

Analisa Reduksi Respons Getaran Kabel Konduktor terhadap Variasi Massa *Counterweight* pada *Stockbridge Damper*

Resnanda Pradiptya dan Harus Laksana Guntur

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: haruslg@me.its.ac.id

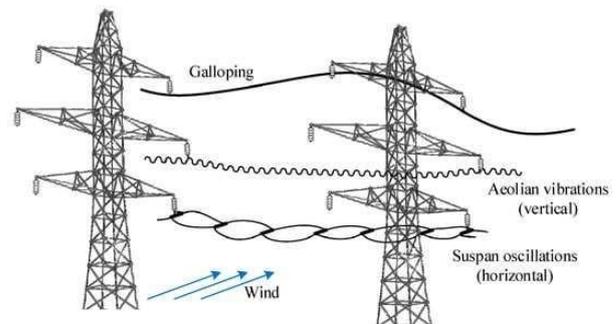
Abstrak—Berdasarkan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral kapasitas pembangkit listrik di Indonesia kapasitas pembangkit listrik terus mengalami kenaikan setiap tahunnya. Kenaikan ini mengakibatkan peningkatan pendistribusian energi listrik ke daerah-daerah. Pendistribusian dapat ditingkatkan dengan penambahan jumlah saluran listrik udara ke daerah-daerah. Salah satu kendala pembangunan saluran listrik udara adalah adanya getaran *aeolian*. *Stockbridge Damper* adalah *Tuned Mass Damper* yang digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi getaran *aeolian* dengan cara menyerap energi dari getaran kabel konduktor pada saluran listrik udara. *Stockbridge Damper* asimetris adalah *Stockbridge Damper* yang memiliki kinerja yang paling baik. Di pasaran persebaran variasi berat total pada *Stockbridge Damper* asimetris semakin banyak. Variasi berat total menjadi acuan penjualan dipasaran. Akan tetapi, perbedaan berat antara kedua *counterweight* tidak terlalu diperhatikan. Sehingga diperlukan penelitian tentang pengaruh variasi massa *counterweight* untuk mempermudah pemilihan *Stockbridge Damper*. Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, penelitian ini akan menyimulasikan kabel konduktor dengan sebuah peredam *Stockbridge Damper* pada software *ANSYS Workbench 2022 RI* dengan analisis *Static Structural*, *Modal* dan *Harmonic Response*. Hasil dari penelitian ini adalah hasil respon rasio getaran menunjukkan bahwa frekuensi natural pada kabel konduktor dengan *stockbridge damper* lebih kecil dibandingkan frekuensi natural pada kabel konduktor tanpa *stockbridge damper*. Persentase reduksi amplitudo getaran tertinggi terjadi pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 2 kg dan 3,5 kg sebesar 99,21% pada frekuensi 33,8 Hz. Sedangkan persentase reduksi amplitudo getaran terendah terjadi pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 1,5 kg dan 4 kg sebesar 77,83% pada frekuensi 30,8 Hz dan Hasil simulasi menunjukkan bahwa *stockbridge damper* dengan selisih massa *counterweight* yang lebih kecil mampu mereduksi lebih besar dibandingkan dengan *stockbridge damper* dengan selisih massa *counterweight* yang lebih besar.

Kata Kunci—*ANSYS Workbench*, *Counterweight*, Kabel Konduktor, *Stockbridge Damper*.

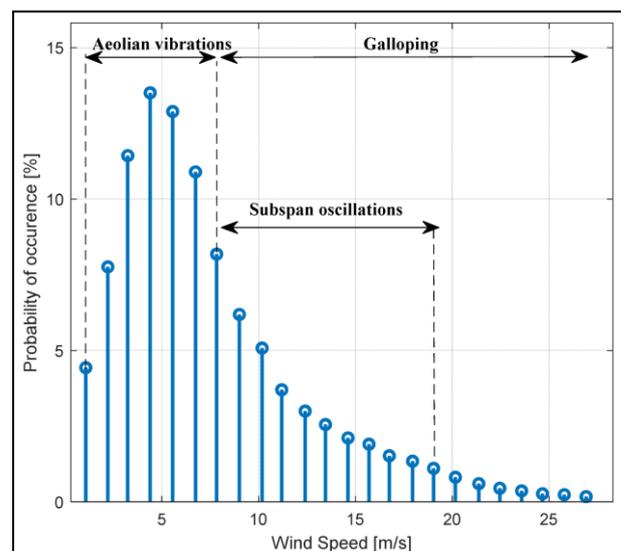
I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral kapasitas pembangkit listrik di Indonesia kapasitas pembangkit listrik terus mengalami kenaikan setiap tahunnya. Dalam beberapa tahun ke depan kenaikan kapasitas pembangkit listrik akan terus berlanjut. Hal tersebut berbanding lurus dengan permintaan konsumen yang setiap tahun semakin meningkat. Kenaikan ini mengakibatkan peningkatan pendistribusian energi listrik ke daerah-daerah. Pendistribusian dapat ditingkatkan dengan penambahan jumlah saluran listrik udara ke daerah-daerah.

Salah satu kendala pembangunan saluran listrik udara adalah adanya getaran *aeolian*. Getaran *Aeolian* adalah getar-



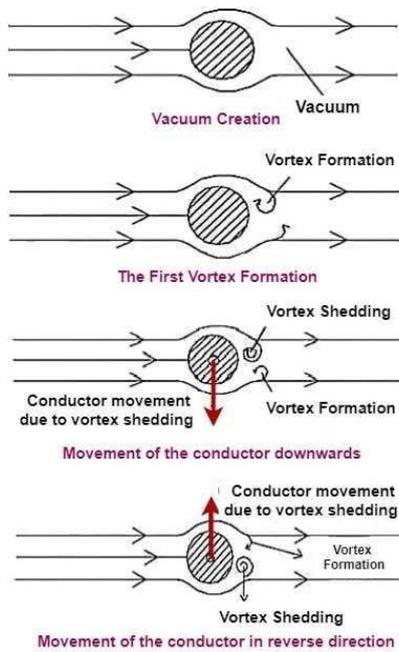
Gambar 1. Fenomena kabel akibat angin.



