

Studi Eksperimental Pengaruh Posisi Menyudut Pendulum-Pelat Tembaga pada Getaran Pendulum Berperedam Arus Eddy

Experimental Study on the Effect of Angled Pendulum-Copper Plate Position on Pendulum Vibration with Eddy Current Damper

Ardi Noerpamoengkas*, Miftahul Ulum

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, Indonesia.

*Corresponding author email: ardi@itats.ac.id



Kata Kunci:

arus Eddy; getaran;
magnet; pendulum;
redaman.

Abstrak

Redaman getaran dapat menggunakan mekanisme arus Eddy. Sistem utama diberi magnet dan didekatkan dengan logam konduktif sehingga timbul arus Eddy tersebut. Belum ada aplikasi jenis mekanisme ini untuk menghasilkan redaman non-linier. Pada penelitian ini, pendulum memiliki dua sisi lengan, lengan magnet dan lengan beban. Bidang gerak pendulum dan pelat tembaga membentuk sudut. Konfigurasi baru ini menghasilkan peredam non-linier dengan adanya sisi gerak simpangan pendulum yang dekat dan jauh dengan pelat. Jarak engsel pendulum dan pelat dibuat sama sehingga semakin kecil sudut semakin jauh sisi terdekat magnet-pelat. Respon getaran diperoleh dengan menggunakan software Tracker. Redaman yang dihasilkan tidak sama di dua sisi simpangan pendulum. Nilai redaman lebih besar di sisi simpangan yang dekat pelat. Semakin kecil sudut posisi bidang gerak pendulum bermagnet dan pelat logam semakin lama pendulum mencapai kondisi tunak dan semakin kecil nilai redaman rata-ratanya.

Keywords:

damper; Eddy current;
magnet; pendulum;
vibration.

Abstract

Vibration damping can use the Eddy current mechanism. The main system is magnetized and brought close to a conductive metal so that the eddy current is generated. There is no application of this type of mechanism to produce non-linear damping yet. In this study, the pendulum has two side arms, a magnet arm and a load arm. The plane of pendulum motion and a copper plate forms an angle. This new configuration results in a non-linear damper with the pendulum magnet arm approaching and away from the plate. The distance between the pendulum hinge and the plate is made the same so that the smaller the angle the farther the closest side of the magnet-plate. The vibration response is obtained by using the Tracker software. The resulting damping is not the same on both sides of the pendulum movement. The damping value is greater at the magnet arm movement approaching the plate. The smaller the angle between the magnetic pendulum motion plane and the metal plate, the longer the pendulum reaches steady state and the smaller the average damping value.

PENDAHULUAN

Pendulum adalah salah satu mekanisme yang dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena getaran yang sederhana (Rao, 2011). Beberapa mekanisme pendulum digunakan sebagai mekanisme peredam (Deraemaeker & Soltani, 2016). Selain itu juga dapat digunakan untuk mekanisme pembangkit listrik (Noerpamoengkas & Ulum, 2017).

Pengurangan respon getaran dapat dilakukan dengan hanya sekedar menambahkan redaman, seperti pada suspensi kendaraan (Patriawan dkk., 2021). Hal ini menyebabkan sebagian energi getaran diserap oleh peredam. Pada frekuensi rendah, semakin tinggi rasio redaman maka semakin rendah amplitudo respon getarannya, begitu pula sebaliknya (Rao, 2011).

Peredaman juga dapat dilakukan dengan menambahkan sistem massa-pegas atau sering disebut DVA (*Dynamic Vibration Absorber*) (Ramadhan & Noerpamoengkas, 2021). Penambahan ini mengakibatkan perubahan pada

grafik karakteristik domain frekuensi (Rao, 2011). Secara umum, akan terjadi penurunan amplitudo getaran pada frekuensi kerja sistem.

Fenomena arus Eddy juga digunakan untuk mekanisme redaman. Arus Eddy ini terjadi dengan menggerakkan magnet di dekat pelat logam. Medan magnet menimbulkan arus pada pelat logam. Sebaliknya arus tersebut juga menimbulkan medan magnet. Interaksi antar medan magnet ini dapat menyebabkan menurunnya pergerakan pada magnet.

Fenomena timbulnya arus Eddy dapat digunakan untuk menggerakkan benda berbahan logam konduktif. Magnet ditempatkan di tepi-tepi piringan CD yang diputar. Koin logam ditempatkan dekat tepi piringan dengan dibatasi kaca. Piringan yang berputar dapat menyebabkan koin logam terlempar arah tangensial (Suwarno, 2016).

Mekanisme peredam kejut juga dapat menggunakan arus Eddy ini (Kwag, Dong-Gi;Hwang, Jai-Hyuk;Bae, 2007). Magnet ditempatkan pada pipa berbahan logam. Pergerakan magnet relatif terhadap pipa ini yang menimbulkan arus Eddy. Penempatan antar magnet yang saling berkebalikan kutubnya berfungsi sebagai pengganti pegas. Aplikasi serupa juga dilakukan dengan mengukur gaya elektromagnetiknya dan pergerakan magnetnya (Bae dkk., 2010). Konfigurasi magnet dapat juga dibuat banyak dan berjarak antara satu dengan yang lain (Ebrahimi, Khamesee, & Golnaraghi, 2008). Konfigurasi logam juga dapat menggunakan kumparan (Palomera-Arias, Connor, & Ochsendorf, 2008).

