



ANALISIS KARAKTERISTIK DINAMIK DAN STATIK JEMBATAN GANTUNG 240 METER DENGAN *WIND CABLE* UNTUK JALUR KONVEYOR

Yudi Herdiansah*, Muhammad Panji Nurhuda

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknis, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi

*Corresponding author, email address: yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article History:</i> Received 19 September 2024 Accepted 11 February 2025 Online 30 March 2025 <i>Keywords:</i> Conveyor line Dynamic characteristics Static characteristics Suspension bridge Wind cable	This paper presents a suspension bridge for a conveyor line as the object of study. A finite element model was created to simulate the suspension bridge using SAP 2000 software, and an analysis was conducted to obtain the dynamic and static characteristics of the bridge. The analysis of the dynamic characteristics of the suspension bridge indicates that the natural torsional-to-vertical bending frequency ratio of a suspension bridge with wind cables is twice that of a bridge without wind cables. This increased ratio enhances the bridge's aerodynamic stability and significantly reduces its susceptibility to flutter effects, making it more resilient to aerodynamic influences. The analysis of the static characteristics of the suspension bridge shows that the forces in the suspension cables are evenly distributed, and transverse deformations in the main bridge frame with wind cable are significantly reduced. Furthermore, bridges with wind cables can reduce the D/C ratio in several structural components.

©2025 Magister Teknik Sipil USK. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Selain digunakan sebagai alat bantu penyebrangan orang dan kendaraan, jembatan juga memiliki fungsi lain yang sangat penting, antara lain digunakan sebagai jalur konveyor batubara untuk melintasi rintangan berupa sungai maupun lembah. Untuk kebutuhan melintasi rintangan tersebut, terkadang memerlukan jembatan khusus dengan bentang yang cukup besar sebagai perlintasan konveyor batubara. Jembatan gantung memiliki keunggulan dapat mengakomodir bentangan yang besar, memiliki berat sendiri yang lebih ringan, redaman yang kecil, dan fleksibilitas yang tinggi, sehingga lebih kompetitif dalam pemilihan tipe jembatan untuk bentang panjang. Jembatan gantung memiliki tingkat adaptasi yang cukup baik apabila diterapkan di medan dan iklim yang kompleks, namun demikian di Indonesia masih belum populer penerapannya khususnya sebagai jalur konveyor batubara. Jembatan gantung sebagai jalur konveyor batubara dapat diterapkan di Kalimantan sebagai pulau dengan produksi batubara terbesar di Indonesia dengan medan yang banyak melintasi sungai yang cukup lebar.

Dalam desain dan analisis struktur jembatan gantung untuk jalur konveyor, perlu diperhatikan beberapa kondisi pembebanan yang akan diterima oleh jembatan, antara lain beban konveyor beserta asesoris dan struktur penyangganya, kondisi operasional, metode konstruksi, kondisi lingkungan, serta kombinasi dari setiap beban yang bekerja. Analisis dinamik terhadap pengaruh angin dan beban gempa juga perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil desain jembatan yang memiliki kinerja yang baik, serta memenuhi aspek kekuatan dan keselamatan selama beroperasi.

Beberapa peneliti telah melakukan kajian terkait pengaruh angin pada jembatan gantung serta karakteristik dinamik. Pada tahun 2021 Liu dan Li melakukan kajian mengenai karakteristik dinamik

dan statik jembatan gantung untuk jalur pipa. Hao pada 2015 mengembangkan formula untuk menghitung frekuensi alami struktur jembatan gantung sebagai dasar untuk analisis pengaruh *flutter*, dan ditahun yang sama Permata dan Shirato menjelaskan mengenai mekanisme, cara melakukan analisis dan penanganan terhadap fenomena *flutter* pada jembatan bentang panjang. Johansson dkk. (2013) juga mengkaji mengenai prinsip desain *non-flutter* pada jembatan bentang panjang dengan menurunkan frekuensi torsi ke tingkat frekuensi vertikal atau di bawahnya. Garcia dan Hernandez (2022) menunjukkan bahwa desain penampang dek yang dioptimalkan dapat meningkatkan stabilitas aerodinamik, sejalan dengan studi Hafizh dan Muslikh (2021) yang menyoroti dampak variasi rasio lebar terhadap bentang jembatan. Kim dan Park (2023) mengeksplorasi metode kontrol aktif dan pasif untuk menekan getaran akibat flutter. Dalam analisis numerik, Tristanto (2015) mengkaji mengenai pengaruh sistem kabel utama dalam meningkatkan ketahanan terhadap beban angin, sedangkan Saputra dkk. (2022) menyoroti bagaimana bentuk penampang dek mempengaruhi kecepatan kritis flutter. Secara keseluruhan, mitigasi flutter pada jembatan gantung memerlukan kombinasi pendekatan aerodinamik dan modifikasi struktural, untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban angin ekstrem.