Gambar 2. Probabilitas terjadinya fenomena pada kabel terhadap kecepatan angin.

an yang disebabkan oleh angin pada kabel konduktor dari saluran listrik udara. Getaran *Aeolian* ditandai dengan amplitudo rendah dengan frekuensi tinggi (5 hingga 150 Hz). Getaran *Aeolian* terjadi ketika aliran angin halus dengan kecepatan 2 sampai 15 mph (1 sampai 7 m/s) mengenai kabel konduktor. Getaran tersebut sering kali dapat mengakibatkan kerusakan pada kabel konduktor. Sehingga *Stockbridge Damper* selalu digunakan untuk meredam getaran tersebut.

Stockbridge Damper adalah *Tuned Mass Damper* yang digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi getaran *aeolian* dengan cara menyerap energi dari getaran kabel konduktor pada saluran listrik udara. *Stockbridge Damper* pertama kali ditemukan pada tahun 1925 oleh seorang insinyur dari *Southern California Edison*, George H. *Stockbridge*. Setelah penemuan pertamanya *Stockbridge Damper* terus mengalami perkembangan hingga sekarang. Pada saat ini *Stockbridge Damper* asimetris adalah *Stockbridge Damper* yang memiliki kinerja yang paling baik. Di pasaran



Gambar 3. Proses terjadinya getaran Aeolian.

persebaran variasi berat total pada *Stockbridge Damper* asimetris semakin banyak. Variasi berat total menjadi acuan penjualan di pasaran. Akan tetapi, perbedaan berat antara kedua *counterweight* tidak terlalu diperhatikan. Sehingga diperlukan penelitian tentang pengaruh variasi massa *counterweight* untuk mempermudah pemilihan *Stockbridge Damper*.

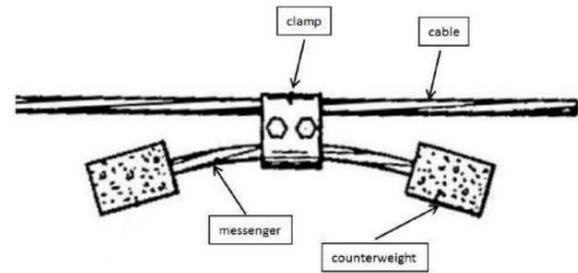
Oleh karena itu, pada penelitian ini akan menyimulasikan kabel konduktor dengan sebuah peredam *Stockbridge Damper* pada software *ANSYS Workbench 2022 R1* dengan analisis *Static Structural*, *Modal* dan *Harmonic Response*. Hasil dari penelitian ini untuk mengetahui respon getaran dari pengaruh variasi massa *Counterweight* sisi berat *Stockbridge Damper* dengan massa *Counterweight* sisi ringan *Stockbridge Damper* tetap terhadap getaran kabel konduktor, untuk mengetahui respon getaran dari pengaruh variasi massa *Counterweight* sisi ringan *Stockbridge Damper* dengan massa *Counterweight* sisi berat *Stockbridge Damper* tetap terhadap getaran kabel konduktor dan untuk mengetahui perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *Stockbridge Damper* yang sama.

II. TINJAUAN PUSTAKA

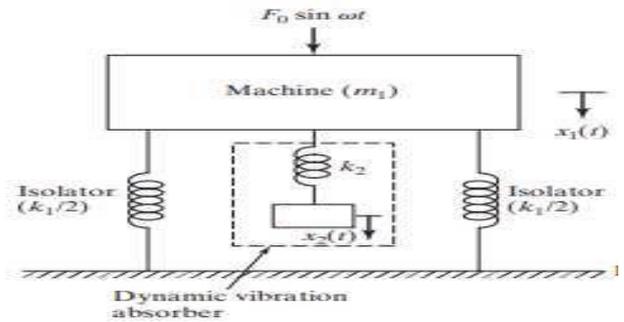
A. Gerakan Kabel Konduktor

Kabel konduktor rentan terjadi gerakan osilasi yang disebabkan oleh angin. Osilasi yang disebabkan oleh angin menghasilkan tiga fenomena utama dalam kondisi yang berbeda, yaitu, *galloping*, osilasi subspan, dan getaran *aeolian* dapat dilihat pada Gambar 1. Getaran *aeolian* mewakili ketidakstabilan yang paling sering terjadi pada kabel saluran listrik udara. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 hasil penelitian Zanelli *et al.* (2022) bahwa kemungkinan terjadinya getaran *aeolian* lebih mungkin terjadi dibandingkan *galloping* dan osilasi subspan [1].

Getaran *Aeolian* adalah getaran yang disebabkan oleh angin pada kabel konduktor dari saluran listrik udara. Getaran *Aeolian* ditandai dengan amplitudo rendah dengan frekuensi tinggi (5 hingga 150 Hz). Getaran *Aeolian* terjadi ketika



Gambar 4. Desain awal *Stockbridge Damper*.



Gambar 5. *Undamped Dynamic Vibration Absorber*.

