

PERANCANGAN EDDY CURRENT BRAKE PENGUNAAN ALUMINIUM UNTUK SISTEMPENGEREMAN SEPEDA MOTOR LISTRIK

Johan Firmansyah^{1*}, Galih Wibisono², Ariel Dwi Mahendra³

^{1,2} Universitas Al Hikmah Jepara, Teknik Mesin

³ Mahasiswa Universitas Al Hikmah Jepara, Teknik Mesin

Email^{1*} : Johanfirmansyah12@gmail.com

ABSTRAK

System pengereman dalam kendaraan bermotor menggunakan system pengereman yang memanfaatkan gesekan, penggunaan gesekan yang berlebihan akan menimbulkan penurunan performa pengereman. Eddy current brake (ECB) dapat menjadi sistem pengereman alternatif. ECB adalah system pengereman yang memanfaatkan arus eddy. Arus eddy dihasilkan oleh induksi ketika rotor berputar karena medan magnet yang dihasilkan oleh stator. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kelayakan disk sepeda motor sebagai rotor ECB dengan menggunakan variasi material, celah udara dan ketebalan disk. Metode elemen hingga (FEM) digunakan dalam pemodelan kinerja ECB. Hasil dari pengujian tersebut divalidasi menggunakan proses eksperimen. Hasil menunjukkan bahwa perlunya perpaduan disk sepeda motor dengan disk yang sesuai dengan ECB dengan torsi maksimal pada 12Nm.

Kata Kunci : Rem, Arus Eddy Rem, Elektromagnetik

ABSTRACT

The braking system in motorized vehicles uses a braking system that utilizes work, excessive use will cause a decrease in braking performance. Eddy current brake (ECB) can be an alternative braking system. ECB is a braking system that utilizes eddy currents. Eddy currents are generated by induction when the rotor rotates due to the magnetic field generated by the stator. This research aims to determine the suitability of motorbike disks as ECB rotors using variations in material, air gap and disk thickness. The finite element method (FEM) is used in describing the performance of the ECB. The results of these tests were validated using an experimental process. The results show that it is necessary to combine motorcycle disks with ECB-compliant disks with a maximum torque of 12Nm.

Keywords : Brakes, Eddy Current Brake, Electromagnetic

PENDAHULUAN

Salah satu bagian dari kendaraan bermotor yang menunjang keselamatan berkendara adalah rem. Rem merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengurangi atau menghentikan laju kendaraan. Secara geografis Indonesia memiliki banyak daerah yang memiliki banyak gunung dan bukit, sehingga banyak dijumpai jalan berupa tanjakan dan turunan. Selain itu seiring dengan kemajuan jaman menyebabkan semakin banyaknya jalan tol yang membutuhkan kecepatan tinggi. Pada jalan-jalan tersebutlah system pengereman sangat dibutuhkan.

Banyak penelitian mengenai sistem pengereman, salah satunya adalah penggunaan Eddy Current Brake (ECB) contohnya pada kendaraan berat yang menggunakan retarder arus eddy[1]. Selain dapat diaplikasikan pada kendaraan berat ECB telah diaplikasikan pada kendaraan dengan kecepatan tinggi seperti pada kereta api [2], [3] bahkan telah diterapkan pada kendaraan ringan seperti sepeda motor[4].

Arus eddy dihasilkan oleh induksi ketika rotor berputar dan memotong medan magnet yang dihasilkan oleh stator[5][6]. Arus eddy di rotor menghasilkan medan magnet. Interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan stator dan arus eddy menyebabkan gaya (dalam bentuk torsi pengereman) yang arahnya berlawanan dengan rotasi rotor[7].

Pengereman menggunakan ECB menghasilkan pengereman yang besarnya gaya pengereman sebanding dengan besarnya kecepatan putar. Besarnya torsi pengereman yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa parameter yang akan meningkatkan atau menurunkan performa saat dilakukan perubahan nilainya[8][9][10].