Dalam makalah ini disajikan analisis jembatan gantung tanpa dan dengan *wind cable* untuk jalur konveyor. Model elemen hingga jembatan gantung dikembangkan dengan bantuan perangkat lunak SAP 2000. Pengaruh pemasangan *wind cable* terhadap karakteristik dinamik dikaji, serta analisis karakteristik statik keseluruhan struktur jembatan dilakukan untuk memberikan gambaran yang diperlukan dalam mendesain jembatan gantung.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Analisis Modal

Dalam melakukan analisis modal atau analisis karakteristik dinamik struktur digunakan bantuan perangkat lunak. Pada perangkat lunak konvensional terdapat 2 metode analisis yang umum digunakan yaitu metode *Modal Eigen* dan *Ritz Vector*. *Modal Eigen* atau *Eigen Vector* merupakan salah satu metode analisis karakteristik dinamik yang memberikan gambaran pola ragam dan frekuensi getaran alami tanpa pengaruh redaman dan gaya luar dari struktur. Pola ragam dan frekuensi getaran alami ini dapat memberikan informasi yang baik tentang perilaku struktur yang dianalisis. Berbeda dengan metode *Eigen*, *Ritz Vector* mempertimbangkan pengaruh arah gaya dari luar pada analisisnya, sehingga perlu dilakukan pendefinisian kasus beban (*load case*) mana yang akan diperhitungkan. Karena metode *Ritz* telah mempertimbangkan arah gaya, metode ini sangat efektif untuk mendapatkan hasil yang konvergen (*mass partisipasi* yang lebih banyak dengan sedikit pola ragam getar), hal ini dikarenakan metode numerik pada analisis *Ritz Vector* akan memprioritaskan untuk mendapatkan pola ragam getar yang polanya sesuai dengan arah beban yang telah didefinisikan.

2.2 Analisis Flutter

Jembatan gantung sebagai jembatan bentang panjang memiliki elemen struktur yang fleksibel dan sensitif pengaruh hembusan angin. Fenomena *flutter* pada jembatan akibat pengaruh angin adalah yang paling banyak dikenal, seperti yang menyebabkan keruntuhan pada jembatan Tacoma Narrow pada tahun 1940. *Flutter* adalah getaran akibat aliran angin yang diinisiasi oleh gerakan benda tersebut. Gerakan akan semakin membesar dan tidak teredam, dan semakin membesar akibat gaya aerodinamik. Fenomena *flutter* yang umum pada jembatan adalah *torsional flutter* (hanya melibatkan gerak torsional) dan *coupled flutter* (melibatkan interaksi gerak vertikal dan torsional) (Permata & Shirato, 2015). Ada 3 cara utama untuk meningkatkan ketahanan terhadap angin dari sebuah struktur: meningkatkan kekakuan keseluruhan struktur, mengontrol karakteristik getaran dari struktur, dan meningkatkan karakteristik aerodinamika dari bagian struktur (Zhang & Ying, 2006).