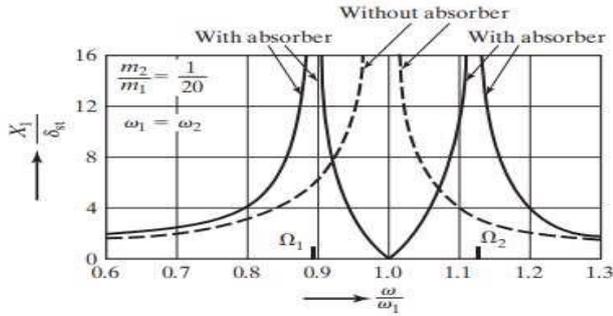
aliran angin halus dengan kecepatan 2 sampai 15 mph (1 sampai 7 m/s) mengenai kabel konduktor. Getaran *aeolian* yang memiliki amplitudo rendah sering kali tidak terlihat mengalami getaran secara kasat mata. Hal ini dapat mengakibatkan kabel konduktor rusak tanpa diketahui tanda kerusakan sebelumnya. Sehingga dapat terjadi kerusakan yang sangat parah yang berakibat pada biaya kerugian kepada konsumen dan biaya perbaikan yang sangat tinggi. Berikut proses terjadinya getaran *aeolian* dan dapat dilihat pada Gambar 3 [2]: (1) Angin mengenai kabel konduktor dan terjadi daerah vakum pada bagian berlawanan pada kabel konduktor, (2) mulai terbentuknya pusaran pada daerah vakum, (3) pelepasan pusaran pada bagian atas dan terbentuknya pusaran baru pada bagian bawah sehingga terjadi gerakan kabel konduktor ke arah bawah., dan (4) pelepasan pusaran pada bagian bawah dan terbentuknya pusaran baru pada bagian atas Sehingga terjadi gerakan bolak-balik.

B. *Stockbridge Damper*

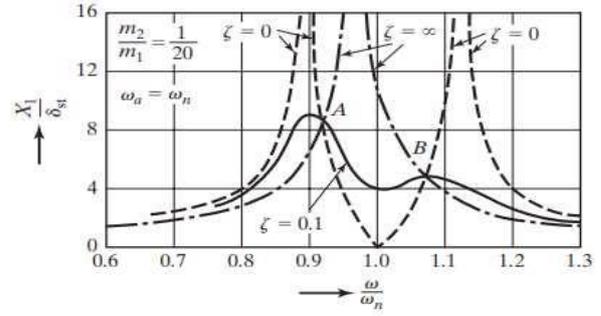
Stockbridge Damper adalah *Tuned Mass Damper* yang digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi getaran *aeolian* dengan cara menyerap energi dari getaran kabel konduktor pada saluran listrik udara. *Stockbridge Damper* ditemukan pada tahun 1925 oleh seorang insinyur dari *Southern California Edison*, George H. *Stockbridge*. Pada awalnya *Stockbridge Damper* di desain dengan balok beton yang ditempatkan secara simetris pada kabel demper seperti yang terlihat pada Gambar 4. Namun gagasan tersebut dengan cepat ditolak karena kinerja mekanisme balok beton yang kurang baik dalam meredam getaran. Sehingga desain terus dikembangkan hingga menjadi model *Stockbridge Damper* saat ini yang lebih mampu mengurangi getaran pada kabel konduktor.

C. *Undamped Dynamic Vibration Absorber*

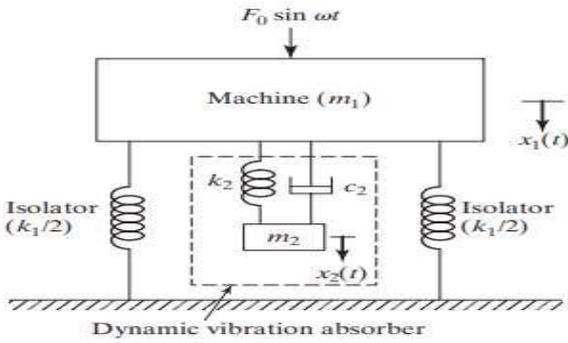
Ketika massa utama (mesin) bermassa m_1 dipasangi massa tambahan m_2 melalui pegas kaku k_2 , maka akan



Gambar 6. Pengaruh *undamped vibration absorber* terhadap respons dari sistem utama.



Gambar 8. Pengaruh *Damped Dynamic Vibration Absorber* terhadap respon dari sistem utama.



Gambar 7. *Damped dynamic vibration absorber*.

menghasilkan sistem 2 *degree-of-freedom* seperti Gambar 5. Persamaan gerak massa m_1 dan m_2 adalah:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

Dengan asumsi penyelesaian harmonik:

$$x_j(t) = X_j \sin \omega t, \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

Sehingga didapatkan amplitudo *steady-state* dari massa m_1 dan massa m_2 sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (4)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (5)$$

Hal terpenting untuk meredam getaran adalah reduksi amplitudo dari massa utama (X_1). Nilai nol didapatkan jika numerator dari persamaan untuk X_1 bernilai nol juga. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (6)$$

Ketika massa utama tanpa *dynamic vibration absorber* bekerja di daerah resonansi dan *dynamic vibration absorber* didesain untuk memiliki frekuensi natural yang bernilai sama dengan frekuensi natural dari massa utama. Sehingga persamaan menjadi:

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (7)$$

Ketika pengoperasian dilakukan pada frekuensi resonansi, maka amplitudo getaran mesin menjadi nol. Hal tersebut mendefinisikan:

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1} \quad (8)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad (9)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (10)$$

Sehingga persamaan (4) dan (5) dapat dituliskan kembali sebagai:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (11)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (12)$$

Dengan ω adalah frekuensi, k adalah konstanta pegas, δ_{st} adalah *static deflection*, m adalah massa, dan X adalah perpindahan translasi. Hasil dari *undamped dynamic vibration absorber* terhadap respons *system* utama dapat dilihat pada Gambar 6 [3].

