termo-Optik dari Liquid Crystal Elastomers. UGM, Yogyakarta(2010)
5. Wu Z. L., Buguin A., Yang H., Taulemesse J. M., Moigne N, L., Bergeret A., Wang X., dan Keller P. : Microstructured Nematic Liquid Crystalline Elastomer Surfaces with Switchable Wetting Properties. *Advanced Functional Materials* **vol 23**,3070–3076 (2013)
6. Matsuyama, A. :Volume phase transitions of biaxial nematic elastomers. *Physical Review E* **vol 85**, 011707 (2012)
7. Caraka, T., Yörük, D., Demirci, S. : Preparation and Characterization Of Poly