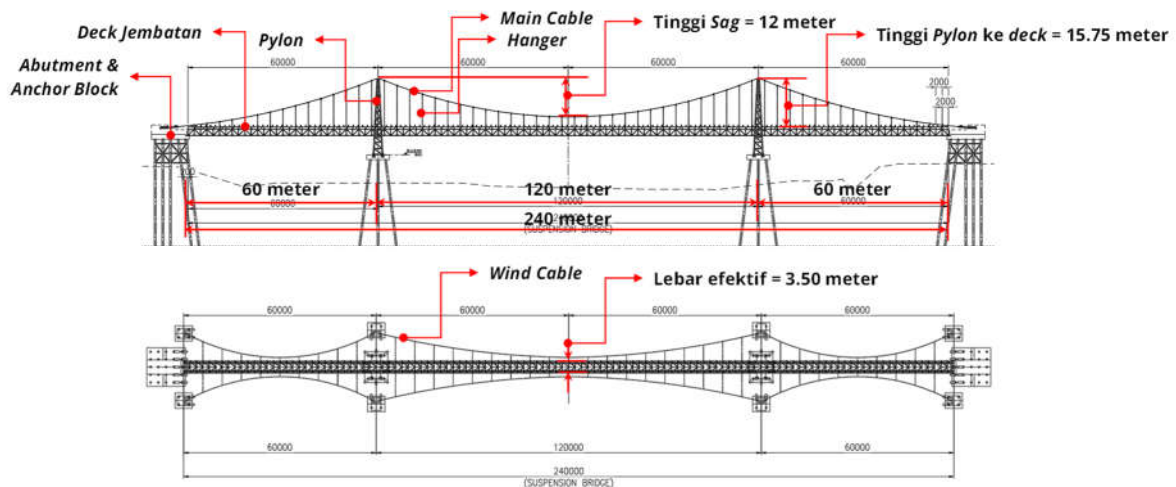
Disamping pendekatan aerodinamik, ketidakstabilan *flutter* pada jembatan gantung dapat dilakukan dengan pendekatan struktur, yaitu dengan memodifikasi struktur jembatan sehingga memiliki frekuensi

torsional yang lebih besar, dan rasio frekuensi torsional terhadap frekuensi vertikal (f_ϕ/f_η) diatas 1 atau lebih besar (Andersen dkk., 2014). Frekuensi torsional yang besar akan mengurangi resiko terjadinya torsional *flutter*, dan dengan rasio frekuensi torsional terhadap frekuensi vertikal yang besar dapat mengurangi resiko terjadinya *coupled flutter*.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Deskripsi Jembatan Gantung

Jembatan gantung untuk jalur konveyor dalam penelitian ini adalah jembatan gantung *multi-span* yang terdiri dari bentang utama sepanjang 120 meter yang diukur dari *pylon* ke *pylon* dan dua bentang tepi sepanjang 60 meter dari *pylon* ke *abutment*, sehingga total bentang adalah 240 meter. Tinggi sag kabel utama adalah 12 meter, sementara tinggi *pylon* dari *deck* jembatan adalah 15,75 meter. Lebar efektif jembatan untuk jalur konveyor dan akses oprasional sebesar 3,5 meter. Gambar *general layout* dan potongan berdasarkan dapat dilihat pada Gambar 1.