D. *Damped Dynamic Vibration Absorber*

Pada pengaruh *undamped vibration absorber* yang terlihat pada Gambar 6, didapatkannya dua puncak baru menggantikan puncak resonansi asli pada kurva respons mesin. Dengan demikian mesin mengalami amplitudo yang besar di puncak pertama selama *start-up* dan *stopping*. Amplitudo tersebut dapat diredam atau direduksi dengan menambahkan *damped dynamic vibration absorber* seperti yang terlihat pada Gambar 7. Maka persamaan gerak untuk massa m_1 dan m_2 adalah:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (13)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (14)$$

Dengan asumsi penyelesaian harmonik:

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (15)$$

Sehingga didapatkan amplitudo *steady-state* dari massa m_1 dan massa m_2 sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{F_0 (k_2 - m_2 \omega^2 + i c_2 \omega)}{[(k_1 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - m_2 k_2 \omega^2 + i \omega c_2 (k_1 - m_1 \omega^2 - m_2 \omega^2)]} \quad (16)$$

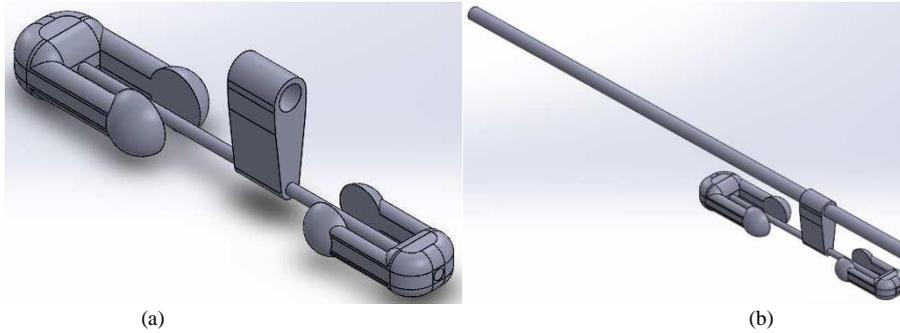
$$X_2 = \frac{X_1 (k_2 + i \omega c_2)}{(k_2 - m_2 \omega^2 + i \omega c_2)} \quad (17)$$

Sehingga nilai X_1 dan X_2 dapat dinyatakan sebagai berikut:

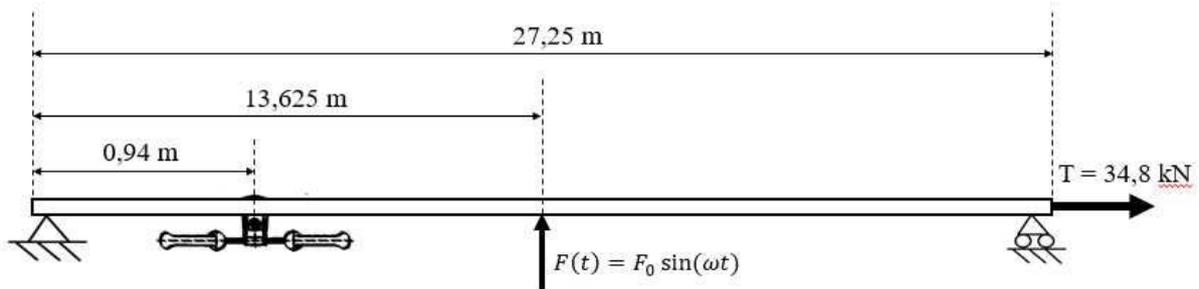
$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Dimana μ adalah *mass ratio*, δ_{st} adalah *static deflection of the system*, f adalah *ratio of natural frequency*, g adalah *forced frequency ratio*, dan ζ adalah *damping ratio*. Hasil dari



Gambar 9. (a) Model *stockbridge damper* dan (b) pemasangan *stockbridge damper* pada kabel konduktor.



Gambar 10. Skema *assembly model* 3 dimensi.

damped dynamic vibration absorber terhadap *respon system* utama dapat dilihat pada Gambar 8 [3].

III. METODOLOGI

Pada penelitian ini berdasarkan eksperimen Barry (2014) yang menggunakan kabel konduktor berjenis 795-KCMIL-DRAKE-ACSR dengan panjang 27,25 m dan diameter total 28,143 mm [4–5]. Kabel konduktor dan kabel demper dibentuk silinder pejal untuk mempercepat dan mempermudah perhitungan. Untuk *Stockbridge Damper* terdapat 3 bagian yaitu *counterweight*, *clamp* dan kabel demper. *Counterweight* menggunakan bahan *cast steel*. *Clamp* menggunakan bahan *aluminum alloy* dan memiliki ukuran tinggi 100 mm dan lebar 60 mm. Kabel demper menggunakan bahan *stainless steel* dengan diameter 12,24 mm dan panjang 520 mm. Kabel demper dengan sisi panjang 300 mm untuk *counterweight* yang lebih berat. Pada simulasi model 3 dimensi dibuat pada *Software Solidwork 2018* dan disimulasikan pada *Software ANSYS Workbench 2022 R1*.

A. Pembuatan Model 3 Dimensi

Pembuatan model 3 dimensi terdiri dari bagian *stockbridge damper* yaitu *clamp*, kabel demper dan *counterweight*. *Clamp*, kabel demper dan *Stockbridge damper* disusun pada ujung kabel konduktor dengan *counterweight* yang lebih berat berada dekat ujung kabel bagian kiri dapat dilihat pada Gambar 9. *Stockbridge damper* dipasang dengan jarak 0,94 m dari ujung kiri kabel konduktor. Skema *assembly* dapat dilihat pada Gambar 10.

