

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 13 NOMOR 3

DESEMBER 2017

Perancangan Rem Linier Memakai Fluida MR dengan Kendali Arus Listrik Berbasis Fungsi Linier 179-184

Estiko Rijanto, Aditya Sukma Nugraha, Arif Sugiharto, Rifa Rahmayanti, dan Sapdo Utomo

Perancangan Rem Linier Memakai Fluida MR dengan Kendali Arus Listrik Berbasis Fungsi Linier

Estiko Rijanto, Aditya Sukma Nugraha, Arif Sugiharto, Rifa Rahmayanti, dan Sapdo Utomo
Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI),
Kampus LIPI, Jalan Sangkuriang, Gd.20, Bandung 40135
email: estikorijanto@gmail.com

Abstrak—Fluida magneto rheologi (MR) memiliki keunggulan dapat dikendalikan karakteristiknya menggunakan gaya magnet eksternal, sehingga banyak dimanfaatkan untuk alat elektro-mekanik. Namun, sampai saat ini aplikasi fluida MR untuk rem linier masih jarang. Artikel ini mengusulkan sebuah rancangan baru untuk rem MR linier. Rancangan ini memiliki jumlah kutub magnet jamak, dan inti pistonnnya dapat disambung serial. Telah diturunkan persamaan magneto-mekanik yang mengekspresikan gaya mekanik rem linier sebagai fungsi gaya magnet, dan persamaan elektro-magnetik yang mengekspresikan gaya magnet sebagai fungsi arus listrik. Sehingga diperoleh sebuah persamaan polinomial yang menghubungkan gaya mekanik rem sebagai fungsi dari arus listrik. Dengan memasukkan nilai dimensi geometris dan nilai permeabilitas magnet dari komponen-komponen penyusun rem linier tersebut, telah diperoleh aturan kendali untuk mewujudkan besar gaya rem yang diinginkan menggunakan pendekatan invers dari fungsi linier. Saat arus 1 A dialirkan ke kumparan maka didapat gaya mekanik rem sebesar 111,4 Newton. Besar gaya lain juga mudah diperoleh dengan cara mengendalikan arus listrik sesuai aturan kendali fungsi linier tersebut.

Kata kunci: *rem linier, fluida magneto rheologi, kendali arus listrik*

Abstract—Magneto rheological (MR) fluid has been used in various electro mechanical devices since it has advantages of being able to be controlled by external magnetic force. However, application of the MR fluid for linear brakes is still scarce. This article proposes a new design of linear MR brake. It has multiple magnetic poles, and its core can be connected in series inside the piston. Equations which express relationships between mechanical force and magnetic force as well as magnetic force and electric current have been derived. As a result, a polynomial function was obtained which expressed mechanical force of the brake as a function of electric current. Parameter values of geometric dimension and magnetic permeabilities of components were substituted into the equation, and a control law is proposed to control the brake force by manipulating current using the inverse of a linear function. When electric current of 1 A was supplied into the coil, brake force of 111.4 Newton was obtained. Various values of brake force can easily be realized by controlling electric current based on the derived linear function control law.

Keywords: *linear brake, magneto rheological fluid, electric current control*

Copyright © 2017 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Fluida magneto rheologi (MR) adalah material cerdas yang dapat dikendalikan karakteristiknya dengan mengatur arus listrik yang membangkitkan medan magnet. Oleh karena itu fluida MR dapat dimanfaatkan untuk membuat alat elektro-mekanik, misalnya alat pembangkit gaya mekanik yang dapat dikendalikan besarnya dengan mengatur arus listrik oleh pengendali elektronik.

Aplikasi fluida MR pada peralatan medis telah dibahas misalnya untuk umpan balik gaya pada robot operasi, sensor gaya untuk merasakan tumbukan dengan bagian dalam organ tubuh manusia, dan sistem rehabilitasi seperti kaki prostetik [1]. Damper MR bersama dengan motor

servo telah digunakan pada kaki prostetik, dan rem MR rotasi telah digunakan untuk ortosis pergelangan kaki.