Model lain dengan menempatkan pelat logam di hadapan kedua ujung kutub magnet (Pan dkk., 2016). Poros tersambung magnet. Pelat tembaga dilubangi untuk slot gerak poros. Ketika poros bergerak ke bawah, fluks magnet melalui pelat tembaga atas meningkat dan pelat bawah menurun secara simultan, begitu pula sebaliknya. Penelitian serupa dilakukan dengan simulasi densitas flux magnet menggunakan ANSYS (Xiao dkk., 2016).

Penerapan konfigurasi magnet-pelat serupa dilakukan untuk meredam getaran batang kantilever (Sodano dkk., 2005). Ujung batang kantilever bagian atas ditempel lembaran logam konduktif. Magnet didekatkan dengan lembaran logam. Salah satu kutub magnet diarahkan ke lembaran tersebut. Model lain dengan menempatkan lembaran logam di kedua sisi (Sodano dkk., 2006), dan menggunakan kumparan elektromagnetik (Sodano & Inman, 2008).

Konfigurasi yang terbalik diaplikasikan dengan menempelkan magnet pada sistem getaran dan mendekatkan pelat logam dengan rangkaian magnet tersebut (Wang, Chen, & Wang, 2012). Sistem diberi simpangan awal untuk mendapatkan respon getaran bebas. Pendekatan lempengan logam memberikan waktu kondisi tunak lebih cepat dibandingkan tanpa lempengan tersebut.

Penggabungan mekanisme *tuned mass damper* dan fenomena arus Eddy ini digunakan dalam meredam getaran (Efendi, Noerpamungkas, & Syafik Maulana, 2021). Sistem utama ditambah sistem massa-pegas seperti pada DVA umumnya. Selain itu, ditambahkan magnet-pelat tembaga untuk menimbulkan arus Eddy. Sebagian energi getaran terserap ke getaran massa DVA dan timbulnya arus Eddy.

Redaman getaran pada pendulum dapat menggunakan arus Eddy (Suwarno, 2015). Ujung lengan menggantung pendulum diberi magnet. Blok logam aluminium didekatkan dengan ujung pendulum tersebut. Variabel input yang divariasikan adalah jarak magnet dan blok aluminium. Respon getaran serupa pada sistem *underdamped* pada jarak minimal 2.5 mm. Pengujian serupa dilakukan dengan pendulum tali dan magnet *spherical* (Pili, 2020).

Konfigurasi terbalik, pendulum dengan pelat logam didekatkan dengan magnet yang terbangkitkan dengan kumparan (Zulkarnain, Erwin & Sawitri, 2015). Pada penelitian ini, dilakukan pengukuran kuat medan magnet menggunakan sensor ukur *Probe Magnetic Pasco* PS-2162. Jarak antara sensor dan pusat kumparan, serta arus divariasikan. Semakin jauh dari pusat kumparan semakin kecil kuat medan magnet. Semakin besar kuat arus yang diberikan semakin besar kuat medan magnet.

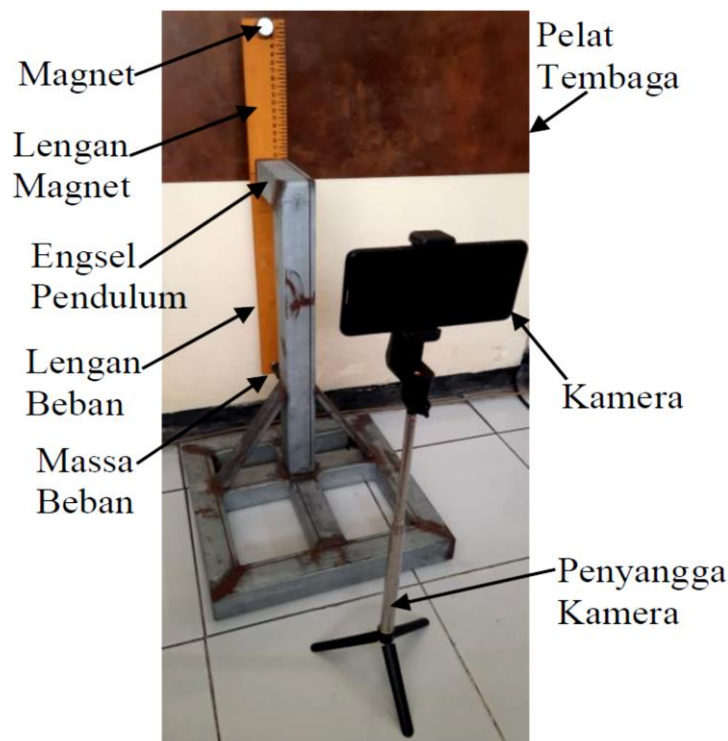
Riset terdahulu mengenai redaman arus Eddy memperlihatkan semakin besar kuat medan magnet semakin besar redaman yang dihasilkan. Selain itu, redaman yang dihasilkan sama atau linier pada semua arah gerak