B. Free Body Diagram

Dari Gambar 10 disederhanakan menjadi *free body diagram* yang dapat dilihat pada Gambar 11. Di mana kabel konduktor sepanjang ujung kiri ke *clamp* disederhanakan menjadi konstanta pegas kabel konduktor (k_{k2}), kabel konduktor dari *clamp* ke tengah bentang disederhanakan menjadi konstanta pegas kabel konduktor (k_{k2}) dan kabel konduktor dari tengah bentang ke ujung sisi kanan

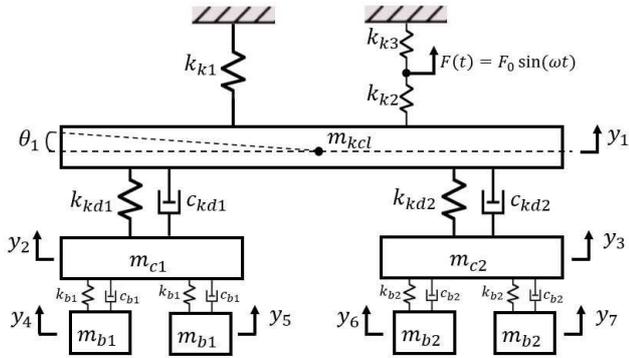
disederhanakan menjadi konstanta pegas kabel konduktor (k_{k3}). Konstanta pegas kabel konduktor (k_{k2}) dan (k_{k3}) dipasang seri dengan diantara pegas terdapat input gaya eksitasi $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$. Konstanta pegas kabel konduktor (k_{k1}) dan konstanta pegas kabel konduktor (k_{k2}) terhubung dengan massa kabel ditambah massa *clamp* (m_{Kcl}). Massa kabel ditambah massa *clamp* (m_{kcl}) terhubung dengan dua massa *Counterweight* (m_c) oleh konstanta pegas (k_{kd}) dan konstanta redaman (c_{kd}) dari kabel demper. Massa *Counterweight* (m_c) terhubung dengan dua massa bagian *Counterweight* (m_b) oleh konstanta pegas (k_b) dan konstanta redaman (c_b) dari massa bagian *Counterweight*.

Perpindahan yang terjadi dalam *free body diagram* berikut yaitu perpindahan rotasi (θ_1) dan perpindahan translasi (y_1) pada massa kabel di tambah massa *clamp* (m_{Kcl}), perpindahan translasi (y_2) terjadi pada massa *Counterweight 1* (m_{c1}), perpindahan translasi (y_3) terjadi pada massa *Counterweight 2* (m_{c2}), perpindahan translasi (y_4) terjadi pada massa bagian *Counterweight 1* sisi kiri (m_{b1}), perpindahan translasi (y_5) terjadi pada massa bagian *Counterweight 1* sisi kanan (m_{b1}), perpindahan translasi (y_6) terjadi pada massa bagian *Counterweight 2* sisi kiri (m_{b2}), perpindahan translasi (y_7) terjadi pada massa bagian *Counterweight 2* sisi kanan (m_{b2}),

C. Skema Analisis

Skema analisis adalah proses di mana kita mengatur langkah analisis dalam simulasi pada *software ANSYS Workbench 2022 R1*. Skema analisis pada penelitian ini dilihat pada Gambar 12 berurutan yaitu analisis *Static Structural* kemudian analisis *Modal* dan dilanjut pada analisis *Harmonic Response*.

Analisis *Static Structural* digunakan untuk menentukan keadaan sistem utama pada posisi diam. Pada penelitian ini *boundary condition* yang digunakan adalah *fixed support* pada tumpuan ujung kiri kabel konduktor dan gaya sebesar 25% RTS (*Rate Tensile Strength*) 34800 N pada permukaan ujung kanan kabel konduktor sebagai gaya tarik untuk



Gambar 11. Free body diagram.

menghasilkan tegangan. Selain itu, *displacement support* digunakan pada garis lingkaran ujung kanan dengan perpindahan ke arah y dan z bernilai nol atau tetap sedangkan perpindahan pada arah sumbu x dibebaskan.

Analisis *modal* digunakan untuk menentukan frekuensi natural dan bentuk mode dari suatu struktur. *Analysis Settings* pada analisis *Modal* dapat digunakan untuk memberikan batasan maksimum dan minimum frekuensi demi mengurangi waktu analisis. Frekuensi yang digunakan adalah dari 25 sampai 50 Hz. Frekuensi ini didapat dari persamaan *strouhal frequency* [6].

Analisis *Harmonic Response* digunakan untuk menyimulasikan bagaimana suatu model akan merespons pembebanan dinamis yang berulang secara sinusoidal. Pembebanan dinamis pada penelitian ini adalah gaya angkat angin dengan arah sumbu y. Gaya angkat angin diberikan terpusat pada bagian tengah bentang kabel konduktor sebesar 6,764 N. *Analysis Settings* pada analisis *Harmonic Response* ini diatur dengan frekuensi 25 sampai 50 Hz dan diatur dengan *Solution Interval* berjumlah 250.

D. Input Engineering Data

Input Engineering Data digunakan untuk memasukkan *material properties* yang akan digunakan pada simulasi. Pada Tabel 1 material yang akan digunakan pada simulasi adalah *aluminum alloy*, *stainless steel*, *cast steel* dan ACSR. ACSR dihomogenkan berdasarkan persamaan pada penelitian Murin *et al.* (2018) [7].

E. Variasi

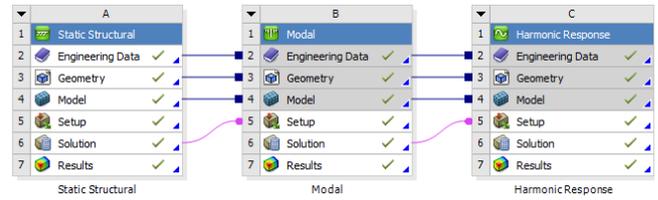
Pada simulasi ini akan memvariasikan massa pada *counterweight* dengan interval massa 0,5 kg dan massa pada *counterweight* lain akan memiliki massa tetap. Massa *counterweight* yang memiliki massa tetap yaitu massa *counterweight* pada sisi berat sebesar 3,5 kg dan sisi ringan sebesar 1,5 kg. Variasi massa pada masing-masing *counterweight* dapat dilihat pada Tabel 2.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

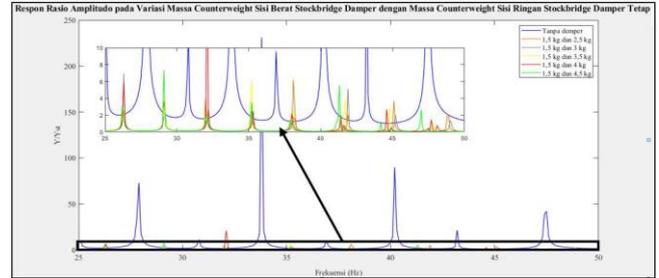
A. Validasi

Simulasi pada penelitian ini didasarkan pada eksperimen yang dilakukan oleh O. R. Barry pada tahun 2014 [4]. Oleh sebab itu, dilakukanlah validasi untuk mengukur tingkat kevalidan dalam pembuatan simulasi terhadap eksperimen yang telah dilakukan.

