Studi Eksperimental Respons Tunak Getaran Model Bangunan Akibat Variasi Panjang Pendulum dan Jarak Celah Pelat Tembaga pada *Eddy Current Pendulum Pounding Tuned Mass Damper*

Muhammad Ilham Zarkacy[1], Fajar Ramadhan Manggala Prakasa[2], Ardi Noerpamoengkas[3]
Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2,3]
e-mail: zarkacy@gmail.com[1]

ABSTRACT

One of the developments of the TMD (Tuned Mass Damper) is the use of a pendulum model with a retainer. This study uses an eddy current mechanism for retaining the swing. This model is called ECPPPTMD (Eddy Current Pendulum Pounding TMD). A magnet is placed at the end of the pendulum, and copper plates are placed on either swing side of the pendulum to act as a retainer. The gap of the copper plate and the pendulum length are varied. The accelerometer is placed on a building model that is disturbed on its base. Steady condition response data is processed to obtain its amplitude and RMS (Root Mean Square) values. From the vibration test, the result is that the larger the gap of the copper plate and the pendulum length, the greater the vibration response of the building model.

Kata kunci: *Building model vibration, eddy current, pendulum pounding, tuned mass damper.*

ABSTRAK

Salah satu pengembangan *tuned mass damper* adalah penggunaan model pendulum dengan penahan. Penelitian ini menggunakan mekanisme arus eddy untuk penahannya. Model ini disebut ECPPTMD (*Eddy Current Pendulum Pounding TMD*). Magnet ditempatkan pada ujung pendulum, dan pelat tembaga ditempatkan di dua sisi ayunnya sebagai penahan. Celah pelat tembaga dan panjang pendulum divariasikan. Akselerometer ditempatkan pada model bangunan yang diganggu pada landasannya. Data respons kondisi tunak diolah agar mendapatkan nilai amplitudo dan RMS (*Root Mean Square*). Dari uji getaran, diperoleh hasil bahwa semakin besar celah pelat tembaga dan panjang pendulum maka semakin besar respons getaran model bangunan.

Kata kunci: Arus eddy, getaran model bangunan, *pendulum pounding*, *tuned mass damper*.

PENDAHULUAN

Salah satu cara menurunkan respons getaran adalah penambahan sistem massa-pegas [1]–[3]. Hal ini dapat menurunkan nilai amplitudo pada frekuensi sekitar frekuensi natural sistem getaran utama. Mekanisme dapat menggunakan model massa-pegas biasa [4], batang kantilever [5], jungkat-jungkit [6], atau bola [7]. Sistem ini dapat disebut TMD atau *Tuned Mass Damper*.

Pengembangan berikutnya TMD menggunakan alternatif jenis redaman. Salah satunya redaman arus eddy [4], [5]. Arus eddy diterapkan dengan mendekatkan magnet dan pelat konduktor. Medan magnet yang semakin kuat menyebabkan redaman yang terjadi semakin besar.

Penerapannya dapat pada model bangunan [7]. Hal ini dengan respons getaran pada massa tinjauan model lebih rendah dibandingkan tanpa TMD. Dalam perkembangannya ada beberapa model TMD. Ada model TMD menggunakan massa-pegas gesekan [8], pendulum [9]–[12], rol silinder [13], dan bola [7]. Beberapa penelitian menambahkan penahan untuk membatasi gerak pendulum [10]–[12].

TMD pada model bangunan menggunakan redaman arus eddy. TMD yang sering dipakai menggunakan model pendulum. Massa magnet ditempel pada ujung pendulum. Pelat konduktor didekatkan magnet sehingga muncul arus eddy. Jarak antar keduanya dapat dikontrol sehingga arus eddy yang timbul dapat berubah-ubah [9], [14].

Dari penelitian yang sudah ada sebelumnya, masih belum ada penelitian yang meninjau penggunaan arus eddy dan *pendulum pounding* pada TMD. Penelitian ini menggunakan mekanisme arus eddy sebagai penahan gerak pendulum TMD. Magnet ditempatkan pada ujung pendulum, dan pelat konduktor ditempatkan berjarak pada dua sisi ayun pendulum. Selanjutnya sistem ini disebut ECPPTMD (*Eddy*

ISSN 2775-5630

Current Pendulum Pounding TMD). Celah pelat tembaga dan panjang pendulum divariasikan. Semakin panjang lengan pendulum berarti semakin jauh magnet dari engsel pendulum, dan juga semakin jauh dari posisi pelat tembaga.