tinjauan getaran. Dari penelitian terdahulu tersebut belum ada yang meneliti tentang redaman non-linier menggunakan arus Eddy. Penerapan redaman non-linear mampu meningkatkan performansi pada sistem suspensi (Silveira, Pontes, & Balthazar 2014). Pada penelitian ini, dilakukan eksperimen getaran pendulum teredam menggunakan arus Eddy. Redaman non-linier diberikan dengan memberikan sudut antara bidang gerak magnet dan pelat tembaga. Dengan demikian, jarak magnet dan pelat tembaga akan berubah mengikuti gerak ujung lengan pendulum sisi magnet.

METODE PENELITIAN

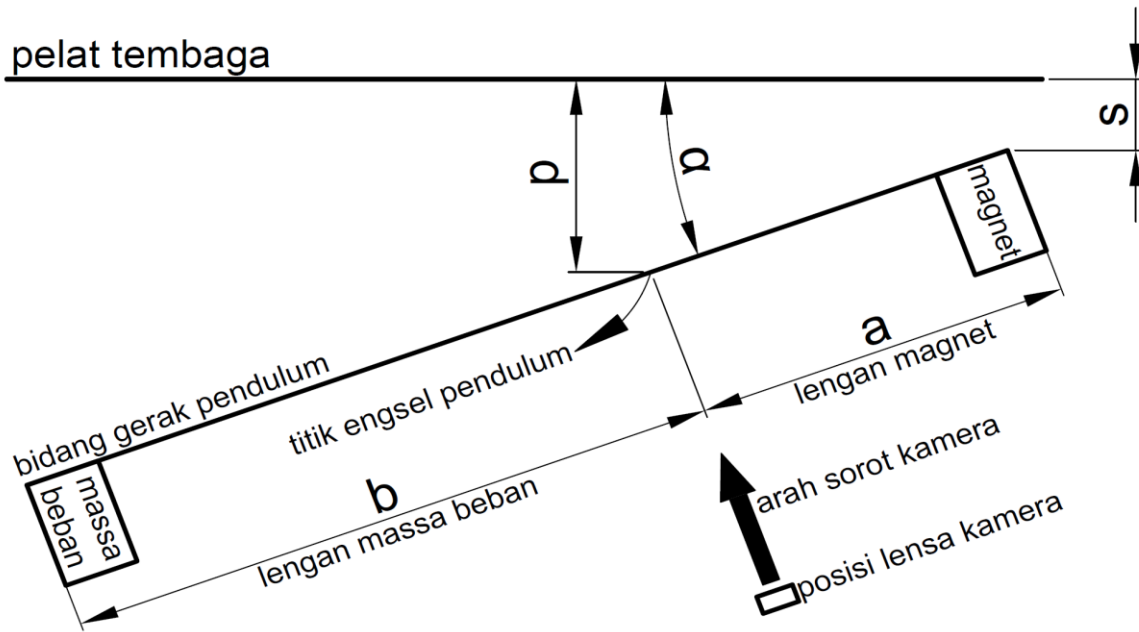
Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental. Pendulum ditempatkan menyudut terhadap pelat tembaga. Pendulum memiliki dua lengan yang mengapit engselnya. Satu lengan pendulum atas dengan magnet N52 di ujungnya. Satu lengan pendulum bawah diberi tambahan massa beban.

Magnet N52 memiliki tebal 30 mm, diameter 20 mm, dan massa 70 gram. Penggaris berbahan kayu dengan panjang total 550 mm. Lengan pendulum sisi magnet, a, memiliki panjang 200 mm. Magnet ditempatkan di ujungnya. Lengan pendulum sisi massa beban, b, memiliki panjang 350 mm. Pelat tembaga memiliki tebal 2 mm. Massa beban ditempatkan di ujungnya. Massa beban sebesar 55 gram.