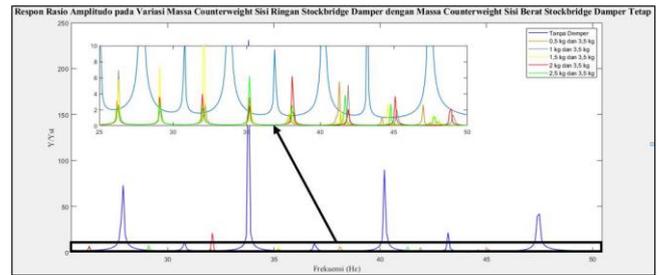
Pada Tabel 3 adalah hasil validasi dari hasil eksperimen sebelumnya dan simulasi pada *software ANSYS Workbench 2022 R1* dengan menyamakan simulasi dengan eksperimen



Gambar 12. Skema analisis *software ANSYS Workbench 2022 R1*.



Gambar 13. Respons rasio amplitudo pada variasi massa *counterweight* sisi berat *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* sisi ringan *stockbridge damper* tetap.



Gambar 14. Respons rasio amplitudo pada variasi massa *counterweight* sisi ringan *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* sisi berat *stockbridge damper* tetap.

yang dilakukan O. R. Barry pada tahun 2014. Didapatkan hasil persentase eror rata-rata 2,58% pada kabel tanpa demper dan 4,87% pada kabel dengan *damper*. Proses validasi simulasi dapat dikatakan valid karena dari kedua hasil rata-rata persentase eror tersebut memenuhi syarat maksimum presentasi eror, yaitu 5%.

B. Respon Rasio Amplitudo

Pada Gambar 13 merupakan grafik *bode diagram* respons rasio amplitudo getaran kabel konduktor pada variasi massa *counterweight* sisi berat *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* sisi ringan *stockbridge damper* tetap. Terlihat pada grafik respons getaran sistem utama kabel konduktor cenderung mengalami penurunan respons rasio amplitudo seiring peningkatan frekuensi. Selain itu, pada grafik respons getaran sistem utama kabel konduktor memiliki 7 frekuensi natural dan frekuensi natural pada respons getaran sistem utama kabel konduktor dengan *stockbridge damper* memiliki frekuensi natural 7 buah. Frekuensi natural tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.

Pada Gambar 14 merupakan grafik *bode diagram* respons rasio amplitudo getaran kabel konduktor pada variasi massa *counterweight* sisi ringan *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* sisi berat *stockbridge damper* tetap. Terlihat pada grafik respons getaran sistem utama kabel konduktor cenderung mengalami penurunan respons rasio amplitudo seiring peningkatan frekuensi. Selain itu, pada grafik respons getaran sistem utama kabel konduktor memiliki 7 frekuensi natural dan frekuensi natural pada respons getaran sistem utama kabel konduktor dengan *stockbridge damper* memiliki

Tabel 1.
Mechanical Properties untuk Input Engineering Data

Mechanical Properties	Clamp	Kabel Damper	Counter weight	Kabel Konduktor
Material	Aluminum Alloy	Stainless Steel	Cast Steel	ACSR
Density (kg/m ³)	2770	7750	7200	3413,77
Elastic Modulus (N/m ²)	7,1×10 ⁺¹⁰	1,93×10 ⁺¹¹	6,61×10 ⁺¹¹	8,83×10 ⁺¹⁰
Poisson's Ratio	0,33	0,31	0,27	0,323

Tabel 2.
Variasi Simulasi Massa Counterweight Stockbridge Damper pada Kabel Konduktor

No.	Posisi Stockbridge	Massa Counterweight Sisi Ringan	Massa Counterweight Sisi Berat
1	0,94 m	1,5 kg	2,5 kg
2		1,5 kg	3 kg
3		1,5 kg	3,5 kg
4		1,5 kg	4 kg
5		1,5 kg	4,5 kg
6	0,94 m	0,5 kg	3,5 kg
7		1 kg	3,5 kg
8		1,5 kg	3,5 kg
9		2 kg	3,5 kg
10		2,5 kg	3,5 kg

Tabel 3.
Hasil Validasi Eksperimen dan Simulasi

Eksperimen O. R. Barry T = 34,8 kN		Simulasi Ansys T = 34,8 kN			
Bare Conductor	Loaded Conductor	Kabel Tanpa Damper	Persentase Error	Kabel dengan Damper	Persentase Error
13,6720 Hz	13,0749 Hz	14,528 Hz	6,26%	13,938 Hz	6,60%
16,6780 Hz	15,5104 Hz	17,071 Hz	2,36%	15,995 Hz	3,12%
19,2800 Hz	17,5942 Hz	19,672 Hz	2,03%	18,149 Hz	3,15%
21,9522 Hz	20,8396 Hz	22,328 Hz	1,71%	20,477 Hz	1,74%
24,9180 Hz	22,7073 Hz	25,059 Hz	0,57%	22,924 Hz	0,95%
27,2153 Hz	24,5587 Hz	27,868 Hz	2,40%	25,414 Hz	3,48%
30,8245 Hz	27,0885 Hz	30,768 Hz	0,18%	27,992 Hz	3,34%
33,6452 Hz	27,7641 Hz	33,808 Hz	0,48%	30,524 Hz	9,94%
36,1602 Hz	31,4490 Hz	36,934 Hz	2,14%	33,281 Hz	5,83%
38,9175 Hz	34,0577 Hz	40,219 Hz	3,34%	36,273 Hz	6,50%
42,2660 Hz	36,5584 Hz	43,214 Hz	2,24%	39,095 Hz	6,94%
44,2518 Hz	40,0444 Hz	47,451 Hz	7,23%	42,804 Hz	6,89%
		Rata-rata	2,58%	Rata-rata	4,87%