Penggunaan disk sepeda motor sebagai rotor ECB memerlukan kajian mengenai beberapa parameter. Dalam pengereman ECB terdapat pengaruh material[7][11], ketebalan disk[12] dan celah udara yang digunakan. Dalam penggunaannya disk brake sepeda motor akan mengalami penurunan diameter yang diakibatkan oleh gesekan pada proses pengereman. Pengaruh dari ketebalan disk dapat dilihat dari persamaan sebagai 1[12].

$$t = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

Dimana :

t = ketebalan (mm)

f = frekuensi (Hz)

μ = magnetic permeability (H/m)

σ = electrical conductivity (S/m)

Penggunaan material akan mempengaruhi performa dari ECB sendiri. Seperti dalam penggunaan material aluminium pada disk ECB ataupun menggunakan material besi[6][13] [14]. Dalam penggunaannya material ferro tidak terlalu cocok untuk digunakan sehingga perlu dilakukan penggantian material menjadi material non ferro [6][15] [16][17]. Ketebalan disk juga sangat berpengaruh dalam proses pengereman ECB. Dengan semakin kecilnya ketebalan disk yang digunakan akan mempengaruhi skin effect yang ditimbulkan, hal ini akan mengakibatkan perubahan performa pengereman[10][15]. Terdapat pengaruh celah udara yang digunakan. Namun pada celah udara ini akan berpengaruh juga pada critical speed yang dihasilkan[18][19]. Perubahan celah udara juga akan mengakibatkan perubahan performa dari pengereman ECB.

Banyak penelitian tentang sistem pengereman, salah satunya adalah penggunaan Eddy Current Brake (ECB) misalnya pada kendaraan berat yang menggunakan eddy current retarder [7]. Selain berlaku untuk kendaraan berat, ECB telah diterapkan pada kendaraan berkecepatan tinggi seperti kereta api [1] [4] dan bahkan telah diterapkan pada kendaraan ringan seperti sepeda motor [6], [8]. Ada banyak jenis material yang dapat digunakan sebagai konduktor pada eddy current brake. salah satu yang memiliki torsi terbaik adalah menggunakan bahan aluminium ini karena arus eddy yang terbentuk dari penggunaan konduktor aluminium

lebih efektif. Dalam percobaan yang dilakukan ada pengaruh celah udara yang diberikan, salah satu penelitian yang memberikan variasi dalam celah udara 1 mm, 3 mm dan 5 mm [9]. Selain itu, terdapat pengaruh dari panas yang ditimbulkan oleh pengereman yang dilakukan, namun pengaruh tersebut cukup kecil terhadap torsi yang dihasilkan[23]. Pengaruh suhu yang ditimbulkan oleh ECB dapat menyebabkan pergeseran pada *critical speed* dan nilai torsi yang dihasilkan[24]. Pada penelitian yang telah ada panas yang berpengaruh pada proses pengereman terdapat pada temperatur tinggi di sekitar 200 derajat celsius[25].

Rodrigues [7], melakukan penelitian mengenai ECB menggunakan analisis. Analisa yang dilakukan meliputi permasalahan torsi pengereman yang dihasilkan pada ECB, waktu pengereman dan analisa geometri dari sumber magnet yang digunakan. Penelitian menunjukkan waktu pengereman terendah terjadi saat menggunakan celah udara 1 mm. Dalam penelitian ini simulasi dilakukan dengan modifikasi celah udara yang berpengaruh pada waktu pengereman yang dapat diturunkan hingga 23.97%.

Kakaroc [9], menggunakan analisa FEM pada distribusi arus eddy. Pada penelitian ini dilakukan variasi distribusi arus eddy untuk meningkatkan kemampuan pengereman. Hasil modifikasi tersebut adalah ECB dapat menjadi pengganti penggunaan rem konvensional dengan beberapa kelebihan-kelebihan yang ditunjukkan pada penelitian tersebut.

Cho [20], melakukan penelitian dengan menggunakan metode analitis. Diawali dengan membuat perhitungan torsi pengereman dengan model drum yang dilapisi tembaga. Penelitian ini menggunakan perhitungan torsi dengan memperhatikan konduktivitas bahan dan variasi ketebalan lapisan yang digunakan. Dari penelitian ini diketahui bahwa torsi pengereman pada dua lapisan yang berbeda dapat dilakukan secara terpisah.

Luo [4], melakukan penelitian dengan menggunakan metode FEM untuk menghitung distribusi arus eddy saat ini dan medan magnet pada disk. Penelitian ini menggunakan lilitan dan bertujuan untuk membuat desain dari ECB yang dapat dipasang pada kendaraan kecil. Torsi pengereman elektromagnetik dihitung dengan algoritma konvensional. Hasilnya menunjukkan bahwa pengereman berjalan dengan baik, terutama pada kecepatan sedang dan tinggi.