Fluida MR digunakan untuk membangkitkan sensasi haptik pada sebuah master robot untuk alat kateter jantung manusia [2]. Pada alat tersebut fluida dimasukkan ke dalam tabung silinder yang diletakkan di tengah-tengah 2 kutub magnet. Silinder tersebut berdiameter 10 mm dan memiliki panjang 100 mm, sementara itu diameter kawat kateter adalah 3 mm. Dengan mengalirkan arus listrik sampai sebesar 2 A ke lilitan kawat, diperoleh gaya gesek dinamik sampai sebesar 0,45 N yang melawan gerakan maju/mundur kawat kateter pada kecepatan 5 mm/s dan 10 mm/s.

Untuk memperkuat gaya otot melalui latihan pada

prosedur rehabilitasi, sebuah mesin latihan isokinetik satu derajat kebebasan telah dibuat memakai rem MR rotasi [3]- [4]. Dengan memakai rem MR tersebut, sebuah mesin latihan yang simpel dan aman dapat diwujudkan dengan kecepatan rotasi yang akurat mencapai 900° per detik pada pergelangan siku. Produk fluida MR dimasukkan ke dalam tabung silinder yang membungkus piringan rem berdiameter 120 mm. Gap piringan sebesar 0,4 mm. Rem tersebut memakai empat buah yoke bertipe C yang terbuat dari lembaran tipis silikon steel berlaminasi. Dengan mengalirkan arus listrik sebesar maksimal 2 A maka rem MR rotasi tersebut dapat memproduksi torsi maksimum sebesar 27,5 Nm. Sebuah roda gigi dengan rasio kecepatan 4,41 digunakan untuk mendapatkan torsi pengereman efektif maksimum sebesar 120 Nm.

Kebanyakan aplikasi fluida MR pada produk yang telah dipasarkan adalah berupa damper MR untuk suspensi semi aktif. Perancangan, pembuatan dan evaluasi damper MR untuk suspensi semi aktif telah dipublikasikan oleh peneliti lain [5]. Damper fluida MR telah berhasil diterapkan pada sistem suspensi kursi di kendaraan besar. Sifat-sifat dan aplikasi dari fluida MR komersial telah dipublikasikan oleh peneliti lain terdahulu [6]. Tanggapan waktu damper MR telah dikaji melalui eksperimen [7]. Perkembangan berikutnya adalah pengembangan busa MR untuk damper [8], [9]. Kinerja tegangan geser dari damper MR berbasis busa metal telah diteliti [10].

Publikasi terkait aplikasi fluida MR untuk rem MR linear masih tergolong langka. Rancang bangun sebuah rem MR linear dengan konstruksi jalur medan magnet yang berkelok-kelok telah dipublikasikan oleh peneliti lain [11]. Rem MR linier tersebut memiliki keunggulan berupa: panjang stroke yang tidak terbatas, gaya offset yang kecil dan dimensi yang kompak.

Tujuan penelitian ini adalah merancang bangun sebuah rem MR linier yang berbeda dengan hasil penelitian yang telah dipublikasikan oleh peneliti lain sebelumnya. Rem MR linier yang diusulkan memiliki inti elektro magnetik multi kutub yang dimasukkan ke dalam sebuah piston. Jumlah inti piston tersebut dapat ditambah dengan cara menyambung secara linier untuk meningkatkan gaya pengereman sesuai kebutuhan.

Pada makalah ini disajikan perancangan rem MR linier tersebut. Pada Bab II diulas tentang landasan teori cara kerja fluida MR. Bab III menyajikan perancangan rem MR linier. Hasil perancangan dan pembahasan disajikan pada Bab IV. Terakhir pada Bab V ditarik kesimpulan.

II. LANDASAN TEORI FLUIDA MR

Pada bab ini diulas tentang landasan teori fluida MR mengacu kepada referensi [6], [2]. Tanggapan magneto rheologi dari fluida MR dihasilkan oleh polarisasi partikel yang terlarut di dalam cairan yang disebabkan oleh adanya medan magnet eksternal. Interaksi antar dua kutub magnet yang berbeda menyebabkan partikel membentuk struktur gugusan rantai yang paralel dengan arah medan magnet yang diberikan. Struktur ini melawan gerakan cairan, dan

meningkatkan karakteristik viskositas dari larutan. Energi mekanik yang dibutuhkan untuk menggeser struktur yang mirip rantai ini meningkat ketika medan magnet yang diberikan menguat. Efek ini meningkatkan tegangan ijin sebagai fungsi dari medan magnet. Ketika tidak ada gaya magnet yang diberikan, maka diasumsikan bahwa fluida MR berperilaku mengikuti hukum Newton. Dengan asumsi itu maka fluida MR dapat dimodelkan sebagai plastik Bingham yang memiliki kekuatan geser bervariasi. Di bawah pengaruh intensitas medan magnet H [A/m], hubungan antara tegangan τ [Pa], tegangan ijin yang tergantung medan magnet $\tau_y(H)$ dan tegangan geser fluida γ dapat dimodelkan oleh persamaan Bingham sebagai berikut.