Tabel 4.
Frekuensi Natural pada Kabel Konduktor Tanpa Stockbridge Damper dan Variasi Massa Counterweight Sisi Berat Stockbridge Damper dengan Massa Counterweight Sisi Ringan Stockbridge Damper Tetap

Frekuensi Natural					
Tanpa Demper	1,5 kg dan 2,5 kg	1,5 kg dan 3 kg	1,5 kg dan 3,5 kg	1,5 kg dan 4 kg	1,5 kg dan 4,5 kg
27,9 Hz	26,4 Hz	26,3 Hz	26,3 Hz	26,2 Hz	26,2 Hz
30,8 Hz	29,3 Hz	29,2 Hz	29,1 Hz	29,1 Hz	29,1 Hz
33,8 Hz	32,2 Hz	32,1 Hz	32 Hz	32 Hz	32 Hz
36,9 Hz	35,4 Hz	35,3 Hz	35,2 Hz	35 Hz	35 Hz
40,2 Hz	38,2 Hz	38,1 Hz	38,1 Hz	37,9 Hz	37,9 Hz
43,2 Hz	41,8 Hz	41,7 Hz	41,7 Hz	41,6 Hz	41,5 Hz
47,5 Hz	45,3 Hz	45,1 Hz	44,8 Hz	44,9 Hz	44,5 Hz

frekuensi natural 7 buah. Frekuensi natural tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.

Dari Tabel 4 dan 5 terlihat bahwa frekuensi natural pada kabel konduktor dengan stockbridge damper lebih kecil dibandingkan frekuensi natural pada kabel konduktor tanpa stockbridge damper. Hal tersebut sesuai dengan hasil dari eksperimen yang sebelumnya dilakukan oleh Barry (2014) [4]. Di mana dari eksperimen dapat disimpulkan bahwa frekuensi natural pada kabel konduktor dengan stockbridge damper lebih kecil dibandingkan frekuensi natural pada kabel konduktor tanpa stockbridge damper. Selain itu, hal tersebut sesuai dengan rumus $\omega_n^2 = \frac{k}{m}$ dimana frekuensi natural berbanding terbalik dengan massa, sehingga dengan penambahan massa pada kabel konduktor mengakibatkan frekuensi natural semakin kecil.

C. Perbandingan Persentase Reduksi Amplitudo Getaran dengan Massa Total Stockbridge Damper yang Sama

Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa pada variasi stock-

bridge damper dengan massa counterweight 1,5 kg dan 2,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,16% dan terendah pada frekuensi 30,8 Hz sebesar 78,45%. Sedangkan pada variasi stockbridge damper dengan massa counterweight 0,5 kg dan 3,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,13% dan terendah pada frekuensi 30,8 Hz sebesar 78,08%.

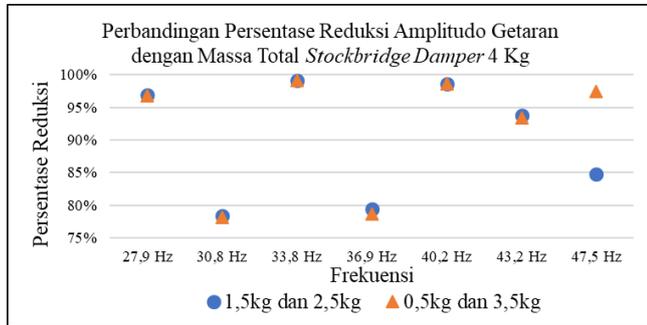
Pada Gambar 16 dapat dilihat bahwa pada variasi stockbridge damper dengan massa counterweight 1,5 kg dan 3 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,19% dan terendah pada frekuensi 30,8 Hz sebesar 78,91%. Sedangkan pada variasi stockbridge damper dengan massa counterweight 1 kg dan 3,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,10% dan terendah pada frekuensi 36,9 Hz sebesar 79,59%.

Pada Gambar 17 dapat dilihat bahwa pada variasi stockbridge damper dengan massa counterweight 1,5 kg dan 4 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,15% dan terendah pada frekuensi 30,8 Hz

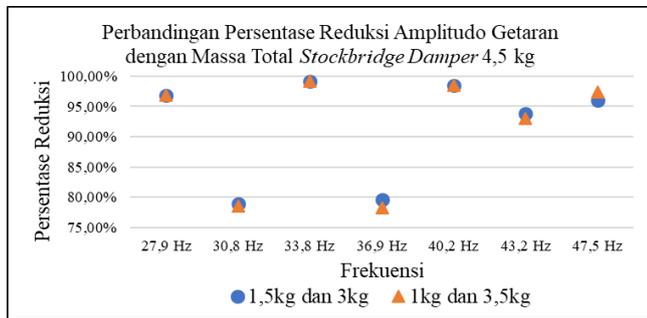
Tabel 5.