TINJAUAN PUSTAKA

Suryadi meneliti pengaruh TMD pada model bangunan sederhana [15]. TMD ditempatkan pada plafon model bangunan. Respons akselerasi dari *base* dan massa plafon model diukur dengan akselerometer ADXL335. Penambahan TMD menyebabkan respons peralihan lebih kecil dan waktu *settling* lebih cepat dibandingkan model tanpa TMD.

Irfani menggunakan bola menggelinding sebagai model TMD [7]. Bola ditempatkan pada lintasan tertentu yang diletakkan pada massa model bangunan yang ditinjau. Radius lintasan dan massa bola divariasikan. Massa bola dan jari-jari lintasan semakin besar, nilai responsnya semakin kecil.

Wong mengembangkan TMD untuk mengurangi model bangunan bertingkat [16]. Bangunan dibuat bertingkat 1, 5, 10, dan 15. Model TMD menggunakan model tambahan massa-pegas-redaman pada model lantai tingkat paling atas. Akselerasi eksitasi menggunakan akselerogram beberapa contoh gempa. Rasio antara massa TMD dan massa total sistem utama divariasikan. Secara umum, rasio massa TMD-massa total sistem utama semakin besar, persen reduksi respons model bangunan semakin besar.

Bae mengembangkan model TMD magnetik dengan menambahkan redaman arus eddy pada mekanisme TMD [17]. Respons domain frekuensi ditinjau. Rasio frekuensi natural sistem, rasio massa sistem, dan rasio redaman divariasikan. Semakin besar rasio frekuensi natural sistem maka semakin besar nilai amplitudo pada frekuensi natural pertama dan semakin kecil nilai amplitudo pada frekuensi natural kedua. Semakin kecil rasio redaman, semakin kecil amplitudo pada rasio frekuensi sebesar satu. Penelitian serupa juga dilakukan dengan menempatkan lebih dari satu model TMD ini [18].

Efendi meneliti tentang penerapan TMD dengan redaman arus eddy pada getaran batang [5]. Model TMD dengan penambahan massa dan batang. Massanya menggunakan magnet permanen. Arus eddy diperoleh dari penempatan pelat tembaga di batang utama dan didekatkan dengan magnet. Redaman arus eddy dapat menjadi alternatif redaman untuk penerapan TMD.

Fredy mengembangkan TMD untuk meredam getaran pada model struktur berbentuk lempengan [6]. TMD menggunakan mekanisme massa-pegas dan redaman yang terpisah menggunakan sistem jungkat-jungkit. Redaman menggunakan logam berbentuk x. Penambahan TMD mengurangi nilai amplitudo pada rasio frekuensi kerja di grafik respons frekuensi. Penggunaan TMD dan redaman menghasilkan rasio redaman yang lebih besar dibandingkan kondisi lain.

Lian mengembangkan TMD dengan redaman arus eddy untuk getaran turbin [19]. Model TMD menggunakan massa-magnet permanen yang digantung dengan sistem kabel. Mekanisme arus eddy dengan menempatkan pelat tembaga-baja di dekat magnet tersebut. Semakin dekat celah magnet-pelat semakin besar rasio redaman, demikian pula pada aplikasi magnet dengan ukuran lebih besar. Model serupa juga dikembangkan oleh Lu [20].

Jiang mengembangkan TMD dengan gesekan [8]. Model TMD dibangun dengan susunan poros dan bantalan linier. Poros menggunakan bahan gelas, baja, dan aluminium. Bahan poros aluminium memberikan koefisien gesek paling besar. Rasio redaman ekivalennya juga menjadi yang paling besar.
Model TMD dapat menggunakan massa berbentuk silinder yang menggelinding. Tsuda memvariasikan banyak dan ukuran massa ini terhadap respons domain frekuensi sistem [13]. Rol banyak dengan ukuran diameter kecil memberikan nilai rasio amplitudo maksimum yang paling kecil.