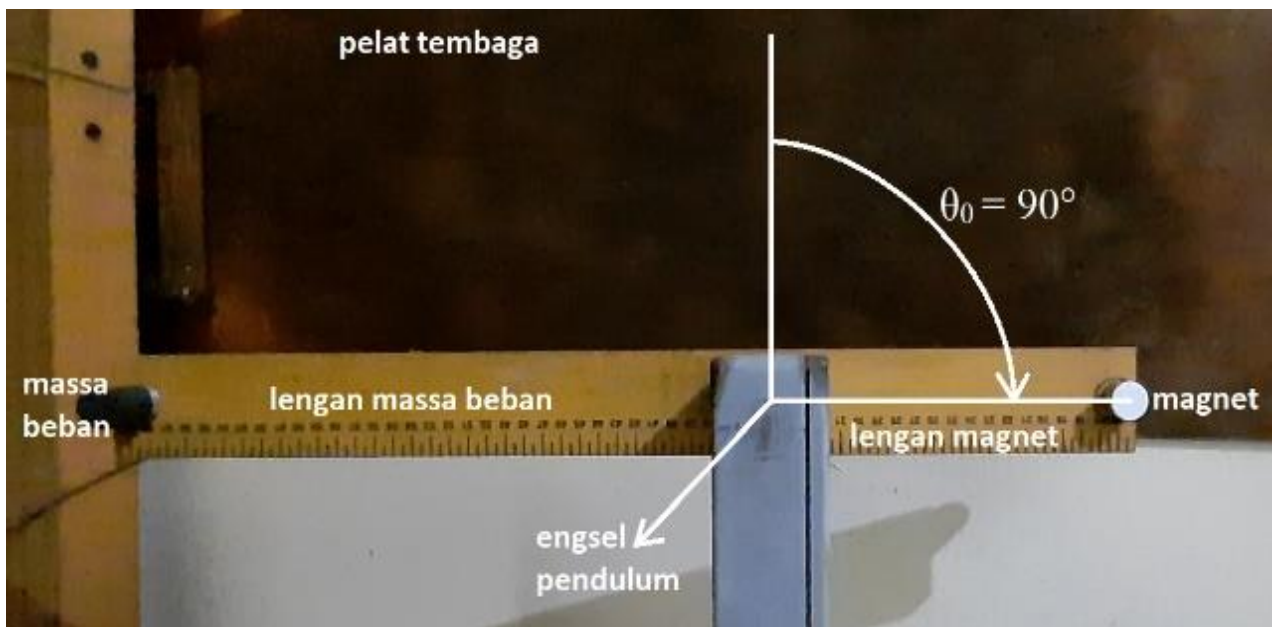
Gambar 1. Skema alat uji

Jarak antara engsel dan pelat dibuat sama sebesar 11.25 cm. Variasi sudut bidang magnet dan pelat, α , antara lain 10° , 15° , dan 20° . Dengan variasi sudut ini, mengakibatkan jarak antara pelat dan sisi bidang magnet terdekat, s , juga turut berubah, 4.5 cm (20°), 5.5 cm (15°), dan 7.5 cm (10°). Semakin kecil sudut tersebut semakin jauh jarak pelat-sisi bidang magnet terdekat. Jarak P dan sudut α maksimal 20° mempertimbangkan lengan beban agar tidak menabrak pelat tembaga. Gambar 2 adalah pandangan atas alat uji pada kondisi awal pendulum sebelum bergetar.



Gambar 2. Posisi pelat tembaga terhadap bidang gerak pendulum pada kondisi awal

Respon perubahan posisi atau *displacement* dapat diperoleh dengan video rekaman pergerakan pendulum menggunakan *software* Tracker. Penggunaan *software* yang sama juga dilakukan pada penelitian sebelumnya (Suwarno, 2015; Pili, 2020). Kamera ditempatkan lurus menyorot engsel pendulum. Kamera menggunakan telepon genggam merek Samsung A51 dengan spesifikasi video FHD 30 fps.



Gambar 3. Kondisi awal sistem getaran dilihat dari arah pandangan kamera

Sistem getaran tanpa gaya pengganggu (getaran bebas) dan diberi kondisi awal. Kondisi awal berupa simpangan awal dengan memberi sudut pendulum awal, θ_0 , sebesar 90° (lengan pendulum sisi magnet menyimpang di sebelah kanan jika dilihat dari arah pandangan kamera), seperti pada Gambar 3. Magnet berada pada jarak paling dekat dengan pelat tembaga pada kondisi simpangan awal ini.

Dari *software* Tracker diperoleh respon *displacement* pada ujung lengan pendulum sisi magnet. *Datum* mengambil posisi setimbang pendulum. Respon yang diamati hanya respon *displacement* arah sumbu x saja. Data diambil lima kali, kemudian diukur *settling time* dengan memperhatikan *frame* awal gerak hingga diam pada *software* tersebut. Rata-rata *settling time* dihitung dan dibandingkan antar variasi sudut. Data dengan nilai *settling time* terdekat dengan rata-ratanya akan diambil respon *domain* waktunya, kemudian respon tersebut dibandingkan antar variasi sudut.

Jika x adalah *displacement* arah sumbu x dan a adalah lengan pendulum sisi magnet, maka respon *displacement* sudut pendulum dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{x}{a} \quad (1)$$

Asumsi redaman pada engsel pendulum kecil sehingga frekuensi getaran redaman mendekati frekuensi natural pendulum, ω_n . Frekuensi natural, ω_n , diperoleh dari pengukuran periode, τ_n , dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{\tau_n} \quad (2)$$

Periode diukur menggunakan *stopwatch* dan pengamatan pada pendulum.