Eksperimen sebelumnya telah menunjukkan bahwa perubahan celah dan material serta ketebalan dari konduktor ECB mempengaruhi torsi pengereman dan penyebaran fluks magnetik, tetapi masih ada sedikit informasi tentang kelayakan eddy current brake untuk mendukung rem sepeda motor. Oleh karena itu penelitian yang akan dilakukan kali ini akan diperiksa dalam simulasi konstruksi yang bertujuan untuk menemukan torsi pengereman dari konduktor ECB aluminium dengan memvariasikan ukuran celah udara yang disediakan dengan tujuan untuk menentukan kinerja pengereman ECB saat digunakan pada aplikasi ECB aksial menggunakan disk sebagai rotor.

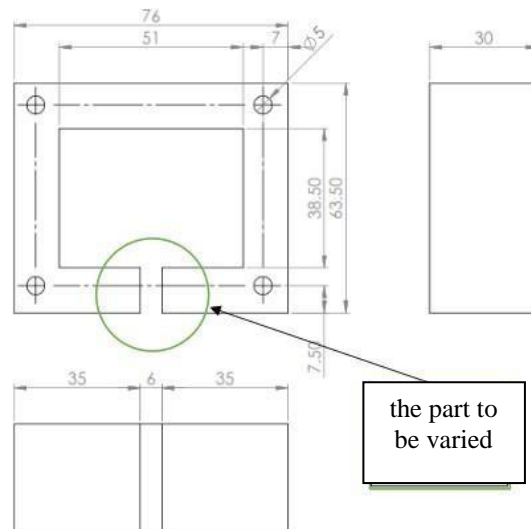
LANGKAH PENGUJIAN

Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan stator berupa elektromagnet dan dengan piringan rotor berupa disk brake berbahan aluminium dan besi dengan stator berbahan besi. Hasil simulasi yang dilakukan divalidasi terlebih dahulu dengan menggunakan variasi perubahan mesh. Dengan melihat fluktuasi data yang dihasilkan pada proses simulasi. Setelah mendapatkan data yang stabil dilakukan variasi material dan penggunaan celah udara serta ketebalan disk.

Pengaturan pada sistem pengereman dengan lilitan mengalirkan listrik dan akan menghasilkan medan magnet dari elektromagnetik. Dalam medan magnet tersebut akan timbul eddy current yang menimbulkan efek pengereman, pengereman inilah yang akan dianalisa hasilnya. Proses simulasi yang dilakukan dengan menggunakan perubahan material. Material yang pertama digunakan adalah besi karena disk sepeda motor pada umumnya menggunakan

material besi dan menggunakan disk dengan bahan aluminium untuk menggantikan material disknya. Selain melakukan variasi material, akan dilakukan variasi celah udara dan variasi ketebalan disk pada ukuran inti lilitan yang sama. Selanjutnya melakukan performa pengereman pada disk dengan melihat torsi yang dihasilkan. Pada pengujian celah udara diperhatikan bahwa inti lilitan memiliki ukuran yang berbeda sedangkan pada variasi ketebalan disk yang digunakan menggunakan ukuran inti lilitan yang sama.

Pengujian yang dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan 360 lilitan dan menggunakan arus sebesar 20A. Pengujian yang dilakukan menggunakan kecepatan putar yang bervariasi yaitu pada 150, 300, 450, 600 dan 750 rpm.



Hasil penelitian yang dilakukan dilakukan validasi pada data yang didapatkan dengan melakukan eksperimen. Eksperimen tersebut dilakukan dengan tujuan membandingkan data hasil eksperimen dengan simulasi yang telah dilakukan.

PROSES VALIDASI DATA

Proses simulasi yang dilakukan bertujuan untuk memperoleh data berupa torsi pengereman yang dihasilkan oleh ECB. Data ini digunakan untuk mengetahui karakteristik pengaruh perubahan celah udara terlebih dahulu yang digunakan terhadap unjuk kerja ECB berupa torsi pengereman dengan menggunakan elektromagnet sebagai sumber magnet yang digunakan. Model yang digunakan pada proses ini adalah menggunakan prinsip seperti disk brake konvensional.