$$\tau = G\gamma; \quad \tau \leq \tau_y(H). \quad (1)$$

$$\tau = \tau_y(H) + \eta\dot{\gamma}; \quad \tau \geq \tau_y(H). \quad (2)$$

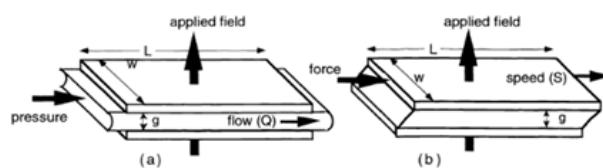
Dimana G adalah modulus material, η [Pa.s] adalah viskositas tanpa keberadaan medan magnet, dan $\dot{\gamma}$ adalah kecepatan geser. Modulus material tersebut juga nilainya bervariasi tergantung medan magnet. Ketika tegangan lebih kecil daripada tegangan ijin yang tergantung medan magnet, material tersebut bersifat viskos elastik. Namun demikian, pada kenyataannya fluida MR mungkin berperilaku menyimpang dari model di atas karena adanya karakter non-Newtonian saat tidak ada pengaruh medan magnet.

Alat elektro-mekanik yang memakai fluida MR dapat digolongkan ke dalam dua mode kerja yaitu mode aliran yang digerakkan oleh tekanan dan mode *shear* langsung. Gambar 1 menunjukkan diagram dari dua mode kerja tersebut [6]. Contoh alat yang bekerja pada mode aliran karena tekanan antara lain *damper*, *shock absorber*, dan *servo-valve*. Sedangkan contoh alat yang bekerja pada mode *shear* langsung adalah rem, kopling, dan kunci. Beda tekanan yang timbul pada alat dengan mode aliran karena tekanan terdiri dari komponen viskositas yang tidak tergantung medan magnet ΔP_η dan komponen tegangan ijin yang tergantung medan magnet diberikan ΔP_τ .

$$\Delta P_\eta = \frac{12\eta QL}{g^3 w}. \quad (3)$$

$$\Delta P_\tau = \frac{c\tau L}{g}. \quad (4)$$

Dimana: Q adalah debit aliran [m^3/s], dan τ adalah tegangan ijin yang dibangkitkan oleh medan magnet. Nilai parameter c berkisar antara 2 (saat $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta \leq 1$) sampai 3 (saat $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta \geq 100$). Total nilai beda tekanan pada mode aliran karena tekanan adalah jumlah ΔP_τ dan ΔP_η .



Gambar 1. Mode kerja dari fluida MR [6].

Sedangkan gaya yang ditimbulkan pada mode shear langsung terdiri dari komponen gaya viskos F_η dan komponen gaya tegangan ijin karena medan magnet F_τ .

$$F_\eta = \frac{\eta SLw}{g}. \quad (5)$$

$$F_\tau = \tau Lw. \quad (6)$$

Gaya total yang dibangkitkan pada mode shear langsung adalah jumlah F_η dan F_τ .

Untuk memudahkan analisa perancangan seringkali didefinisikan sebuah parameter yang dikenal sebagai volume minimum fluida aktif dengan melakukan substitusi dari persamaan (3) s.d. (6) sebagai berikut.

$$V = k \left(\frac{\eta}{\tau^2} \right) \lambda W_m. \quad (7)$$

dimana: $V=Lwg$ adalah volume minimal dari fluida aktif yang diperlukan untuk mendapatkan rasio kontrol λ pada level daya mekanik terkontrol yang dibutuhkan sebesar W_m . Parameter k adalah konstanta. Nilai V proporsional dengan perkalian tiga unsur yaitu: faktor karakteristik material fluida (η/τ^2), rasio kontrol λ , dan disipasi daya mekanik terkontrol W_m .

