Studi Eksperimental Pengaruh Panjang Lengan Massa Pemberat Dan Panjang Lengan Magnet Terhadap Respon Pendulum Lengan Ganda Dengan Peredam Arus Eddy

Mohammad Farid[1], Ardi Noerpamoengkas[2]
Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2]
e-mail: mohafarid29@gmail.com[1]

ABSTRACT

Eddy current damping mechanism can be used in pendulum vibration systems by placing a magnet on the pendulum arm and bringing it close to a metal plate. This study uses a new pendulum model by separating the load mass and the magnet on two separate pendulum arms. The length of the load mass arm and the length of the magnet arm are varied. The magnet is brought close to the copper plate to get the Eddy current. The pendulum response was recorded with a video camera and processed using Tracker software. The results of data processing are the first response amplitude and the settling time. The shorter the arm of the load mass and the longer the magnetic arm, the smaller the first response amplitude and the faster the settling time.

Kata kunci: *Damper, Eddy current, pendulum, vibration.*

ABSTRAK

Mekanisme peredam arus Eddy dapat digunakan pada sistem getaran pendulum dengan menempatkan magnet pada lengan pendulum dan didekatkan dengan pelat logam. Penelitian ini menggunakan model pendulum baru dengan memisahkan massa pemberat dan magnet pada dua lengan pendulum terpisah. Panjang lengan massa pemberat dan panjang lengan magnet divariasikan. Magnet didekatkan dengan pelat tembaga untuk mendapatkan arus Eddy. Respon pendulum direkam dengan kamera video dan diolah menggunakan *software* Tracker. Hasil olahan data berupa simpangan respon terjauh pertama dan *settling time*. Lengan massa pemberat yang semakin pendek dan lengan magnet yang semakin panjang menyebabkan simpangan respon terjauh pertama semakin kecil dan *settling time* semakin cepat.

Kata kunci: Arus Eddy, getaran, pendulum, peredam.

PENDAHULUAN

Pendulum adalah salah satu mekanisme yang dapat mewakili sistem getaran sederhana [1]. Pendulum dapat menjadi peredam sistem getaran sederhana satu derajat kebebasan [2]. Pendulum juga digunakan sebagai peredam pada struktur model bangunan [3]–[10]. Getaran pendulum sendiri dapat diredam dengan menambahkan DVA (*Dynamic Vibration Absorber*) [11]–[15].

Pendulum dapat pula digunakan untuk mekanisme menangkap energi getaran pada pembangkit energi tenaga gelombang. Pendulum ditempatkan horizontal pada ponton terapung [16]. Pendulum juga dapat ditempatkan secara vertikal [17][18]. Gerak rotasi pada pangkal pendulum disambung dengan poros generator sehingga dapat membangkitkan energi listrik.

Mekanisme DVA dapat menggunakan prinsip arus Eddy. Massa magnet dapat menjadi TMD (*Tuned Mass Damper*). Pengaruh kekuatan magnetnya dan pelat tembaga menghasilkan arus Eddy. Gabungan keduanya disebut ECTMD (*Eddy Current Tuned Mass Damper*) [19]. Selain itu, mekanisme yang sama digunakan sebagai sistem pengereman [20][21]. Mekanisme lain dapat menggunakan bola menggelinding [22]. Kemampuan gerak osilasi bola digunakan sebagai DVA.

Gerak pendulum dapat pula diredam dengan mekanisme arus Eddy. Massa magnet permanen diletakkan pada ujung lengan bawah pendulum yang menggantung dan didekatkan dengan pelat logam [23]. Pelat logam dapat pula menjadi massa ujung pendulum dan di kedua sisinya didekatkan dengan magnet [24][25]. Kuat medan magnet dapat diatur dengan adanya sistem solenoida.

Penelitian ini menggunakan model pendulum baru dengan penambahan peredam arus Eddy. Lengan pendulum terdiri dari dua, lengan atas yang diberi massa magnet permanen, dan lengan bawah yang diberi massa beban. Model ini memungkinkan pendulum membawa massa beban yang sensitif terhadap magnet dan memberi ruang lebih pada massa beban dengan menempatkan magnet di lengan pendulum yang lain. Variasi parameter panjang kedua lengan digunakan dalam penelitian ini.