Untuk mengetahui hasil dari simulasi sesuai dengan hasil yang real atau tidak dilakukan validasi dari proses simulasi yang digunakan. Salah satunya adalah dengan melakukan perubahan setting yang digunakan pada proses simulasi berupa *mesh* yang digunakan. Dalam proses ini dilakukan 4 macam perubahan *mesh* yang digunakan yaitu 5 mm, 10 mm, 15 mm dan 20 mm. *Mesh* yang dimaksud adalah ukuran nodal yang digunakan pada permukaan model yang akan digunakan seperti pada gambar.

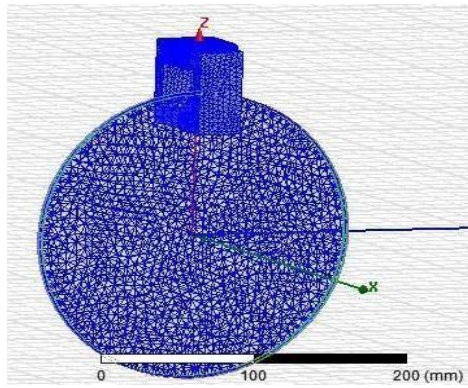


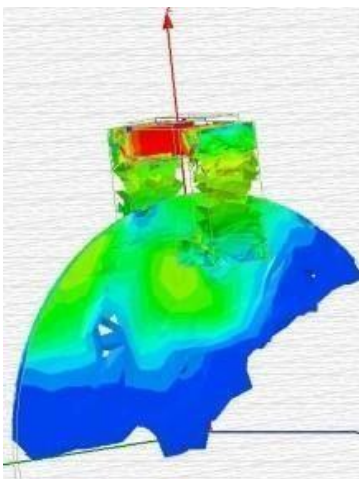
Figure 1. Meshing

Dari hasil perubahan yang ditunjukkan dapat diketahui bahwa semakin kecil nilai *mesh* yang digunakan membuat data hasil proses simulasi semakin stabil dan memiliki nilai deviasi rata-rata dari torsi yang dihasilkan cukup kecil. Nilai yang ditunjukkan oleh hasil dari perubahan nilai pada tabel yang menunjukkan hasil perubahan unjuk kerja yang dihasilkan.

Table 1. Hasil Validasi

Nilai <i>Mesh</i> yang digunakan (mm)	Torsi (Nm)	Deviasi Grafik
5	9,43	2%
10	9,42	8.5%
15	4,15	22%
20	4,02	26.5%

Berdasarkan tabel diketahui bahwa semakin kecil nilai *mesh* yang digunakan dapat menaikkan torsi maksimal yang dihasilkan. Torsi maksimal yang dihasilkan mengalami peningkatan hingga ukuran 10 mm, namun perubahan nilai hasil antara 10 mm dan 5 mm memiliki perbedaan nilai yang relatif kecil. Oleh karena itu, nilai *mesh* yang digunakan adalah 5 mm hal ini dikarenakan pada nilai tersebut perubahan torsi maksimal yang dihasilkan cukup kecil namun memiliki nilai deviasi data yang lebih kecil sehingga dapat menggambarkan hasil yang sesungguhnya.



PROSES EKSPERIMENTAL

Dalam penelitian ini dilakukan proses set up eksperimental. Proses ini bertujuan untuk memvalidasi keakuratan model yang digunakan, torsi pengereman diukur secara eksperimental seperti gambar. ICE digunakan untuk memutar disk dengan kecepatan sudut konstan. Lalu elektromagnet berfungsi sebagai pemasok fluks magnetik yang menembus area proyeksi kutub dalam disk. Torsi pengereman dihasilkan oleh interaksi medan magnet sekunder dengan konduktor berupa disk[21][22]. Torsi reaksi yang dihasilkan saat proses pengereman diterjemahkan menggunakan *load cell*. Akibatnya, torsi pengereman dapat diukur dengan membaca tegangan output dari *load cell*. Eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan arus 20A dan tegangan 12V dengan menggunakan 360 lilitan. Setting tersebut disesuaikan dengan proses simulasi yang telah dilakukan.