Dari definisi parameter volume minimal fluida aktif, dapat diturunkan batasan geometris sebagai berikut.

$$wg^2 = \frac{12}{c} \left(\frac{\eta}{\tau} \right) \lambda Q; \quad (\text{mode aliran}) \quad (8)$$

$$g = \left(\frac{\eta}{\tau} \right) \lambda S; \quad (\text{mode shear langsung}) \quad (9)$$

Pada mode shear langsung, untuk mendapatkan rasio kontrol dan kecepatan yang lebih besar diperlukan nilai gap yang lebih panjang.

Densitas daya mekanik dan daya elektrik dari sebuah alat MR diberikan sebagai berikut:

$$\hat{W}_m = \tau \dot{y}. \quad (10)$$

$$\hat{W}_e = \frac{BH}{2t_c}. \quad (11)$$

dimana: B [Tesla] adalah densitas fluks magnet, H [A/m] adalah intensitas medan magnet, dan t_c adalah konstanta waktu timbulnya medan magnet di fluida. Efisiensi fluida MR diberikan sebagai berikut:

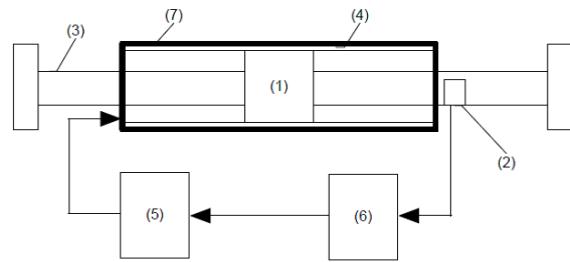
$$\eta = \frac{\hat{W}_m}{\hat{W}_e} = 2(t_c \dot{y}) \frac{\tau}{BH}. \quad (12)$$

Hubungan antara fluks magnet Φ [Gauss], densitas fluks magnet B [Tesla] dan luas penampang A [m^2] adalah [2]:

$$\Phi = BA. \quad (13)$$

Di dalam zona linier, densitas fluks magnet B dan intensitas medan magnet H [A/m] memiliki hubungan sebagai berikut.

$$B = \mu H. \quad (14)$$



Gambar 2. Sistem elektro-mekanik rem MR linier yang diusulkan.

dimana: μ adalah permeabilitas.

Rangkaian elektro magnetik mengikuti hukum Kirchoff sebagai berikut.

$$Hl = NI. \quad (15)$$

dimana I adalah arus listrik, N adalah jumlah lilitan, dan l adalah panjang lintasan medan magnet.

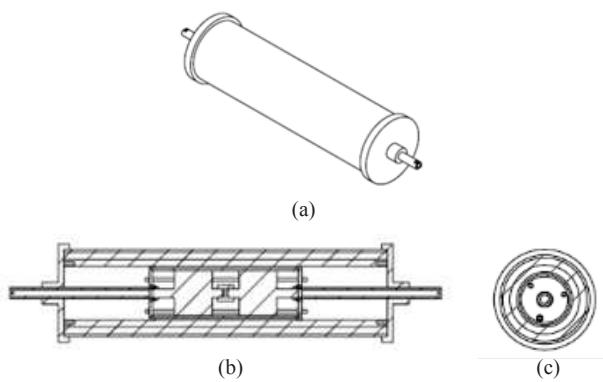
III. PERANCANGAN REM MR LINIER

Gambar 2 menunjukkan skema sistem elektro-mekanik rem MR linier yang diusulkan. Sistem ini tersusun oleh 7 elemen utama yaitu: (1) piston yang di dalamnya terpasang inti elektro magnet dan lilitan kawat listrik (kumparan) untuk membangkitkan medan magnet, (2) poros piston yang dapat disambung ke elemen aktif di luar rem, (3) poros pasif dengan ujung poros yang bebas, (4) tabung silinder yang tersambung ke lengan sambungan dudukan rem, (5) instrumen listrik yang mengalirkan arus listrik ke kumparan di dalam piston, (6) kontroler elektronik yang berfungsi mengontrol arus listrik, dan (7) fluida MR sebagai material cerdas yang berubah karakternya saat dilalui medan magnet.