Wang mengembangkan TMD semi aktif menggunakan redaman arus eddy [9]. Model TMD menggunakan pendulum bermassa magnet. Redaman arus eddy dikontrol dengan mengatur jarak celah antara magnet dan pelat tembaga. Pelat ditempatkan di samping kanan dan kiri massa magnet ujung pendulum. Pengaturnya

ISSN 2775-5630

menggunakan aktuator gerak linier. Semakin jauh celah udaranya semakin kecil koefisien redaman efektifnya. Pada model TMD redaman arus eddy yang lain, posisi pelat di bawah magnet [14]. Sensor akselerometer ditempatkan di massa model lantai dan motor *stepper* pada pangkal pendulum. Posisi pelat diatur sehingga berjarak dengan magnet, menggunakan *stepping putter*.

Wang mengembangkan TMD pendulum dengan penahan di salah satu sisi ayunnya [10]. Sistem ini disebut PPTMD atau *pendulum pounding* TMD. Rasio frekuensi *tuning* tergantung pada nilai koefisien restitusi penahannya. Dengan kombinasi koefisien restitusi dan rasio frekuensi yang optimal memberikan nilai respons peralihan yang rendah. Model *pendulum pounding* yang lain dengan pendulum berpegas [11], [12]. Dari penelitian yang ada, belum ada penelitian yang menggunakan *pounding* dengan arus eddy. Penelitian ini menerapkannya dengan menempatkan magnet pada ujung pendulum dan pelat tembaga pada dua sisi ayun pendulum.

METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen menggunakan model bangunan. Model bangunan yang ditinjau getarannya menggunakan bahan papan yang terbuat dari kayu. Tiang penyangga menggunakan batang berbahan akrilik. Massa model tinjauan (tanpa pendulum, pelat, dan magnet) sebesar 1.0439 kg. Massa model tiang akrilik sebesar 28.5 gram, dengan panjang 360 mm, lebar 35.6 mm, dan tebal 2 mm. Eksitasi diberikan pada bagian landasan model. Eksitasi ditimbulkan dari gerakan mekanisme *scotch yoke*.
Alat ukur akselerasi menggunakan akselerometer GY-61 ADXL335. Akselerometer ini digunakan pada penelitian sebelumnya [5], [7], [21]. Tegangan diterima *oscilloscope* dengan merek HANTEK tipe DSO2D10.



Gambar 1. Alat uji.

Adapun parameter tetap di sistem dan eksitasi, dan yang divariasikan dapat diketahui pada tabel berikut.

Tabel 1. Parameter sistem dan eksitasi.

No.	Notasi	Besaran	Nilai	Satuan
1	m_u	Massa utama	1.0439	kg
2	E_{acr}	Modulus elastisitas akrilik	2.76	GPa
3	L_{acr}	Panjang tiang akrilik	360	mm
4	w_{acr}	Lebar tiang akrilik	35.6	mm

5	t_{acr}	Tebal tiang akrilik	2	mm
6		Grade magnet	N52	
7	L_{mag}	Panjang magnet	150	mm
8	d_{mag}	Diameter magnet	20	mm
10	m_{mag}	Massa magnet	100	gram
11	τ_{exc}	Periode eksitasi	800	ms
12	a_y	Amplitudo akselerasi eksitasi	1.7319	G

Tabel 2. Variasi jarak celah pelat tembaga.

Variasi	Celah Pelat Tembaga (mm)	Panjang Lengan Pendulum (mm)
1	10	130
2	20	130
3	30	130

Tabel 3. Variasi panjang lengan pendulum.

Variasi	Celah Pelat Tembaga (mm)	Panjang Lengan Pendulum (mm)
1	20	90
2	20	110
3	20	130

Selanjutnya data akselerasi kondisi tunak yang akan diolah sehingga diperoleh data nilai amplitudo dan RMS (*Root Mean Square*). Kedua nilai tersebut semakin besar menunjukkan respons tunak semakin besar. Sesuai dengan spesifikasi akselerometer, nilai akselerasi maksimal sebesar 3 G atau 29.43 m/s^2. Tegangan amplitudo maksimal yang diterima *oscilloscope* sebesar 1.022 V yang disetarakan dengan 3 G tersebut. Data dibandingkan antara sistem tanpa TMD dan sistem dengan ECPPTMD.