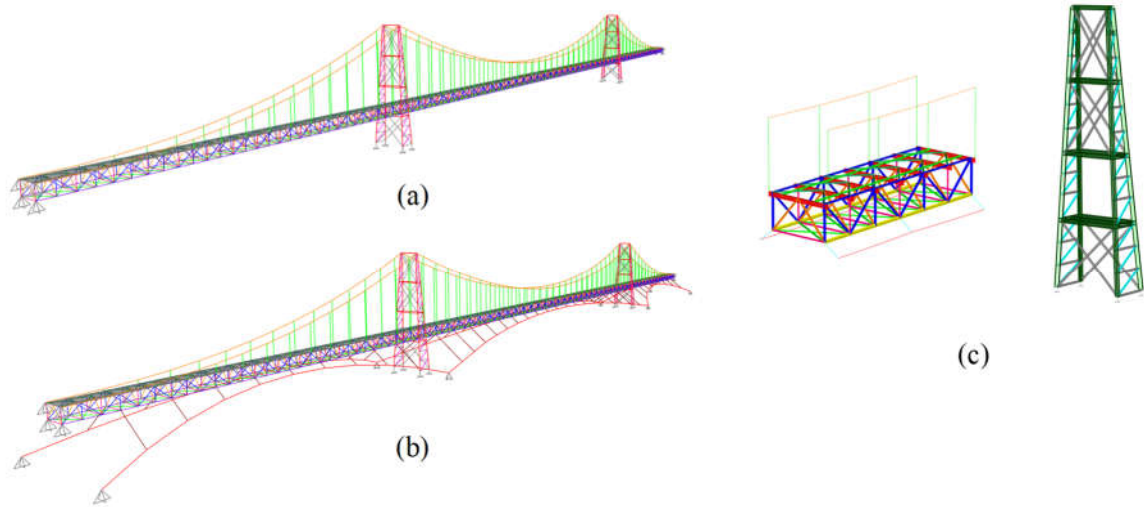
Gambar 1 . Layout Jembatan Gantung

3.2 Metode Elemen Hingga

Pada penelitian ini, struktur jembatan gantung dimodelkan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga, yaitu SAP2000 v.22. Berdasarkan karakteristik masing-masing komponen struktur, model dibangun menggunakan tiga jenis elemen, yaitu elemen kabel, elemen truss, dan elemen frame balok/kolom. Elemen kabel digunakan untuk memodelkan kabel utama (*main cable*) dan kabel angin (*wind cable*) dengan mempertimbangkan nonlinieritas geometri serta perilaku *tension-only*. Sementara itu, elemen *truss* (*tension-only*) digunakan untuk memodelkan *hanger*, rangka baja *deck* jembatan, serta *bracing*, sedangkan elemen frame balok/kolom digunakan untuk memodelkan struktur *pylon*. Elemen kabel dan truss merupakan elemen satu dimensi (1D) yang terdiri dari dua node, di mana masing-masing node memiliki tiga derajat kebebasan translasi, sedangkan elemen frame balok/kolom memiliki 3 derajat kebebasan translasi dan 3 derajat kebebasan rotasi di setiap nodenya, sehingga mampu merepresentasikan perilaku lentur struktur. Perletakan sendi dan rol dimodelkan pada masing-masing ujung rangka baja *deck* jembatan, sementara perletakan jepit diterapkan pada tumpuan dasar *pylon*, serta model sendi digunakan pada setiap ujung kabel utama.

Dalam penelitian ini, dilakukan dua pemodelan elemen hingga untuk mengkaji pengaruh *wind cable* terhadap karakteristik dinamik jembatan gantung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Analisis nonlinier diterapkan untuk menangkap deformasi kabel akibat beban serta efek tegangan awal (*prestress*), sehingga menghasilkan distribusi gaya dan respons struktural yang lebih akurat.

Untuk mengevaluasi karakteristik dinamik jembatan, digunakan analisis Ritz Vector guna memperoleh nilai frekuensi dan periode getaran alami dari sepuluh mode getar pertama. Sementara itu, karakteristik statik jembatan dievaluasi berdasarkan parameter gaya aksial pada kabel utama dan hanger, deformasi vertikal dan transversal jembatan, serta *demand per capacity* (D/C) *ratio* pada komponen struktural.



Gambar 2 . Model Elemen Hingga (a) Jembatan tanpa *Wind Cable* (b) Jembatan dengan *Wind Cable* (c) Detail *Deck* dan *Pylon*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Dinamis

Analisis karakteristik getaran alami dilakukan pada struktur jembatan gantung tanpa dan dengan *wind cable*. Rekapitulasi nilai frekuensi dan periode getaran alami dari 10 ragam getar pertama ditunjukkan pada Tabel 1, dan bentuk ragam getar yang terbentuk untuk jembatan tanpa *wind cable* dan dengan *wind cable* masing-masing dapat dilihat pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 12, dan Gambar 13 sampai dengan Gambar 22.

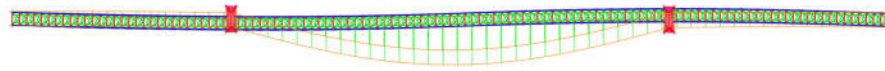
Tabel 1 menunjukkan bahwa periode getaran alami pada ragam getar pertama pada jembatan tanpa *wind cable* adalah 6,134 detik dengan frekuensi 0,163 Hz. Nilai periode tersebut menunjukkan bahwa struktur tergolong memiliki periode yang panjang. Sedangkan pada jembatan dengan *wind cable* periode getaran alami pada ragam getar pertamanya adalah 2,291 detik dengan frekuensi 0,437 Hz. Berdasarkan nilai periode tersebut menunjukkan bahwa struktur jembatan dengan *wind cable* menghasilkan nilai frekuensi alami yang lebih besar dari jembatan tanpa *wind cable*.