Pada saat elemen aktif di poros piston digerakkan maju/mundur, maka piston dan poros pasif akan bergerak maju/mundur. Instrumen listrik mengalirkan arus listrik ke kumparan dan membangkitkan medan magnet yang menembus lapisan fluida MR di antara piston dan silinder. Fluida MR tersebut menciptakan gaya gesek antara permukaan luar piston dengan permukaan dalam silinder yang menghambat gerakan poros piston. Kontroler elektronik mengatur aliran arus listrik ke kumparan untuk mengontrol besar gaya rem yang diinginkan.

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi rem MR linier yang dirancang. Rem ini berbentuk silinder, tersusun oleh tabung silinder, tutup tabung silinder dan poros silinder seperti ilustrasi pada Gambar 3(a). Penampang aksial rem MR linier tersebut ditunjukkan pada Gambar 3(b), sedangkan penampang radial pada Gambar 3(c). Dari gambar ini nampak dengan lebih rinci komponen-komponen utama, antara lain: poros piston, inti piston, fluida MR, inti silinder, dan tabung silinder. Selain itu, terdapat komponen-komponen lain yaitu: tutup piston, tutup silinder, bearing aksial, dan mekanisme pengunci bearing.

Konstruksi yang diusulkan memiliki jumlah kutub magnet jamak, dalam hal ini 6 kutub Utara (N) dan 6



Gambar 3. Penampang aksial dan penampang radial rem MR linier yang diusulkan; (a). Penampakan 3 dimensi; (b).Penampang aksial; (c) Penampang radial

kutub Selatan (S). Dengan konstruksi ini maka gaya yang dibangkitkan lebih besar jika dibandingkan dengan rem MR konvensional yang memiliki jumlah kutub lebih sedikit (umumnya 1 kutub N dan 1 kutub S). Selain itu, mekanisme pada rem MR linier ini memungkinkan jumlah piston dapat ditambah secara sambungan serial menyesuaikan dengan keinginan.

Tabel 1 menunjukkan dimensi rem MR linier yang dirancang. Panjang silinder ditentukan sesuai dengan jumlah piston yang dipasang secara seri.

Inti piston dan inti silinder merupakan media penghantar (konduktor) magnet yang berfungsi sebagai jalan fluks magnet mengalir dari kutub N ke kutub S melintasi lapisan fluida MR. Untuk melindungi inti piston dan inti silinder dari pengaruh buruk sifat fluida MR, dipasang lapisan rumah dalam dan lapisan rumah luar. Komponen ini dibuat dari material yang mudah menghantarkan magnet dan tahan terhadap pengaruh buruk fluida MR serta tidak mudah aus karena gaya gesek mekanik.

Pada makalah ini hanya gaya penggeraman yang dibangkitkan oleh medan magnet yang dihitung sebagai berikut.

$$F = K_1 (\pi D_f L_{ip}) \tau_y (H). \quad (16)$$

Dimana: D_f adalah diameter lapisan fluida MR, L_{ip} adalah panjang inti piston, dan K_1 adalah konstanta dimensi. Konstanta dimensi ini diusulkan untuk merefleksikan luas penampang efektif dari fluida aktif.

Tegangan ijin $\tau_y (H)$ diperoleh dengan pemodelan fungsi

Tabel 1. Dimensi Rem MR Linier

Parameter	Nilai [mm]
Piston	
Panjang inti piston Lip (mm)	34
Radius dalam inti piston Ri (mm)	10
Radius luar inti piston Ro (mm)	20
Tebal lapisan fluida MR Tfmr (mm)	1,5
Silinder	
Radius dalam inti siliner Risi (mm)	24,5
Radius luar inti silinder Riso (mm)	34,5

Tabel 2. Nilai parameter fluida MR [12]

Parameter	Nilai
Viskositas plastik	0,112 Pa.s
Densitas	2,95-3,15 g/cm ³
Suhu operasi	-40 s.d. 130 °C
Intensitas magnet	250 k.Amper/m
Tegangan ijin	47 kPa

polinomial dari kurva $\tau_y - H$ yang merupakan persamaan magneto-mekanik fluida MR [12]. Tabel 2 menunjukkan nilai parameter fluida MR yang digunakan untuk merancang rem pada penelitian ini [12].

$$\tau_y = \frac{1}{10^3} \{-0,7 \cdot H^2 + 366,3 \cdot H - 44,6\}. \quad (17)$$