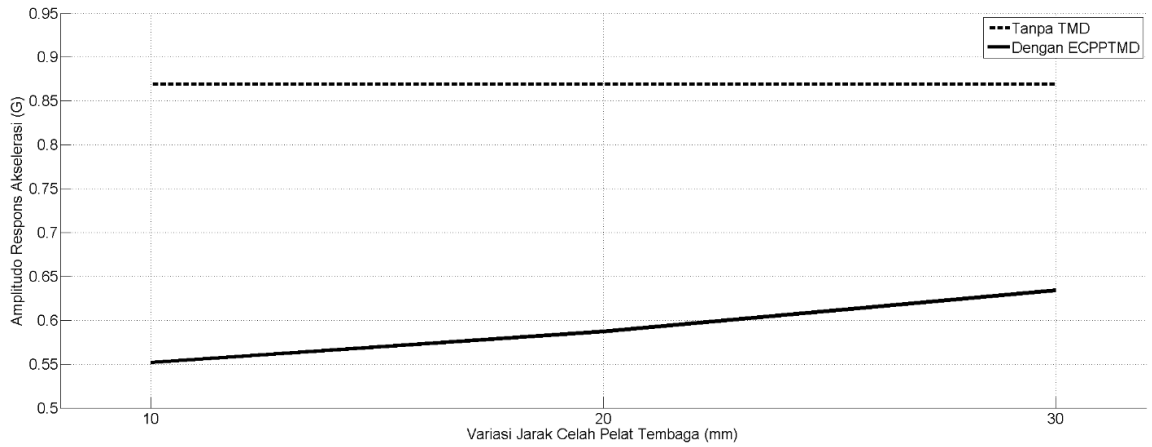
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil eksperimen, dapat terlihat semakin besar jarak celah pelat tembaga semakin besar respons akselerasinya. Jarak celah pelat yang semakin jauh menyebabkan cakupan medan magnet yang diterima pelat konduktor menjadi semakin rendah. Medan magnet yang semakin rendah ini menyebabkan arus eddy yang ditimbulkan juga semakin rendah, efek penahan karenanya semakin rendah, dan respons getaran menjadi semakin besar.

Tabel 4. Nilai amplitudo dan RMS respons akselerasi variasi jarak celah pelat tembaga.

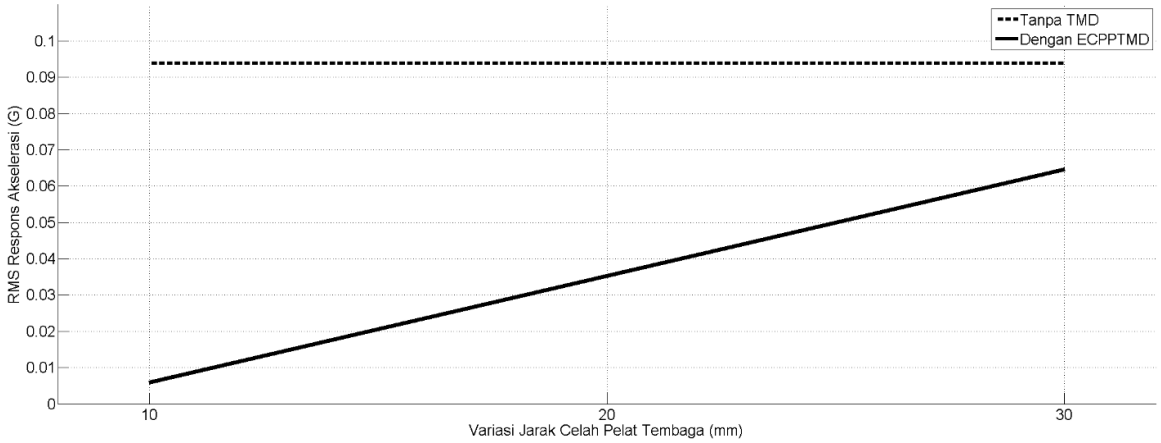
Variasi Jarak Celah (mm)	Amplitudo (G)	RMS (G)
10	0.5519	0.0059
20	0.5871	0.0352
30	0.6341	0.0646

ISSN 2775-5630



Gambar 2. Amplitudo respons variasi jarak celah pelat tembaga.