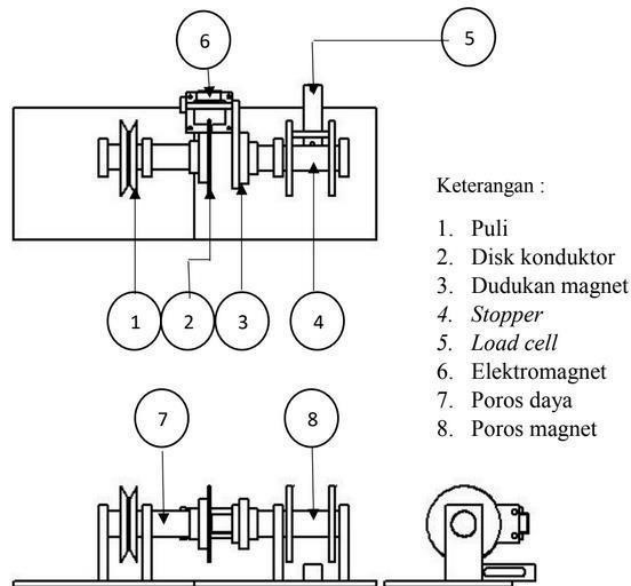
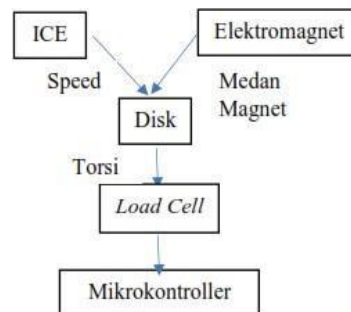


Figure 2 desain eksperimental



HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan proses validasi proses simulasi dilakukan variasi menggunakan material yang berbeda. Material yang digunakan adalah aluminium dan besi. Hal ini dikarenakan pada umumnya kendaraan yang ada menggunakan disk berbahan besi sedangkan material yang sesuai adalah material non ferro yang diwakili dengan aluminium. Pada pengujian ini dilakukan dengan ukuran inti lilitan sama.

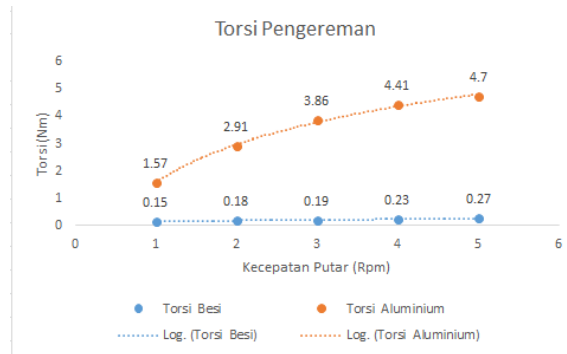


Figure 3

Pada variasi material yang digunakan menunjukkan bahwa material aluminium memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan besi. Hal ini diakibatkan oleh sifat dari material aluminium yang merupakan material non ferro. Selain itu penggunaan aluminium juga lebih baik karena memiliki kemampuan melepas medan magnet yang lebih baik dibandingkan dengan besi. Proses selanjutnya adalah simulasi dengan melakukan variasi pada ketebalan disk hal ini dilakukan karena dibutuhkan analisa terhadap pengaruh dari ketebalan disk terhadap torsi yang dihasilkan. Dengan menggunakan ukuran inti lilitan yang sama.

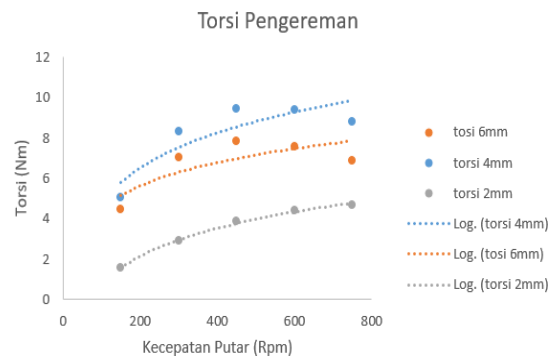


Figure 4

Setelah dilihat pada pengereman dengan menggunakan ukuran disk yang dilakukan menunjukkan bahwa semakin kecil ketebalan disk yang digunakan akan mengakibatkan penurunan performa pengereman. Pengereman yang digunakan menunjukkan bahwa perlunya memisahkan antara disk ECB dengan rem konvensional karena ketebalan disk akan mempengaruhi performa dari ECB. Hal ini disebabkan oleh ketika semakin tipis disk maka akan menurunkan nilai arus eddy yang dihasilkan. Sedangkan saat semakin tebal maka akan menyebabkan hambatan dari arus yang timbul semakin besar. Pada variasi celah udara yang dilakukan menggunakan bahan aluminium menunjukkan hasil seperti grafik