Tabel 1. Ukuran Frekuensi dan perioda alami dari 10 ragam getar pertama struktur jembatan

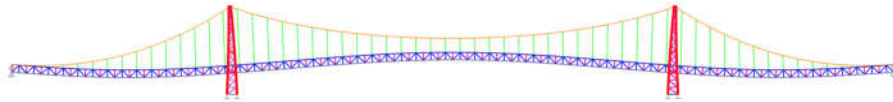
Ragam Getar	Tanpa <i>Wind Cable</i>		Dengan <i>Wind Cable</i>	
	Perioda (det.)	Frekuensi (Cyc/det.)	Perioda (det.)	Frekuensi (Cyc/det.)
1	6.134	0.163	2.291	0.437
2	1.828	0.547	1.788	0.559
3	1.586	0.630	1.414	0.707
4	1.216	0.822	0.885	1.130
5	1.157	0.865	0.847	1.180
6	0.820	1.220	0.641	1.560
7	0.753	1.329	0.628	1.593
8	0.635	1.575	0.564	1.772
9	0.572	1.750	0.481	2.078
10	0.374	2.677	0.294	3.399



Gambar 3. Pola Ragam Getar 1: Tranversal – Half Sinusoidal ($T = 6,134$; $f = 0,163$)



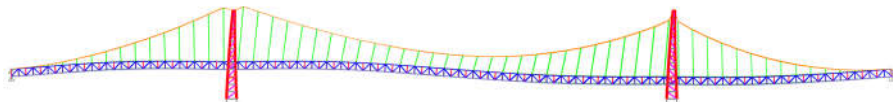
Gambar 4. Pola Ragam Getar 2: Tranversal – Full Sinusoidal ($T = 1,828$; $f = 0,547$)



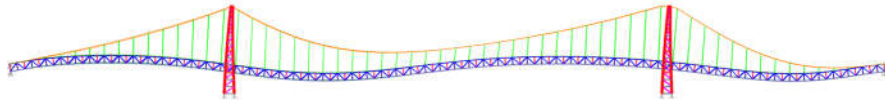
Gambar 5. Pola Ragam Getar 3: Vertikal – Full Sinusoidal + Half Sinusoidal ($T = 1,586$; $f = 0,630$)



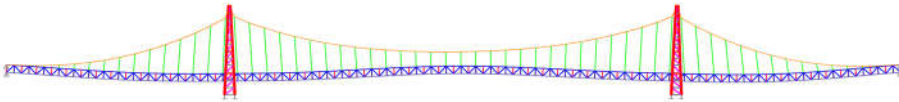
Gambar 6. Pola Ragam Getar 4: Tranversal – Full Sinusoidal ($T = 1,216$; $f = 0,822$)



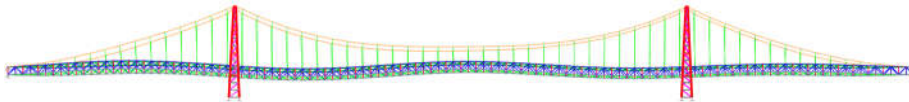
Gambar 7. Pola Ragam Getar 5: Vertikal – Full Sinusoidal ($T = 1,157$; $f = 0,865$)



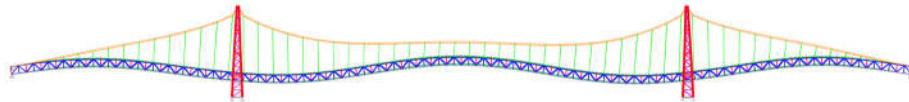
Gambar 8. Pola Ragam Getar 6: Vertikal – 2 Full Sinusoidal ($T = 0,820$; $f = 1,220$)



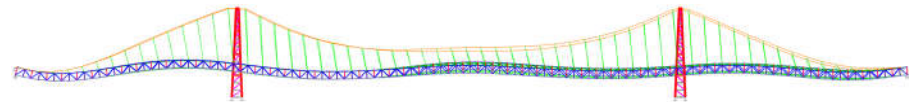
Gambar 9. Pola Ragam Getar 7: Vertikal – Full Sinusoidal + Half Sinusoidal ($T = 0,753$; $f = 1,329$)



Gambar 10. Pola Ragam Getar 8: Torsional Tranversal – 2 Full Sinusoidal ($T = 0,635$; $f = 1,575$)