TINJAUAN PUSTAKA

Penambahan pendulum pada struktur model bangunan dilakukan untuk mengurangi respon getaran. Eksitasi berupa *displacement* landasan arah horizontal [3][10], ataupun gaya pada massa tinjauan [7][9] seperti pada struktur penyangga turbin angin [5][8]. Wang menambahkan penahan pada satu sisi gerak pendulum atau PPTMD (*Pendulum Pounding* TMD) [3]. Dengan formula parameter yang optimal, model ini dapat mereduksi respon seismik dari struktur bereperedam rendah. Mottaleb memasang lebih dari satu pendulum secara seri pada model bangunan [4]. Penggunaan satu atau lebih model TMD ini dapat mengurangi respon *displacement* sistem satu derajat kebebasan. Fenomena umum pada penambahan TMD dapat memunculkan puncak amplitudo respon baru pada grafik domain frekuensi dari rasio frekuensi resonansi awal. Oleh karena itu, amplitudo respon menjadi lebih rendah dengan frekuensi kerja tetap sama dengan frekuensi natural awal.
Getaran akibat gaya pada turbin dapat pula diredam dengan adanya penambahan pendulum. Struktur penyangga turbin dimodelkan sebagai batang kantilever terbalik [5][9]. Massa pada ujungnya sebagai model turbin. Struktur ini dapat pula dimodelkan sebagai sistem satu derajat kebebasan [8].
Cara lain mendapatkan redaman adalah dengan menggunakan prinsip arus Eddy. Prinsip ini dapat diterapkan dengan menggunakan magnet yang didekatkan pada pelat logam. Suwarno menambahkan magnet permanen pada ujung pendulum dan mendekatkannya dengan pelat aluminium [23]. Nurlaili menggunakan pendulum Waltenhofen untuk mengetahui pengaruh arus Eddy [24]. Semakin besar tegangan masuk solenoida semakin cepat pendulum berhenti. Zulkarnain juga menggunakan model pendulum yang sama dengan bahan pelat aluminium [25]. Solenoida terpasang rangkaian listrik secara seri dan menggunakan inti besi memberikan kuat medan magnet yang paling besar. Semakin besar arus solenoida semakin besar kuat medan magnet yang dihasilkan dan semakin sedikit jumlah ayunan yang dihasilkan.

METODE

Penelitian ini memakai pendulum dengan dua lengan. Lengan pendulum menggunakan penggaris kayu dengan panjang total mengikuti variasi panjang kedua sisi lengan. Dua lengan pendulum dibuat dengan tidak memasang engsel di salah satu ujung pendulum. Massa pemberat terpasang pada ujung lengan bawah yang menggantung. Massa pemberat sebesat 20,7 gram. Sedangkan, magnet permanen terpasang pada ujung lengan atas. Jenis magnet yang digunakan adalah Neodymium-52. Ukuran magnet permanen yang digunakan berukuran diameter 20 mm, tebal 20 mm, dan bermassa 47 gram. Massa penggaris untuk variasi lengan massa pemberat 0,25 m sebesar 202,5 gram, untuk 0,3 m sebesar 225 gram, dan untuk 0,35 m sebesar 247,5 gram. Massa penggaris untuk variasi lengan magnet 0,13 m sebesar 247,5 gram, untuk 0,18 m sebesar 270 gram, dan untuk 0,23 m sebesar 292,5 gram.



Gambar 17. Alat uji.