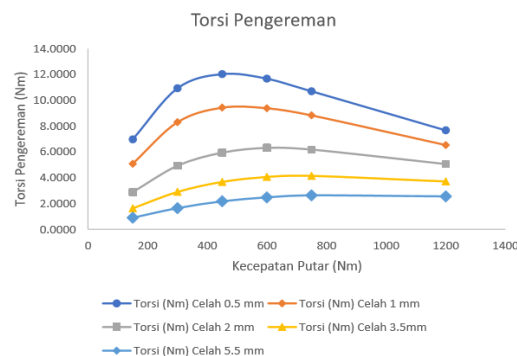


Figure 5

Data torsi pengereman yang dihasilkan menunjukkan peningkatan seiring dengan peningkatan kecepatan putar yang diberikan. Peningkatan torsi tersebut terjadi hingga titik kecepatan tertinggi hal ini dikarenakan semakin besar nilai celah udara yang diberikan akan mempengaruhi arus eddy yang ditimbulkan pada proses pengereman sehingga akan mengakibatkan interaksi arus eddy dengan material konduktor berkurang. Peningkatan torsi tersebut terjadi hingga titik *critical speed*, setelah melewati titik *critical speed* torsi yang dihasilkan mengalami penurunan. Munculnya titik *critical speed* ini sesuai dengan karakteristik ECB dengan material konduktor yang digunakan berupa aluminium yang merupakan material non ferro.

Dengan melihat pada gambar menunjukkan bahwa semakin kecil celah udara akan meningkatkan torsi pengereman pada kecepatan tertentu sebelum mencapai *critical speed*. Hal ini sesuai dengan teori yang ada yang dimana pengereman ECB menggunakan bahan konduktor non ferro akan menghasilkan grafik parabolik, dimana hasil yang ditunjukkan akan naik seiring dengan kenaikan kecepatan hingga mencapai *critical speed*. Setelah mencapai *critical speed* pengereman akan cenderung turun. *Critical speed* yang ditunjukkan dilihat dari tren data yang ditunjukkan pada grafik dengan memberikan penambahan nilai kecepatan di 1200 rpm. Hal ini bertujuan untuk melihat karakteristik dari ECB dimana dengan perubahan celah yang digunakan akan mengakibatkan bergesernya letak *critical speed*.

Berdasarkan pada proses simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa pada proses simulasi yang telah dilakukan memiliki trend yang sudah sesuai dengan penelitian terdahulu. Pada penelitian terdahulu diketahui bahwa trend yang ditunjukkan sudah sesuai dengan karakteristik dari ECB. Untuk mengetahui apakah data yang didapatkan dari proses simulasi valid atau tidak maka perlu dilakukannya verifikasi data. Pada verifikasi ini dilakukan proses pembuatan eksperimen menggunakan celah 1 mm. Celah 1 mm dipilih karena lebih mudah dalam proses pembuatannya.

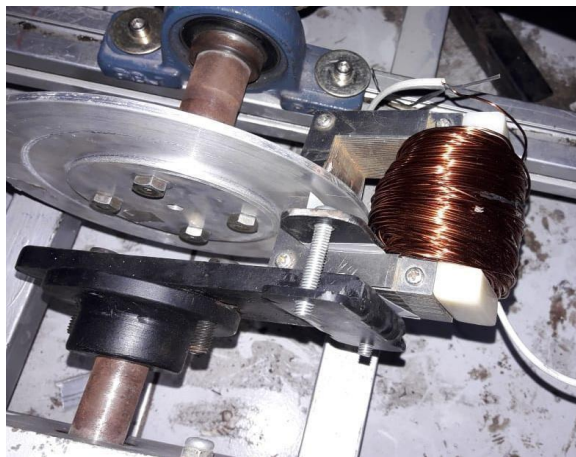


Figure 6

Dari proses eksperimen yang dilakukan didapatkan hasil perbandingan antara torsi hasil simulasi dengan torsi dari eksperimen yang ditunjukkan pada gambar dibawah.