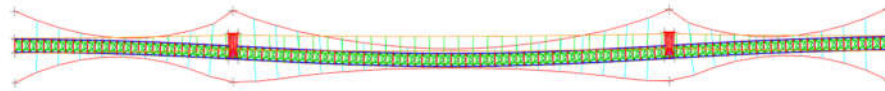
Gambar 11. Pola Ragam Getar 9: Vertikal – 2 Full Sinusoidal + Half Sinusoidal ($T = 0,572$; $f = 1,750$)



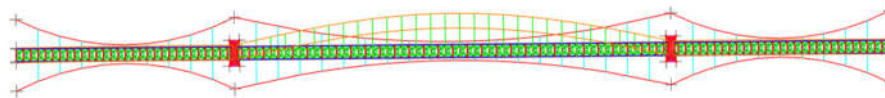
Gambar 12. Pola Ragam Getar 10: Vertikal – 3 Full Sinusoidal ($T = 0,374$; $f = 2,677$)

Pada jembatan gantung tanpa *wind cable*, pola gerak transversal pertama terjadi pada ragam getar 1 (Gambar 3), pola gerak vertikal pertama terjadi pada ragam getar 3 (Gambar 5), dan pola gerak puntir/torsi pertama terjadi pada ragam getar 8 (Gambar 10). Sama seperti pada jembatan tanpa *wind cable*, pada jembatan gantung dengan *wind cable* pola gerak transversal pertama terjadi pada ragam getar 1 (Gambar 13) dan pola gerak vertikal pertama terjadi pada ragam getar 3 (Gambar 15). Sedangkan untuk pola gerak

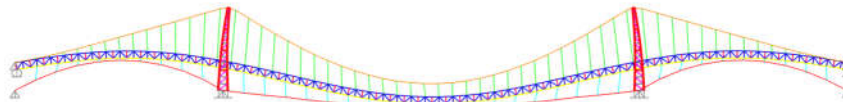
puntir/torsi pertama terjadi pada ragam getar 9 (Gambar 21). Dengan demikian untuk struktur jembatan gantung tanpa dan dengan *wind cable*, getaran alami pertama kali dimanifestasikan sebagai pola gerak transversal yang menunjukkan bahwa jembatan gantung tersebut lebih dipengaruhi oleh beban transversal, sedangkan bending vertikal dan torsi muncul kemudian. Rasio frekuensi alami torsional terhadap frekuensi alami lentur vertikal (f_ϕ/f_η) untuk kedua jembatan dengan dan tanpa *wind cable* masing-masing adalah 4,25 dan 2,94.



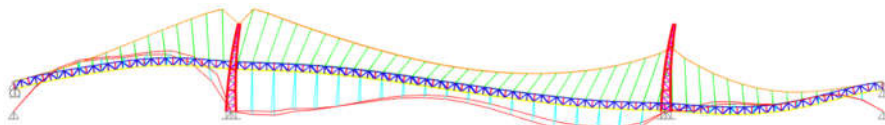
Gambar 13. Pola Ragam Getar 1: Transversal – Half Sinusoidal ($T = 2,291$; $f = 0,437$)



Gambar 14. Pola Ragam Getar 2: Transversal – *Hanger Deformation* ($T = 1,788$; $f = 0,559$)



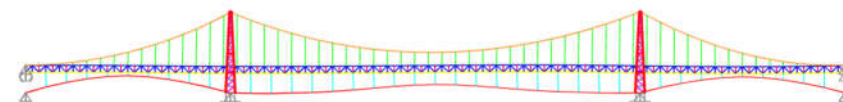
Gambar 15. Pola Ragam Getar 3: Vertikal – Full Sinusoidal + Half Sinusoidal ($T = 1,414$; $f = 0,707$)



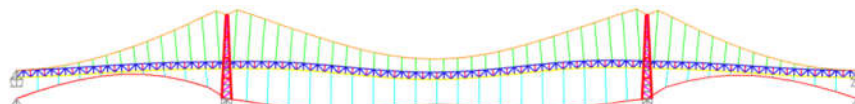
Gambar 16. Pola Ragam Getar 4: Vertikal – Full Sinusoidal ($T = 0,885$; $f = 1,135$)



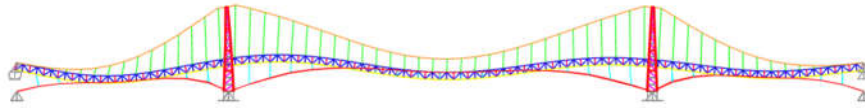
Gambar 17. Pola Ragam Getar 5: Transversal – Full Sinusoidal + Half Sinusoidal ($T = 0,847$; $f = 1,180$)