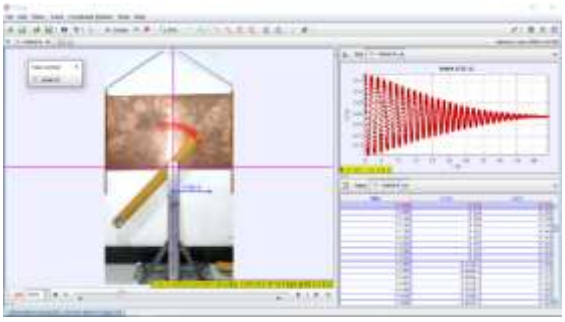
Pelat logam menggunakan jenis tembaga. Ukuran panjang pelat 1.200 mm, lebar 460 mm, dan tebal 2 mm. Jarak antara magnet permanen dan pelat tembaga sebesar 20 mm. Pelat terpasang dengan posisi berdiri memanjang dan jarak bagian bawah-lantai sama dengan jarak engsel pendulum-lantai.
Panjang lengan massa pemberat dan lengan magnet divariasikan. Lengan massa pemberat diberi notasi Lpemberat. Lengan magnet diberi notasi Lmagnet. Nilai variasi panjang lengan massa pemberat dan lengan magnet dapat dilihat pada tabel 1 dan 2.

Tabel 7. Variasi panjang lengan massa pemberat.

No.	Variasi	Lmagnet (m)	Lpemberat (m)
1	1	0,18	0,25
2	2	0,18	0,30
3	3	0,18	0,35

Tabel 8. Variasi panjang lengan magnet.

No.	Variasi	Lmagnet (m)	Lpemberat (m)
1	1	0,13	0,4
2	2	0,18	0,4
3	3	0,23	0,4



Gambar 18. Penggunaan *software* Tracker.

Pendulum disimpangkan dengan sudut awal 90° dan kecepatan awal 0 m/s. Respon pendulum direkam menggunakan kamera telepon genggam merek Poco-F1. Kualitas video 30 fps. Titik tinjauan respon pada massa magnet. Video rekaman respon diolah menggunakan *software* Tracker, yang sama seperti penelitian Suwarno [23]. Pergerakan ujung lengan magnet arah sumbu x atau horizontal ditinjau. Hasil olahan data berupa grafik respon pendulum dalam fungsi waktu. *Settling time* dan simpangan respon terjauh juga dapat diketahui dari grafik tersebut. Simpangan respon terjauh pertama adalah *displacement* terjauh dari *datum* setelah pendulum diberi simpangan awal, dengan arah *displacement* negatif atau posisi di lembah grafik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil eksperimen dengan variasi panjang lengan massa pemberat, dapat diketahui bahwa semakin panjang lengan massa pemberat semakin besar simpangan respon terjauh pertama. Selain itu, semakin panjang lengan massa pemberat semakin lama *settling time*. Pada tabel 3 dan 4, dapat dilihat nilai simpangan respon terjauh pertama dan nilai *settling time*. Gambar 3 adalah grafik respon *displacement* arah sumbu x/horizontal.

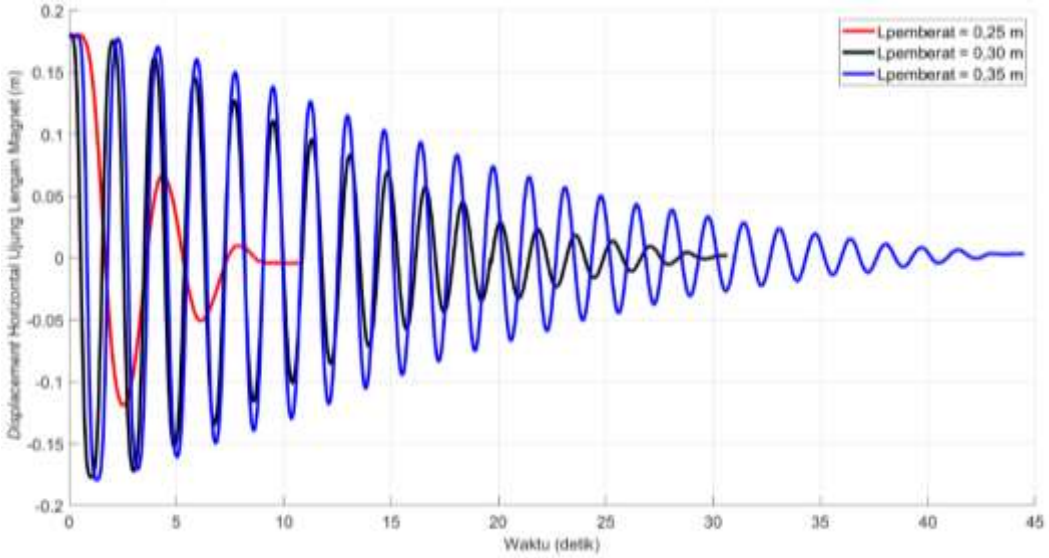
Tabel 9. Nilai simpangan respon terjauh pertama pada variasi panjang lengan massa pemberat.