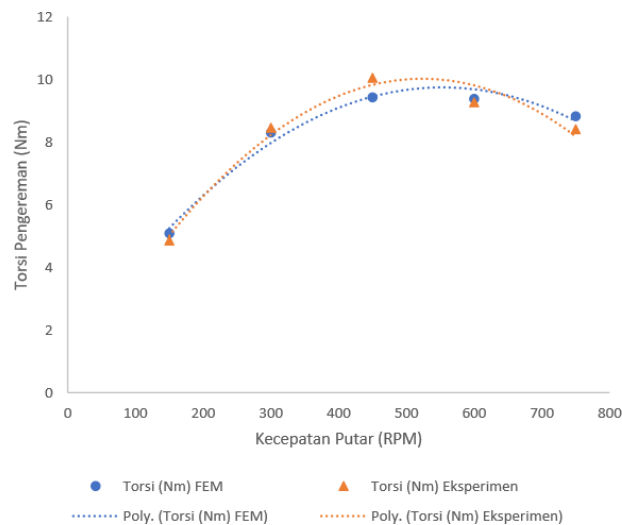


Figure 7

Unjuk kerja pengereman yang ditunjukkan oleh ECB memiliki perbedaan antara nilai pada proses FEM dan eksperimen. Perbedaan ini disebabkan oleh panas yang ditimbulkan oleh lilitan, selain itu pada eksperimen yang dilakukan menggunakan *bracket* elektromagnet yang digunakan berupa material besi yang mempengaruhi performa dari ECB dan terdapat pengaruh seperti getaran pada *engine stand* sehingga mempengaruhi data yang terbaca pada *load cell*. Selain itu terdapat pengaruh dari panas yang dihasilkan selama proses pengereman yang dihasilkan, namun pengaruh tersebut cukup kecil terhadap torsi yang dihasilkan. Dalam pengereman menggunakan ECB pengaruh suhu dapat menyebabkan pergeseran pada *critical speed* dan nilai torsi yang dihasilkan. Pada penelitian yang telah ada panas yang berpengaruh pada proses pengereman terdapat pada temperatur tinggi di sekitar 200 derajat celsius. Proses pengereman menggunakan ECB juga mampu mereduksi waktu pengereman yang dibutuhkan sesuai dengan penelitian yang telah ada. Namun, secara garis besar data hasil simulasi sudah sesuai dengan keadaan nyata.