Massa penggaris ringan dan lebih kecil dibandingkan massa beban, m_b , dan massa magnet, m_m . Momen inersia pendulum, J , dapat dirumuskan berikut.

$$J = m_m \cdot a^2 + m_b \cdot b^2 \quad (3)$$

Selisih energi kinetik, ΔEK , pada kondisi posisi kesetimbangan ($\theta=0$) disebabkan karena disipasi energi akibat redaman. Selisih energi kinetik ini dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta EK = \frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (4)$$

Tanda 1 kondisi awal dan tanda 2 kondisi akhir. Kecepatan putar, ω , dirumuskan berikut.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (5)$$

Notasi $\Delta\theta$ adalah selisih nilai sudut di posisi setimbang dan simpangan terjauh, atau sebaliknya. Notasi Δt adalah selisih waktunya. Grafik respon antar kondisi posisi setimbang atau setengah siklus, baik pada puncak maupun lembah grafik, dapat dinyatakan dalam rumus respon berikut.

$$\theta = \theta_{amp} \cdot \sin(\omega_d t) \quad (6)$$

dimana θ_{amp} amplitudo respon, ω_d frekuensi getaran teredam, dan berlaku di $0 < t < 0.5\tau_d$. Selisih energi akibat redaman, ΔW , untuk setengah siklus dapat dinyatakan berikut (Rao, 2011).

$$\Delta W = \frac{\pi c \omega_d \theta_{amp}^2}{2} \quad (7)$$

Jika selisih energi kinetik, ΔEK , disamakan dengan selisih energi akibat redaman, ΔW , maka dapat dirumuskan.

$$\frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{\pi c \omega_d \theta_{amp}^2}{2} \quad (8)$$

Jika waktu antar kondisi respon saat berada di posisi setimbang ($\theta=0$) adalah τ_0 , dan merupakan setengah dari periode getaran teredam, τ_d , maka dapat dirumuskan berikut.

$$J(\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{\pi^2 c \theta_{amp}^2}{\tau_0} \tag{9}$$

Nilai redaman, c , dapat dirumuskan berikut.

$$c = \frac{J(\omega_1^2 - \omega_2^2) \tau_0}{\pi^2 \theta_{amp}^2} \tag{10}$$

Selanjutnya nilai setengah periode teredam ini akan dicari dari data respon *displacement* sudut. Nilai redaman terdiri dari dua jenis, nilai dari hasil perhitungan di sisi gerak sebelah kanan posisi kesetimbangan/dekat magnet dan sisi sebelah kiri/jauh dari magnet. Nilai redaman di kedua sisi tersebut diambil pada satu siklus awal karena pada kondisi ini magnet berjarak dekat dengan pelat tembaga. Selain itu, olahan data juga mendapatkan nilai waktu saat kondisi tunak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Periode pendulum tanpa didekatkan dengan pelat tembaga sebagai berikut.

Tabel 1. Periode pendulum tanpa pelat

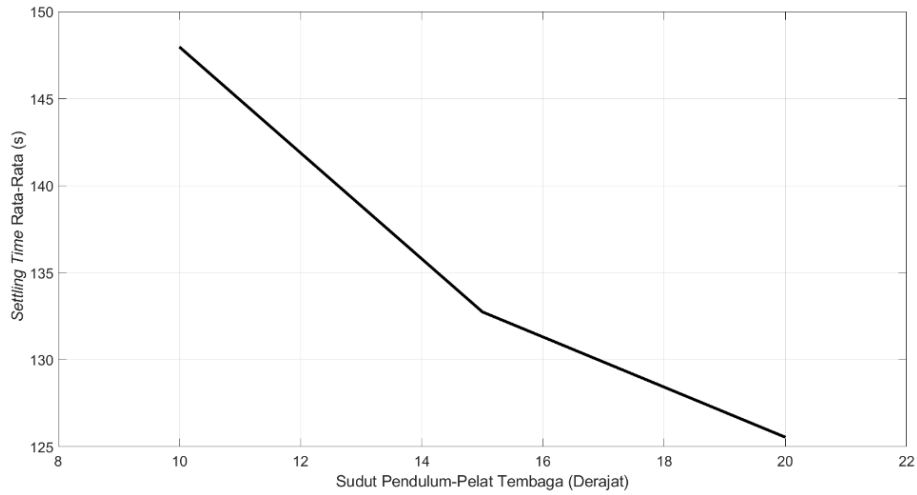
Percobaan	Periode (detik)
1	1.98
2	2.00
3	2.00
4	1.99
5	1.98
Rata-rata	1.99

Sehingga nilai frekuensi diambil sebesar 3.1558 rad/s. Nilai momen inersia pendulum, J , sebesar 0.009538 kg.m².