No.	Variasi	Lpemberat (m)	Nilai simpangan respon terjauh pertama (m)
1	1	0,25	0,1187
2	2	0,30	0,1770
3	3	0,35	0,1793

Tabel 10. Nilai *settling time* pada variasi panjang lengan massa pemberat.

No.	Variasi	Lpemberat (m)	Nilai *settling time* (s)
1	1	0,25	10,7
2	2	0,30	30,7

3	3	0,35	44,5



Gambar 19. Respon *displacement* horizontal ujung lengan magnet akibat variasi panjang lengan massa pemberat.

Pada hasil eksperimen dengan variasi panjang lengan magnet, dapat diketahui bahwa semakin panjang lengan magnet semakin kecil simpangan respon terjauh pertama. Selain itu, semakin panjang lengan magnet semakin cepat *settling time*. Pada tabel 5 dan 6, dapat dilihat nilai simpangan respon terjauh pertama dan nilai *settling time*. Gambar 4 adalah grafik respon *displacement* arah sumbu x/horizontal.

Tabel 11. Nilai simpangan respon terjauh pertama pada variasi panjang lengan magnet.

No.	Variasi	Lmagnet (m)	Nilai simpangan respon terjauh pertama (m)
1	1	0,13	0,1287
2	2	0,18	0,1776
3	3	0,23	0,2262

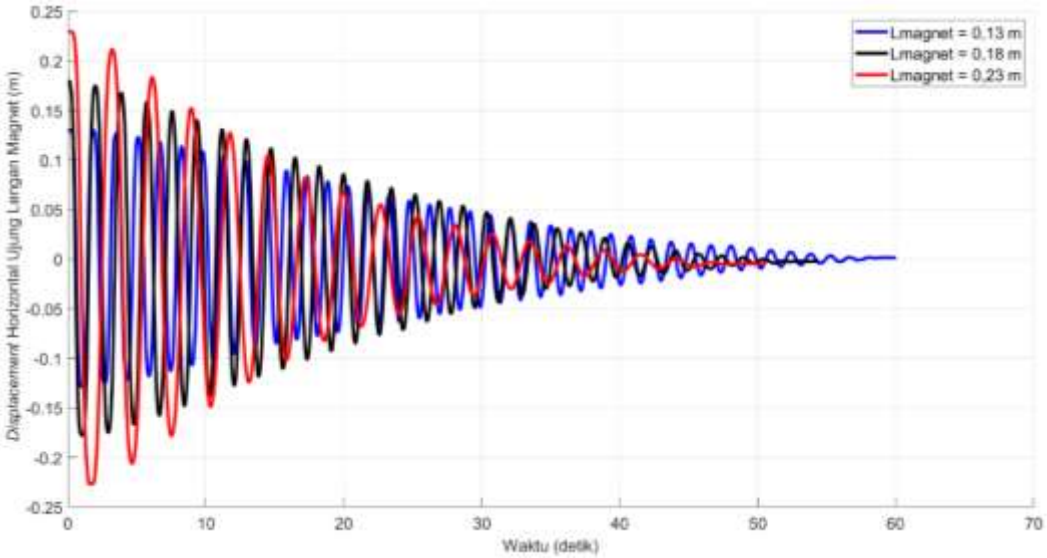
Tabel 12. Nilai *settling time* pada variasi panjang lengan magnet.