KESIMPULAN

Ada banyak parameter ECB yang perlu dikembangkan. Untuk mengetahui karakteristik pengereman di ECB, pemodelan perlu dilakukan dengan menggunakan FEM. Dari proses pemodelan karakter ECB akan diperoleh dalam bentuk torsi. Karakteristik yang dipelajari dalam penelitian ini dilakukan melalui karakteristik proses FEM. Torsi pengereman dipengaruhi oleh parameter ECB. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa celah udara yang lebih kecil akan meningkatkan torsi pengereman. Ini memberikan gambaran tentang efek perubahan desain yang diberikan. Pada penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan perubahan jenis material, ketebalan disk dan celah udara yang digunakan diketahui bahwa material dari disk berupa besi tidak cocok sebagai disk dari ECB sehingga perlu menggunakan material aluminium sebagai disk ECB atau dapat dilakukan dengan memadukan kedua jenis material tersebut. Semakin kecil ketebalan disk maka akan menurunkan performa pengereman dari ECB sehingga perlu dipisahkan dengan pengereman konvensional dimana pada pengereman konvensional terjadi pengurangan ketebalan setelah digunakan. Semakin besar celah udara yang digunakan akan menurunkan performa dari ECB. Torsi pengereman terbaik yang dihasilkan adalah menggunakan bahan aluminium menggunakan celah udara 0.5 mm dengan ketebalan disk 4 mm yaitu 12Nm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. N. Bae, Y. E. Kim, Y. W. Son, H. S. Moon, C. H. Yoo, dan J. Lee, "Self-Excited Induction Generator as an Auxiliary Brake for Heavy Vehicles and Its Analog Controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, hal. 3091–3100, 2015.
- [2] S. Cho *et al.*, "Design and Analysis of the Eddy Current Brake with the Winding Change," vol. 22, no. 1, hal. 23–28, 2017.
- [3] X. Lu, Y. Li, M. Wu, J. Zuo, dan W. Hu, "Rail temperature rise characteristics caused by linear eddy current brake of high-speed train," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 1, no. 6, hal. 448–456, 2014.
- [4] L. Luo, Q. Zhai, W. Li, C. Qian, dan H. Liu, "Research on an integrated electromagnetic auxiliary disc brake device for motor vehicle," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 12, no. 3, hal. 434–439, 2017.
- [5] J. H. Wouterse, "Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles," *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 138, no. 4, hal. 153, 1991.
- [6] S. Cho, H. C. Liu, H. Ahn, J. Lee, dan H. W. Lee, "Eddy Current Brake with a Two-Layer Structure: Calculation and Characterization of Braking Performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, 2017.
- [7] O. Rodrigues, O. Taskar, S. Sawardekar, H. Clemente, dan G. Dalvi, "Design & Fabrication of Eddy Current Braking System," hal. 809–815, 2016.
- [8] M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas, dan A. K. Atalay, "Determination of the effect of conductive disk thickness on braking torque for a low power eddy current brake," *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, hal. 1272–1276, 2013.
- [9] K. Karakoc, E. J. Park, dan A. Suleman, "Improved braking torque generation capacity of an eddy current brake with time varying magnetic fields: A numerical study," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 59, hal. 66–75, 2012.
- [10] A. Sinmaz, M. O. Gulbahce, dan D. A. Kocabas, "Design and finite element analysis of a radial-flux salient-pole eddy current brake," *ELECO 2015 - 9th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, no. 1, hal. 590–594, 2016.
- [11] K. Karakoc, A. Suleman, dan E. J. Park, "Analytical modeling of eddy current brakes with the application of time varying magnetic fields," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 2, hal. 1168–1179, 2016.
- [12] G. L. A. Krishna dan K. M. S. Kumar, "ScienceDirect Experimental Investigation of Influence of Various Parameters on Permanent Magnet Eddy Current Braking System," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, hal. 2575–2581, 2018.
- [13] B. Kou, Y. Jin, H. Zhang, L. Zhang, dan H. Zhang, "Modeling and Analysis of Force Characteristics for," vol. 50, no. 11, 2014.
- [14] M. Z. Baharom, "Electromagnetic Braking System Using Eddy Current for Brake Disc of Al6061 and Al7075," no. December 2014, 2012.
- [15] R. K. Srivastava dan S. Kumar, "An Alternative Approach for Calculation of Braking Force of an Eddy-Current Brake," vol. 45, no. 1, hal. 150–154, 2009.
- [16] H. Shin, J. Choi, H. Cho, dan S. Jang, "Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake," vol. 49, no. 7, hal. 4152–4155, 2013.
- [17] C. N. Gas, L. P. Gas, dan B. B. Gas, "Bahan bakar."
- [18] M. Gulec, E. Yolacan, dan M. Aydin, "Design , analysis and real time dynamic torque control of single-rotor – single-stator axial flux eddy current brake," hal. 869–876, 2016.
- [19] E. Simeu dan D. Georges, "Modeling and control of an eddy current brake," *Control Eng. Pract.*, vol. 4, no. 1, hal. 19–26, 1996.
- [20] J. Choi dan S. Jang, "Analytical magnetic torque calculations and experimental testing of radial flux permanent magnet-type eddy current brakes Analytical magnetic torque

- calculations and experimental testing of radial flux permanent magnet-type eddy current brakes,” vol. 712, no. May, hal. 2010–2013, 2012.
- [21] H. Kim dan C. Lee, “Analysis of Eddy-Current Loss for Design of Small Active Magnetic Bearings With Solid Core and Rotor,” vol. 40, no. 5, hal. 3293–3301, 2004.
- [22] K. Lee dan K. Park, “Analysis of an eddy-current brake considering finite radius and induced magnetic flux Analysis of an eddy-current brake considering finite radius and induced magnetic flux,” vol. 5532, no. 2002, 2014.
- [23] Y. Jin, B. Kou, L. Zhang, H. Zhang, dan H. Zhang, “Magnetic and Thermal Analysis of a Halbach Permanent Magnet Eddy Current Brake,” hal. 5–8.
- [24] W. Xu dan D. Wang, “Calculation of eddy current loss and thermal analysis for adjustable permanent magnetic coupler,” *Proc. 2011 Int. Conf. Electron. Mech. Eng. Inf. Technol. EMEIT 2011*, vol. 9, hal. 4405–4408, 2011.
- [25] Y. Ji, J. Wang, Y. Xu, Z. Liu, Y. Zhou, dan J. Li, “Study on the Thermal-Magnetic Coupling Characteristics of Integrated Eddy Current Retarder,” 2018.