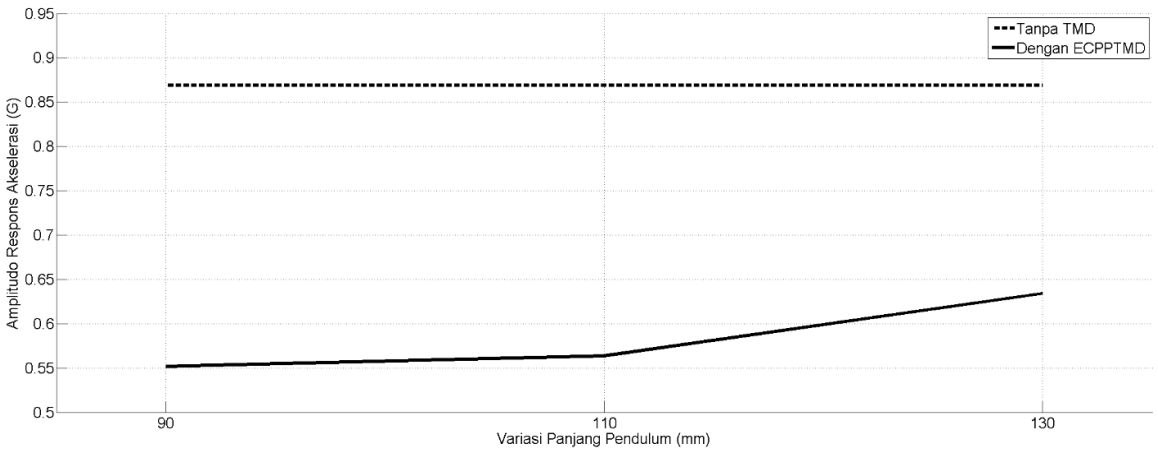
Sedangkan semakin panjang lengan pendulum semakin besar respons akselerasi. Semakin panjang lengan pendulum berarti semakin jauh letak magnet dari pangkal pendulum. Hal ini menyebabkan magnet semakin jauh dari pelat tembaga, dan membutuhkan ayunan yang semakin besar agar magnet dapat dekat dengan pelat tembaga. Medan magnet yang mempengaruhi pelat tembaga semakin rendah, arus eddy semakin rendah, dan efek penahan karenanya juga semakin rendah. Respons getaran yang ditimbulkan semakin tinggi.



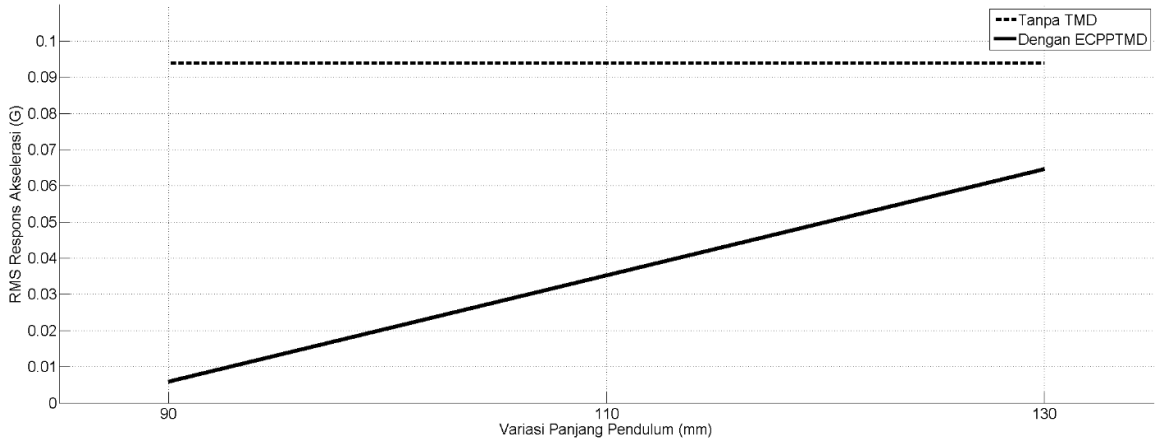
Gambar 3. RMS respons variasi jarak celah pelat tembaga.