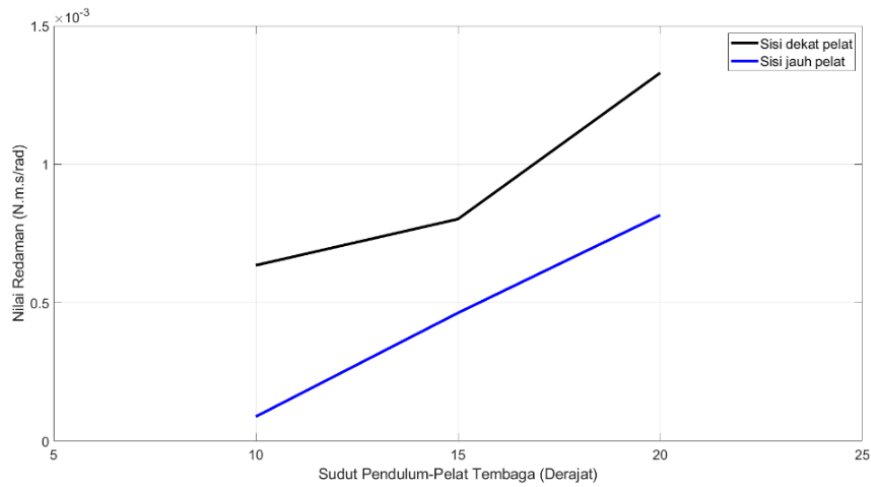
Nilai *settling time* pada berbagai variasi sudut dan percobaan ada pada Tabel 2. Plot nilai rata-rata *settling time* dengan variasi sudut pendulum-pelat dapat dilihat di Gambar 4.

Tabel 2. Settling time akibat variasi sudut

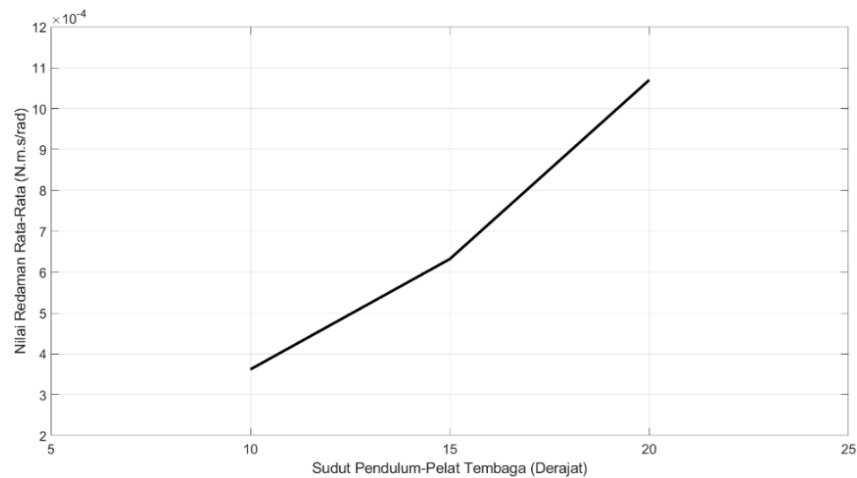
Percobaan	Settling time (s)		
	Sudut pendulum-pelat		
	10°	15°	20°
1	138.667	129.500	123.000
2	144.333	127.333	124.900
3	148.267	135.100	123.100
4	153.767	136.433	126.767
5	154.800	135.367	129.967
Rata-Rata	147.967	132.747	125.547



Gambar 4. Pengaruh sudut pendulum-pelat terhadap settling time rata-rata



Gambar 5. Pengaruh sudut pendulum-pelat terhadap nilai redaman pada tiap sisi gerak