No.	Variasi	Lmagnet (m)	Nilai *settling time* (s)
1	1	0,13	60,03
2	2	0,18	54,06
3	3	0,23	50,60

Khusus pada variasi lengan magnet, tinjauan ditambah dengan memperoleh data *displacement* sudut. Hal ini dikarenakan tinjauan pada ujung lengan magnet menyebabkan simpangan *displacement* awal akan lebih besar pada nilai variasi lengan magnet yang lebih panjang. Dengan menggunakan prinsip trigonometri, maka diperoleh nilai simpangan respon sudut terjauh awal pada tabel 7.

Tabel 13. Nilai simpangan respon sudut terjauh awal pada variasi panjang lengan magnet.

No.	Variasi	Lmagnet (m)	Nilai simpangan respon sudut terjauh awal (rad)
1	1	0,13	1,4293
2	2	0,18	1,4073
3	3	0,23	1,3888



Gambar 20. Respon *displacement* horizontal ujung lengan magnet akibat variasi panjang lengan magnet.

Semakin panjang lengan massa pemberat maka simpangan respon terjauh pertama semakin besar dan *settling time* semakin lama. Hal ini disebabkan momen inersia pendulum yang semakin besar. Pendulum cenderung mempertahankan gerak ayunannya. Sedangkan, semakin panjang lengan magnet maka simpangan respon terjauh pertama semakin kecil dan *settling time* semakin cepat. Hal ini disebabkan lengan gaya redaman akibat arus Eddy semakin besar sehingga torsi yang menghambat gerak pendulum juga semakin besar. Penambahan panjang lengan magnet ini dapat menjadi cara untuk meningkatkan kemampuan hambat gerak pendulum dengan mekanisme arus Eddy.

KESIMPULAN

Penelitian ini menggunakan model pendulum baru yang memisahkan penempatan massa beban dan magnet pada dua lengan yang berbeda. Panjang lengan massa beban dan lengan magnet divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap respon pendulum. Lengan massa pemberat yang semakin panjang menyebabkan simpangan respon terjauh pertama semakin besar dan *settling time* semakin lama. Sedangkan, lengan magnet yang semakin panjang menyebabkan simpangan respon terjauh pertama semakin kecil dan *settling time* semakin cepat.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc, 2011.
[2] M. A. Abdel-Hafiz and G. A. Hassaan, "Minimax Optimization Of Dynamic Pendulum Absorbers For A Damped Primary System," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 3, no. 9, 2014.
[3] W. Wang, Z. Yang, X. Hua, Z. Chen, X. Wang, and G. Song, "Evaluation of a pendulum pounding tuned mass damper for seismic control of structures," *Eng. Struct.*, vol. 228, p. 111554, Feb. 2021.
[4] H. E. Abd-El-Mottaleb and T. A. Sakr, "Multiple Connected Pendulum TMD (MCPTMD) For Vibration Control of Structures," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 10, no. 05, pp. 266–273, 2021.
[5] G. B. Colherinhas, M. A. M. Shzu, S. M. Avila, and M. V. G. D. Morais, "Wind Tower Vibration Controlled by a Pendulum TMD using Genetic Optimization: Beam Modelling," *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 1623–1628, Jan. 2017.
[6] V. J. García, E. P. Duque, J. A. Inaudi, C. O. Márquez, J. D. Mera, and A. C. Rios, "Pendulum tuned mass damper: optimization and performance assessment in structures with elastoplastic behavior," *Heliyon*, vol. 7, no. 6, p. e07221, Jun. 2021.
[7] F. Dos, S. Oliveira, J. L. V De Brito, and S. M. Avila, "Design criteria for a pendulum absorber to control high building vibrations," *11th Int. Conf. Vib. Probl.*, 2013.
[8] G. B. Colherinhas *et al.*, "Genetic optimization analysis of wind tower vibrations controlled by a pendulum TMD," *Rev. Interdiscip. Pesqui. em Eng.*, vol. 2, no. 13, pp. 103–119, Jan. 2017.
[9] G. B. Colherinhas, M. A. M. Shzu, S. M. Avila, and M. V. G. De Morais, "A parametric study of a