Tabel 5. Nilai amplitudo dan RMS respons akselerasi variasi panjang pendulum.

Variasi Panjang Pendulum (mm)	Amplitudo (G)	RMS (G)
90	0.5519	0.0059
110	0.5636	0.0352
130	0.6341	0.0646



Gambar 4. Amplitudo respons variasi panjang pendulum.



Gambar 5. RMS respons variasi panjang pendulum.

Tabel 6. Nilai amplitudo dan RMS respons akselerasi dibandingkan dengan sistem tanpa TMD.

Kondisi	Amplitudo (G)	RMS (G)
Tanpa TMD	0.8689	0.0939
Nilai maksimal dengan ECPPTMD	0.6341	0.0646

Penurunan respons pada sistem dengan ECPPTMD sesuai dengan fenomena pada penelitian terdahulu [1]–[7]. Hal ini disebabkan fenomena umum penurunan respons saat penambahan sistem massa-pegas ke sistem getaran utama sehingga terjadi pergeseran puncak amplitudo respons pada domain frekuensi. Nilai respons pada frekuensi kerja sistem getaran utama lebih rendah dibandingkan pada sistem tanpa TMD. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan pada model TMD ini dengan meninjau respons domain frekuensi. Dengan demikian dapat diketahui karakteristik sistem dengan model TMD ini.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model TMD dengan menggabungkan model pendulum, *pendulum pounding*, dan arus eddy. Mekanisme *pounding* menggunakan arus eddy dengan menempatkan magnet permanen pada ujung pendulum dan posisi pelat tembaga sebagai penahannya. Semakin besar medan magnet yang diterima pelat tembaga semakin besar kemampuan menahannya. Penelitian ini memvariasikan jarak celah pelat tembaga dan panjang pendulum. Semakin jauh jarak celah dan semakin panjang pendulum, maka semakin besar respons getaran sistem utama. Studi lanjut tentang respons domain frekuensi agar mengetahui karakteristik sistem.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Ramadhan and A. Noerpamoengkas, "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*, Oct. 2021, vol. 9, no. 1, pp. 478–484.

[2] A. Setiawan and A. Noerpamoengkas, "Pemodelan dan Analisis Pengaruh Rasio Jarak dan Rasio Massa DVA Terhadap Respon Massa Utama dengan Dual-DVA Ganda," *Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*, vol. 2, no. 0, pp. 346–355, Mar. 2022.

[3] M. Rizal and A. Noerpamoengkas, "Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perbandingan Jarak dan Massa DVA Terhadap Respon Massa Utama dengan Triple-DVA Tersusun Secara Paralel," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 2022.

[4] D. P. Budiarto, M. J. S. Athoillah, and A. Noerpamoengkas, "Pengaruh Jarak Magnet-Pelat Tembaga dan Grade Magnet terhadap Respon Tunak Sistem Getaran dengan DVA Berperedam Arus Eddy (Pelat Grounded dan Magnet pada Massa DVA)," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 2022, doi: 10.1016/J.JSV.2012.07.020.

[5] R. Efendi, A. Noerpamoengkas, H. Syafik Maulana, P. Studi, and T. Mesin, "Studi Eksperimental Pengaruh Panjang Penyangga Magnet pada Getaran Batang dengan Eddy Current Tuned Mass Damper," *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, Mar. 2021, doi: 10.31284/J.JTM.2021.V2I1.1518.

[6] F. Picauly, H. Priyosulistyo, B. Suhendro, and A. Triwiyono, "Tuned Mass Damper on Reinforced Concrete Slab with Additional 'X-Shaped Metal' Absorber," *Procedia Eng*, vol. 95, pp. 204–212, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.12.180.

[7] N. Irfani, A. Noerpamoengkas, and I. Bagus, "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.