Dari ilmu elektromagnetik, intensitas medan magnet yang melewati fluida MR dapat diformulasikan secara analitik memakai konsep rangkaian listrik ekuivalen. Tahanan magnet dapat didefinisikan $R_m = l/(\mu A)$. Satuan dari tahanan magnet ini adalah $A/(T.m^2)$. Hubungan antara fluks maget Φ [Gauss], tahanan magnet R_m [A/(T.m²)] dan gaya magnet F_m [A.Turn] adalah sebagai berikut.

$$F_m = R_m \Phi. \quad (18)$$

Hubungan di atas ekuivalen dengan persamaan listrik dimana F_m ekuivalen dengan tegangan listrik dan Φ ekuivalen dengan arus listrik. Saat lintasan fluks magnet melewati beberapa komponen dengan sifat magnetik dan dimensi yang berbeda maka nilai total tahanan magnet adalah

$$R_{mT} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i A_i}. \quad (19)$$

Indeks i menunjukkan komponen yang bersangkutan. Sehingga didapat persamaan elektro-magnetik berikut ini.

$$\Phi = \frac{F_m}{R_{mT}}. \quad (20)$$

Tabel 3 menunjukkan nilai permeabilitas komponen penyusun rem RM linier yang dirancang.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

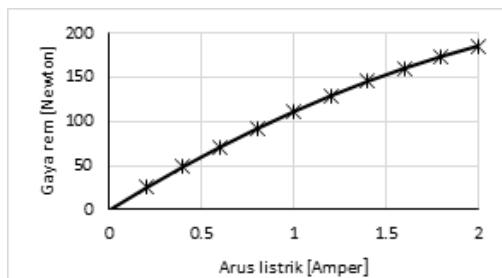
Dengan asumsi konstanta dimensi bernilai 1, maka dari persamaan (16) dan Tabel 2 diperoleh

$$F = \frac{4,75}{1000} \tau_y (H). \quad (21)$$

Dari persamaan elektro magnetik (18) - (20) di atas maka intensitas medan magnet yang bekerja pada lapisan fluida

Tabel 3. Permeabilitas Material

Material	Nilai Pemebilitas [m.T/A]
Fluida MR	7,536x10 ⁻⁶
Inti piston	5,024x10 ⁻³
Inti silinder	5,024x10 ⁻³



Gambar 4. Gaya rem MR linier hasil perancangan.

MR di rem MR linier yang dirancang dapat diperoleh:

$$H_f = 3.744,38(NI). \quad (22)$$

Gaya rem MR linier diperoleh dari rumus (17), (21), dan (22). Jumlah lilitan 20, dan gaya rem yang dihasilkan melalui metoda perancangan ini diplot pada Gambar 4.

Saat arus 0 Amper maka gaya rem 0 Newton, saat arus 1 Amper diperoleh gaya rem 111,4 Newton dan saat arus listrik 2 Amper diperoleh gaya rem 185,8 Newton. Dari hubungan antara gaya rem dan arus listrik tersebut diperoleh fungsi sebagai berikut.

$$F = -18,647 \cdot I^2 + 130,3 \cdot I - 0,2119. \quad (23)$$

Untuk memudahkan pengontrolan arus listrik berdasarkan gaya rem yang diinginkan, maka digunakan fungsi linier sebagai berikut.

$$F = 93,005 \cdot I + 10,976. \quad (24)$$

Dengan demikian maka kontrol gaya rem dapat dilakukan dengan mengatur arus listrik menurut aturan kendali di bawah ini.

$$I = \frac{1}{93,005} (F - 10,976). \quad (25)$$

Sebagai contoh, untuk memberikan gaya setara dengan berat barang 10 kg maka kontroler elektronik akan mengirim sinyal komando agar instrumen elektrik mengalirkan arus listrik ke kumparan rem MR linier sebesar

$$I = \frac{1}{93,005} (98 - 10,976) = 0,94 \text{ [Ampere].}$$

Pada artikel ini telah diuraikan usulan rancangan baru sebuah rem MR linier dan telah diperoleh aturan kendali untuk mewujudkan besar gaya rem yang diinginkan. Pengontrolan gaya pada artikel ini menggunakan pendekatan fungsi invers, dan tanpa memperhatikan dinamika sistem. Oleh karena tidak menggunakan pengendali umpan balik maka aturan kendali tersebut dapat disebut sebagai pengendali untai terbuka. Rencana selanjutnya, setelah prototipe rem selesai dibuat dan perangkat eksperimen siap digunakan, akan dilakukan penelitian lebih lanjut antara lain melakukan pemodelan gaya viskos dan gaya Coloumb, validasi metoda perancangan melalui eksperimen, memasukkan pengaruh dinamika sistem pada sistem kendali gaya rem, dan topik terkait lainnya.