tower controlled by a pendulum tuned mass damper: beam modelling," *MATEC Web Conf.*, vol. 211, p. 14006, Oct. 2018.
[10] S. Hassani and M. Aminafshar, "Optimization of pendulum tuned mass damper in tall building under horizontal earthquake excitation," *Bull. la Société R. des Sci. Liège [En ligne]*, vol. 85, pp. 514–531, Jan. 2016.
[11] L. D. Viet, N. D. Anh, and H. Matsuhisa, "Vibration control of a pendulum structure by a dynamic vibration absorber moving in both normal and tangential directions," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 225, no. 5, pp. 1087–1095, Apr. 2011.
[12] L. Duc Viet and Y. Park, "Vibration control of the spherical pendulum by dynamic vibration absorber moving in radial direction," in *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, 2010, pp. 83–88.
[13] M. F. Younes, "Numerical study for dynamic vibration absorber using Coriolis force for pendulum system," *J. Am. Sci.*, vol. 11, no. 12, 2015.
[14] M. F. Younes, "Optimal Design of Dynamic Vibration Absorber for Rolling Systems," *18th Int. Conf. Appl. Mech. Mech. Eng.*, 2018.
[15] L. D. Viet and Y. Park, "Vibration control of the axisymmetric spherical pendulum by dynamic vibration absorber moving in radial direction," *J. Mech. Sci. Technol. 2011 257*, vol. 25, no. 7, pp. 1703–1709, Jul. 2011.
[16] A. Noerpamoengkas, H. L. Guntur, and S. Y. Zamrisyaf, "Modeling Flat Pendulum and Simulating Its Validation at The Pendulum-Flat Pontoon Model Sea Wave Electric Generator Application." Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jurnal IPTEK, 2013.
[17] A. Noerpamoengkas and M. Ulum, "PEMODELAN GERAK PENDULUM VERTIKAL PADA KONVERTER ENERGI GELOMBANG BERINERSIA TAMBAHAN SAAT RESONANSI," *J. IPTEK*, vol. 21, no. 1, pp. 61–68, May 2017.
[18] A. Noerpamoengkas and M. Ulum, "Pemodelan Pengaruh Frekuensi dan Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Gerak dan Daya Mekanis Pendulum Vertikal pada Konverter Energi Gelombang Laut," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III*, 2015, pp. 201–210.
[19] R. Efendi, A. Noerpamoengkas, and H. S. Maulana, "Studi Eksperimental Pengaruh Panjang Penyangga Magnet pada Getaran Batang dengan Eddy Current Tuned Mass Damper," *J. Teknol. dan Manaj.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, Mar. 2021.
[20] N. P. G.V., G. S., V. K.G., and A. C. Dixit, "An Analysis of Permanent Magnet Eddy Current Braking System," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 9, no. 4, pp. 23–38, 2019.
[21] M. R. A. Putra, M. Nizam, D. D. D. P. Tjahjana, and A. R. Prabowo, "Mini Review on Eddy Current Brakes Parameter," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1096, no. 1, p. 012027, Mar. 2021.
[22] N. Irfani, A. Noerpamoengkas, I. Bagus, J. T. Mesin, T. Adhi, and T. Surabaya, "Studi Eksperimental Pengaruh Radius Lintasan dan Massa Bola Terhadap Respon Getaran Model Bangunan Berperedam Bola," in *Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*, Mar. 2021, vol. 1, no. 1, p. 415.
[23] D. U. Suwarno, "Getaran osilasi teredam pada pendulum dengan magnet dan batang aluminium," *Semin. Kontribusi Fis.*, 2015.
[24] N. Nurlaili and S. Sumardi, "Pengaruh redaman meda magnit terhadap ayunan von waltenhoven dan piringan logam berputar," *J. POLIMESIN*, vol. 2, no. 1, p. 99, Sep. 2019.
[25] Zulkarnain, Erwin, and R. Sawitri, "Studi Gejala Arus Eddy Pada Plat Alumunium Menggunakan Solenoid Silinder," *Komun. Fis. Indones.*, vol. 12, no. 11, pp. 745–751.