[8] J. Jiang, S. C. M. Ho, N. J. Markle, N. Wang, and G. Song, "Design and control performance of a frictional tuned mass damper with bearing–shaft assemblies," *Journal of Vibration and Control*, vol. 25, no. 12, pp. 1812–1822, Mar. 2019, doi: 10.1177/1077546319832429.

[9] L. Wang, W. Shi, Y. Zhou, and Q. Zhang, "Semi-active eddy current pendulum tuned mass damper with variable frequency and damping," *Smart Struct Syst*, vol. 25, no. 1, pp. 65–80, Jan. 2020, doi: 10.12989/SSS.2020.25.1.065.

[10] 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, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111554.

[11] Q. Wang, H. N. Li, and P. Zhang, "Vibration Control of a High-Rise Slender Structure with a Spring Pendulum Pounding Tuned Mass Damper," *Actuators 2021, Vol. 10, Page 44*, vol. 10, no. 3, p. 44, Feb. 2021, doi: 10.3390/ACT10030044.

[12] V. Jahangiri, C. Sun, and F. Kong, "Study on a 3D pounding pendulum TMD for mitigating bi-directional vibration of offshore wind turbines," *Eng Struct*, vol. 241, p. 112383, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112383.

[13] R. Tsuda and M. Saeki, "Efficiency of vibrational energy dissipation by tuned rolling-cylinder dampers," *J Sound Vib*, vol. 463, p. 114977, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.JSV.2019.114977.

[14] L. Wang, S. Nagarajaiah, W. Shi, and Y. Zhou, "Study on adaptive-passive eddy current pendulum tuned mass damper for wind-induced vibration control," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 29, no. 15, p. e1793, Oct. 2020, doi: 10.1002/TAL.1793.

[15] D. Suryadi, M. R. Ridlo, N. Daratha, and I. Agustian, "Pengaruh Tuned Mass Damper (TMD) Terhadap Respons Getaran pada Struktur Bangunan," *Semesta Teknika*, vol. 24, no. 2, pp. 84–92, Nov. 2021, doi: 10.18196/ST.V24I2.12727.

[16] W. Foek Tjong, T. Andriono, R. Sumendap, F. Gunawan Site Engineer, and S. Bangun Persada Indah, "STUDI EFEKTIFITAS PENGGUNAAN TUNED MASS DAMPER PADA STRUKTUR GEDUNG DALAM MEREDUKSI RESPONS DINAMIK AKIBAT BEBAN SEISMIK," *Civil Engineering Dimension*, vol. 5, no. 2, pp. 51–62, 2003, doi: 10.9744/CED.5.2.PP.

[17] J. S. Bae, J. H. Hwang, J. H. Roh, J. H. Kim, M. S. Yi, and J. H. Lim, "Vibration suppression of a cantilever beam using magnetically tuned-mass-damper," *J Sound Vib*, vol. 331, no. 26, pp. 5669–5684, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.JSV.2012.07.020.

[18] J. S. Bae, J. S. Park, J. H. Hwang, J. H. Roh, B. do Pyeon, and J. H. Kim, "Vibration Suppression of a Cantilever Plate Using Magnetically Multimode Tuned Mass Dampers," *Shock and Vibration*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3463528.

[19] J. Lian *et al.*, "Application of an Eddy Current-Tuned Mass Damper to Vibration Mitigation of Offshore Wind Turbines," *Energies 2018, Vol. 11, Page 3319*, vol. 11, no. 12, p. 3319, Nov. 2018, doi: 10.3390/EN11123319.

[20] Z. Lu, B. Huang, Q. Zhang, and X. Lu, "Experimental and analytical study on vibration control effects of eddy-current tuned mass dampers under seismic excitations," *J Sound Vib*, vol. 421, pp. 153–165, May 2018, doi: 10.1016/J.JSV.2017.10.035.

[21] A. Noerpamoengkas, M. Ulum, and N. Mahfoudz, "Studi Eksperimental Pengaruh Posisi dan Kedalaman Takikan U Terhadap Frekuensi Natural dan Respon Getaran pada Batang Kantilever Menggantung," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 2019, pp. 367–372.