Frekuensi Natural pada Kabel Konduktor tanpa *Stockbridge Damper* dan Variasi Massa *Counterweight* Sisi Ringan *Stockbridge Damper* dengan Massa *Counterweight* Sisi Berat *Stockbridge Damper* Tetap

		Frekuensi Natural				
Tanpa Demper	0,5 dan 3,5 kg	1 dan 3,5 kg	1,5 dan 3,5 kg	2 dan 3,5 kg	2,5 dan 3,5 kg	
27,9 Hz	26,3 Hz	26,3 Hz	26,3 Hz	26,3 Hz	26,2 Hz	
30,8 Hz	29,1 Hz	29,2 Hz	29,2 Hz	29,1 Hz	29,1 Hz	
33,8 Hz	32 Hz	32,2 Hz	32 Hz	32,1 Hz	32,1 Hz	
36,9 Hz	35,2 Hz	35,2 Hz	35,2 Hz	35,3 Hz	35,2 Hz	
40,2 Hz	38,1 Hz	38,1 Hz	38,1 Hz	38 Hz	37,9 Hz	
43,2 Hz	41,9 Hz	41,9 Hz	41,7 Hz	41,4 Hz	41,3 Hz	
47,5 Hz	45,1 Hz	45,2 Hz	44,8 Hz	44,6 Hz	44,2 Hz	



Gambar 15. Diagram perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *stockbridge damper* 4 kg.



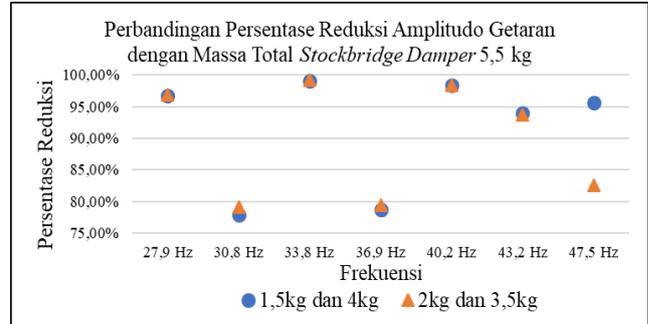
Gambar 16. Diagram perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *stockbridge damper* 4,5 kg.

sebesar 77,83%. Sedangkan pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 2 kg dan 3,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,21% dan terendah pada frekuensi 30,8 Hz sebesar 79,17%.

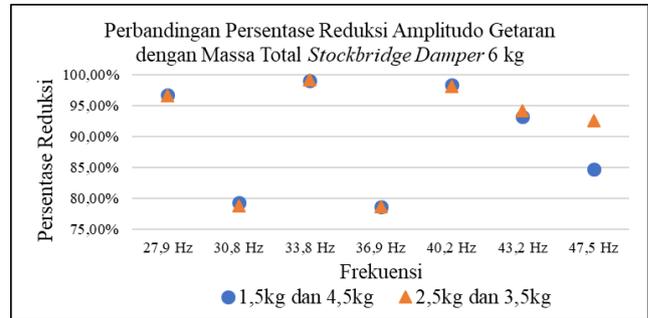
Pada Gambar 18 dapat dilihat bahwa pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 1,5 kg dan 4,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,13% dan terendah pada frekuensi 36,9 Hz sebesar 78,64%. Sedangkan pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 2,5 kg dan 3,5 kg persentase reduksi getaran tertinggi pada frekuensi 33,8 Hz sebesar 99,19% dan terendah pada frekuensi 36,9 Hz sebesar 78,59%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan, antara lain: (1) Hasil respons rasio getaran menunjukkan bahwa frekuensi natural pada kabel konduktor dengan *stockbridge damper* lebih kecil dibandingkan frekuensi natural pada kabel konduktor tanpa *stockbridge damper*. (2) Dari hasil simulasi didapat persentase reduksi amplitudo getaran tertinggi terjadi pada variasi *stockbridge damper* dengan massa *counterweight* 2 kg dan 3,5 kg sebesar 99,21% pada frekuensi 33,8 Hz. Sedangkan persentase reduksi amplitudo getaran terendah terjadi pada variasi



Gambar 17. Diagram perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *stockbridge damper* 5,5 kg.



Gambar 18. Diagram perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *stockbridge damper* 6 kg.

stockbridge damper dengan massa *counterweight* 1,5 kg dan 4 kg sebesar 77,83% pada frekuensi 30,8 Hz. (3) Hasil perbandingan persentase reduksi amplitudo getaran dengan massa total *stockbridge damper* yang sama menunjukkan bahwa *stockbridge damper* dengan selisih massa *counterweight* yang lebih kecil mampu mereduksi lebih besar dibandingkan dengan *stockbridge damper* dengan selisih massa *counterweight* yang lebih besar.

Berdasarkan penelitian penelitian yang dilakukan terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya yaitu validasi dapat dilakukan dengan pengujian eksperimen, mempertimbangkan variabel pusat massa *counterweight* untuk penelitian selanjutnya, dan berdasarkan penelitian berbasis simulasi yang telah dilakukan, disarankan perhitungan parameter dilakukan lebih detail supaya hasil yang didapat lebih mendekati aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Zanelli, M. Mauri, F. Castelli-Dezza, D. Tarsitano, A. Manenti, and G. Diana, "Analysis of wind-induced vibrations on hvlt conductors using wireless sensors," *Sensors*, vol. 22, no. 21. 2022. doi: 10.3390/s22218165.
- [2] H. Kasap, "Investigation of Stockbridge Dampers for Vibration Control of Overhead Transmission Lines," Departemen teknik Mesin, Middle East Technical University, Ankara, Turki, 2012.
- [3] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011. ISBN: 978-0-13-212819-3.
- [4] O. R. Barry, "Vibration Modeling and Analysis of a Single Conductor with Stockbridge Dampers," Departemen Teknik Mesin Industri, University of Toronto, 2014.
- [5] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1993. ISBN: 1-55937-366-0.
- [6] O. R. Barry, "Finite Element Analysis of a Single Conductor with a Stockbridge Damper under Aeolian Vibration," Departemen Teknik Mesin Industri, University of Toronto, 2010. doi: https://doi.org/10.32920/ryerson.14644167.v1.
- [7] J. Murin et al., "Modelling and simulation of power lines made of composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 183, pp. 286–298, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.065.