V. KESIMPULAN

Sebuah rancangan baru untuk rem MR linier telah diusulkan. Rem tersebut memiliki 12 kutub magnet, dengan panjang inti piston 34 mm, radius luar inti piston 20 mm, dan tebal lapisan fluida MR 1,5 mm. Dari penurunan persamaan magneto-mekanik dan elektro-magnetik, telah diperoleh sebuah fungsi polinomial yang menghubungkan gaya mekanik rem sebagai fungsi dari arus listrik. Selain itu, telah diturunkan sebuah aturan kendali berupa fungsi inversi dari fungsi linier, sehingga arus listrik dapat dikendalikan untuk membangkitkan gaya mekanik rem yang diinginkan. Dari hasil perancangan disimpulkan bahwa rem MR linier ini dapat membangkitkan gaya rem sebesar 111,4 Newton saat dialirkan arus listrik sebesar 1 A. Besar gaya lain dapat diperoleh dengan mengatur besar arus listrik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Publikasi ini mendapat dukungan dana yang bersumber dari Program Inisiatif Riset Sistem Inovasi Nasional, INSINAS, gelombang 2 tahun anggaran 2017 dengan kontrak nomor: 04/INS-2/PPK/E/E4/2017. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kemenristekdikti dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) atas dukungan dana tersebut, khususnya kepada Direktorat Pengembangan Teknologi Industri, Direktorat Jenderal Pengembangan, Kemenristekdikti, dan Biro Perencanaan dan Keuangan LIPI.

REFERENCES

- [1] J. S. Oh and S. B. Choi, "State of the art of medical devices featuring smart electro-rheological and magneto-rheological fluids," *Journal of King Saud University - Science*, 2017.
- [2] Y. Song, S. Guo, L. Zhang and X. Yin, "MR Fluid Interface of Endovascular Catheterization Based on Haptic Sensation," in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin China, 2016, August 7-10.
- [3] K. Oda, S. Isozumi, Y. Ohyama, K. Tamida, T. Kikuchi and J. Furusho, "Development of Isokinetic and Iso-contractive Exercise Machine "MEM-MRB" Using MR Brake," in *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Kyoto Japan, 2009, June 23-26.
- [4] N. Takesue, J. Furusho and Y. Kiyota, "Fast Response MR-Fluid Actuator," *JSME International Journal, Series C*, vol. 47, no. 3, pp. 783-791, 2004.
- [5] A. Ashfak, A. Sheed, K. Rasheed and J. Jaleel, "Design, Fabrication and Evaluation of MR Damper," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronics and Manufacturing Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. -, 2009.
- [6] M. R. Jolly, J. W. Bender and J. D. Carlson, "Properties and Application of Commercial Magnetorheological Fluids," in *SPIE Vol.3327*, pp.262-275, 1999.
- [7] J. Koo, F. Gonzales and M. Ahmadian, "A comprehensive analysis of the response time of MR dampers," *Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing*, vol. 15, no. -, pp. 351-358, 2006.

- [8] J. Carlson and M. R. Jolly, "MR fluid, foam and elastomer devices," *Mechatronics, Pergamon*, vol. 10, pp. 555-569, 2000.
- [9] J. Guldbakke and J. Hesselbach, "Development of bearings and a damper based on magnetically controllable fluids," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 18, no. doi:10.1088/0953-8984/18/38/S29, pp. S2959-S2972, 2006.
- [10] X. Liu, X. Gao, F. Li, H. Yu dan D. Ye, "Shear Performance of a Metal Foam Magnetorheological Fluid Damper," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 5, no. 1, pp. -, 2015.
- [11] M. Alkan and H. Gurocak, "Control Strategies for a Linear MR-Brake with Serpentine Flux Path for Haptics," in *The ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes France, 2012.
- [12] LORD Corporation, "LORD Technical Data: MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid," LORD Corporation, NC - USA, 2011.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