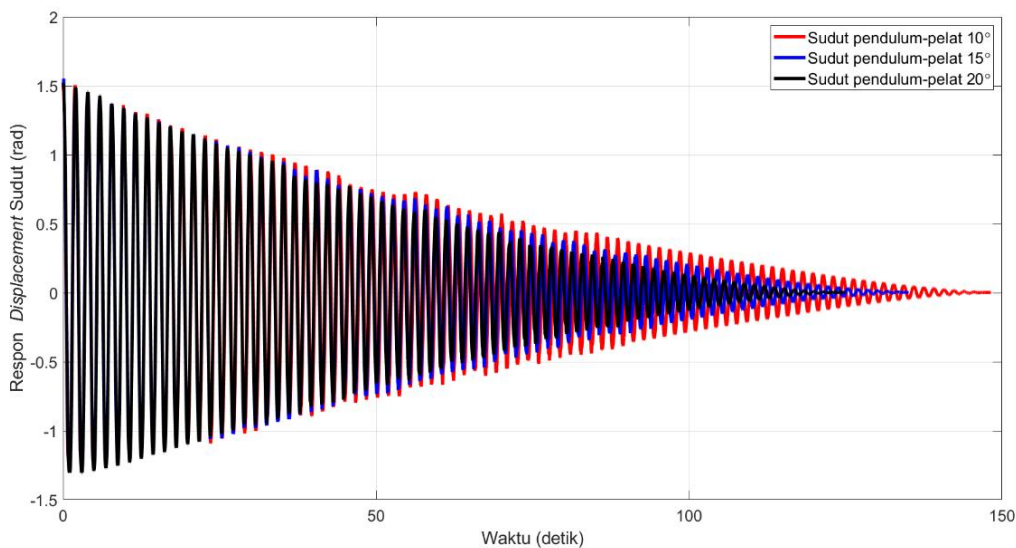


Gambar 6. Pengaruh sudut pendulum-pelat terhadap nilai redaman rata-rata

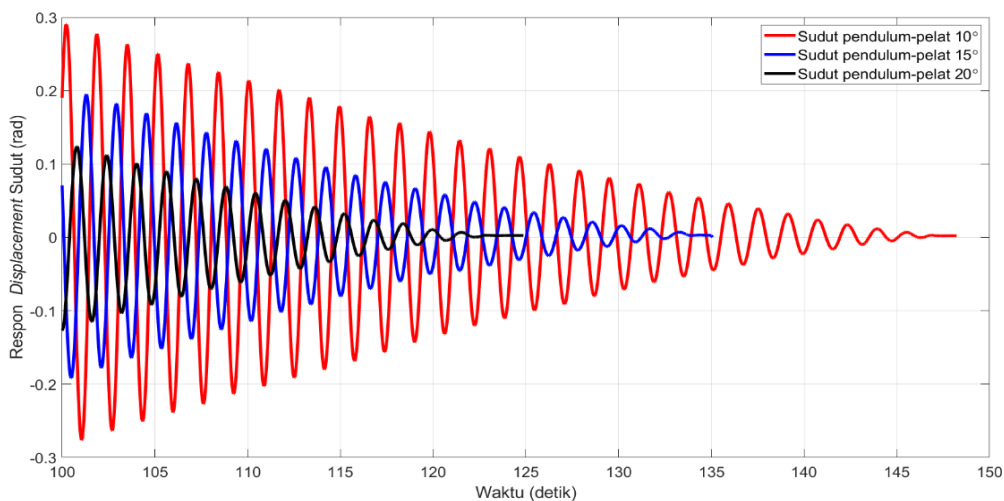
Percobaan 3 pada variasi sudut 10° dipakai untuk analisis karena memiliki selisih paling rendah dengan nilai rata-rata *settling time*. Percobaan 3 dipakai untuk nilai sudut 15° . Percobaan 2 untuk nilai sudut 20° . Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa semakin besar sudut pendulum-pelat maka semakin kecil *settling time* rata-rata.

Tabel 1. Nilai redaman variasi sudut

Sudut pendulum-pelat	Nilai redaman (N.m.s/rad)		
	Sisi dekat pelat	Sisi jauh pelat	Rata-rata
10°	6.35E-04	8.84E-05	3.62E-04
15°	8.02E-04	4.63E-04	6.32E-04
20°	1.33E-03	8.16E-04	1.07E-03



Gambar 7. Respon *displacement* sudut akibat variasi sudut pendulum-pelat



Gambar 8. Getaran pendulum sebelum kondisi tunak

Nilai redaman di masing-masing sisi pada variasi sudut dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Gambar 5, dapat dilihat bahwa semakin besar sudut pendulum-pelat semakin besar nilai redamannya, baik pada sisi gerak pendulum dekat magnet maupun yang jauh. Secara umum, dilihat dari nilai redaman rata-rata pada Gambar 6, diperoleh fenomena yang sama. Pada berbagai variasi sudut pendulum-pelat, nilai redaman saat lengan magnet pendulum dekat pelat lebih besar daripada saat jauh dari pelat.

Grafik respon *displacement* sudut dapat dilihat pada Gambar 7. Seperti pada umumnya getaran bebas teredam, seiring berjalannya waktu respon getaran semakin turun mendekati nilai nol. Adanya perbedaan fase antar grafik menunjukkan adanya pengaruh redaman pada sistem getaran. Grafik respon *displacement* sudut menjelang kondisi tunak pada Gambar 8 sehingga kondisi tunak pada berbagai variasi sudut bidang gerak pendulum-pelat dapat mudah terlihat.

Waktu tercapainya kondisi tunak atau *settling time* paling cepat terjadi pada sudut 20° , dan paling lama pada sudut 10° . Hal ini disebabkan oleh posisi magnet paling dekat dengan pelat saat sudut 20° , sebaliknya paling jauh saat sudut 10° . Semakin dekat magnet dengan pelat maka semakin besar arus Eddy yang terjadi. Semakin besar arus tersebut maka semakin besar pula redaman yang terjadi. Fenomena yang sama juga terjadi pada penelitian sebelumnya (Suwarno, 2015) yang menggunakan pendulum dengan magnet pada ujung lengannya dan balok aluminium sebagai logam konduktifnya.

Perbedaan nilai redaman terjadi pada saat gerak lengan magnet di sisi kanan/dekat pelat dan saat di sisi kiri/jauh pelat. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian ini berhasil menghasilkan redaman non-linier dengan mekanisme arus Eddy. Nilai redaman yang rendah pada saat gerak di sisi kiri menunjukkan rendahnya arus Eddy dalam meredam getaran pendulum. Hal ini disebabkan karena jauhnya magnet dengan pelat.

Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan memvariasikan konfigurasi posisi pendulum dan pelat yang baru. Selain itu, pengembangan suspensi dengan peredam non-linier menggunakan mekanisme arus Eddy ini. Seperti diketahui model peredam kejut non-linier dapat meningkatkan kenyamanan kendaraan (Silveira, Pontes, & Balthazar, 2014). Dari sisi karakteristik kuat medan magnetnya, dapat dilakukan studi simulasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model peredam getaran non-linier baru menggunakan mekanisme arus Eddy. Nilai redaman dibuat tidak linier dengan menempatkan bidang gerak pendulum, bermagnet di ujung lengannya, menyudut terhadap pelat tembaga, dan jarak engsel pendulum-pelat dibuat tetap. Nilai redaman lebih besar di sisi simpangan yang dekat pelat daripada sisi yang jauh pelat. Semakin besar sudut posisi pendulum-pelat semakin dekat jarak magnet di ujung pendulum dengan pelat sehingga semakin besar nilai redaman rata-rata dan semakin cepat *settling time*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya yang telah mendukung penelitian ini lewat pendanaan penelitian mandiri tahun 2021. Nomor kontrak 07/KP PDP/INST/LPPM/ITATS/2021 tanggal 12 Oktober 2021.

REFERENSI

Bae, J.-S., Hwang, J.-H., Park, J.-S., & Kwag, D.-G. (2010). Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(11), 3024–3035. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0819-0>

- Deraemaeker, A., & Soltani, P. (2016). A short note on equal peak design for the pendulum tuned mass dampers. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 231(1), 285–291. <https://doi.org/10.1177/1464419316652>
- Ebrahimi, B., Khamesee, M. B., & Golnaraghi, F. (2008). Eddy current damper feasibility in automobile suspension: modeling, simulation and testing. *Smart Materials and Structures*, 18(1), 015017.
- Efendi, R., Noerpamoengkas, A., Syafik Maulana, H. (2021). Studi eksperimental pengaruh panjang penyangga magnet pada getaran batang dengan Eddy Current tuned mass damper. *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.31284/j.jtm.2021.v2i1.1518>
- Kwag, D.-G; Hwang, J.-H.; Bae, J.-S. (2007). Experimental study for dynamic characteristics of Eddy Current shock absorber. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 35(12), 1089–1094. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2007.35.12.1089>
- Noerpamoengkas, A. & Ulum, M. (2017). Pemodelan gerak pendulum vertikal pada konverter energi gelombang berinersia tambahan saat resonansi. *Jurnal IPTEK*, 21(1), 61–68. <https://doi.org/10.31284/j.iptek.2017.v21i1.100>
- Palomera-Arias, R., Connor, J. J., & Ochsendorf, J. A. (2008). Feasibility study of passive electromagnetic damping systems. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 164–170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(164))
- Pan, Q., He, T., Xiao, D., & Liu, X. (2016). Design and damping analysis of a new Eddy Current damper for aerospace applications. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(11), 1997–2011. <https://doi.org/10.1590/1679-78252272>
- Patriawan, D. A., Irawan, H., Noerpamoengkas, A., Setyono, B., & Ismail, A. Y. (2021). Definition, criteria and approaches in designing suspension system with active controls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1010(1), 012006.
- Pili, U. B. (2020). Modeling damped oscillations of a simple pendulum due to magnetic braking. *Physics Education*, 55(3), 035025.
- Ramadhan, R., & Noerpamoengkas, A. (2021). Pemodelan dan analisis pengaruh jarak dan massa DVA terhadap respon getaran massa utama dengan triple-DVA tersusun seri. In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 9(1), 478–484.
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical vibrations* (5th ed.). Pearson Education, Inc.
- Silveira, M., Pontes, B. R., & Balthazar, J. M. (2014). Use of nonlinear asymmetrical shock absorber to improve comfort on passenger vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 333(7), 2114–2129. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.12.001>
- Sodano, H. A., Bae, J.-S., Inman, D. J., & Belvin, W. K. (2005). Concept and model of Eddy Current damper for vibration suppression of a beam. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4–5), 1177–1196. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.01.016>
- Sodano, H. A., Bae, J.-S., Inman, D. J., & Belvin, W. K. (2006). Improved concept and model of Eddy Current damper. *Journal of Vibration and Acoustics*, 128(3), 294–302. <https://doi.org/10.1115/1.2172256>
- Sodano, H. A., & Inman, D. J. (2008). Modeling of a new active Eddy Current vibration control system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 130(2), 021009(1-12). <https://doi.org/10.1115/1.2837436>
- Suwarno, D. U. (2015). Getaran osilasi teredam pada pendulum dengan magnet dan batang aluminium. *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika*, 100–107.
- Suwarno, D. U. (2016). Alat peraga efek arus Eddy dengan menggunakan piringan magnet berputar. *Prosiding SNIPS*, 268–274.

- Wang, Z., Chen, Z., & Wang, J. (2012). Feasibility study of a large-scale tuned mass damper with eddy current damping mechanism. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(3), 391–401. <https://doi.org/10.1007/s11803-012-0129-x>
- Xiao, D., Zhou, X., Gao, Y., Quan, D., & He, T. (2016). Application of Eddy Current damping effect to design a novel magnetic damper. In *Proceedings of the 2015 2nd International Forum on Electrical Engineering and Automation*, 335–339. <https://dx.doi.org/10.2991/ifeea-15.2016.71>
- Zulkarnain, E. & Sawitri, R. (2015). Studi gejala arus Eddy pada plat aluminium menggunakan solenoid silinder, *Komunikasi Fisika Indonesia*, 12(11), 745–751.