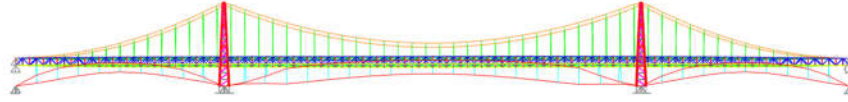
Gambar 18. Pola Ragam Getar 6: Vertikal – 2 Half Sinusoidal ($T = 1,560$; $f = 1,561$)



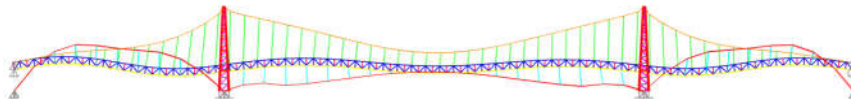
Gambar 19. Pola Ragam Getar 7: Vertikal – 2 Half Sinusoidal ($T = 0,628$; $f = 1,593$)



Gambar 20. Pola Ragam Getar 8: Vertikal – 3 Full Sinusoidal ($T = 0,564$; $f = 1,773$)



Gambar 21. Pola Ragam Getar 9: Torsional Transversal – 2 Half Sinusoidal ($T = 0,481$; $f = 2,078$)

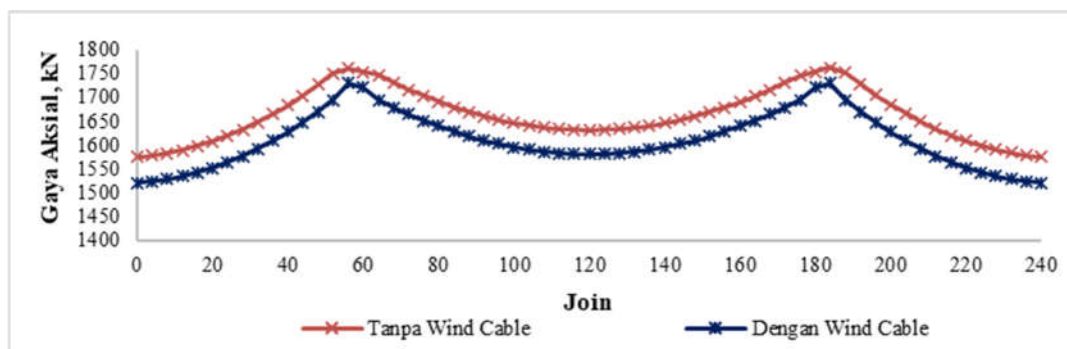


Gambar 22. Pola Ragam Getar 10: Vertikal – 2 Full Sinusoidal + 2 Half Sinusoidal ($T = 0,294$; $f = 3,400$)

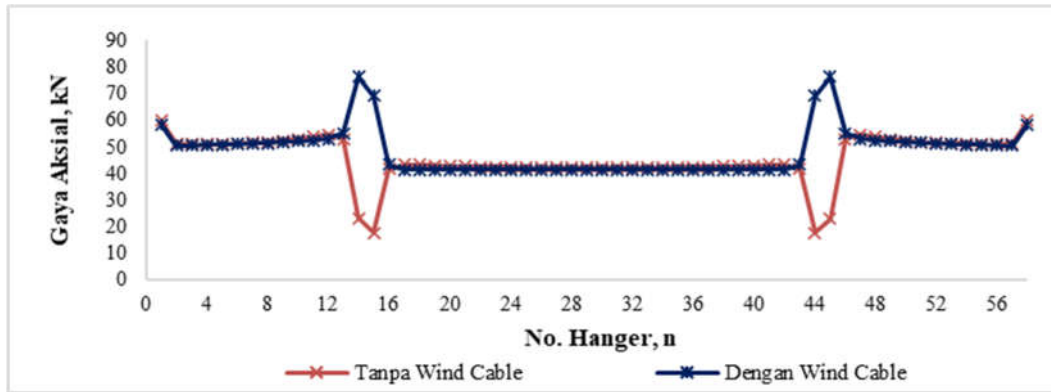
4.2 Analisis Karakteristik Statik

Jembatan gantung ini memiliki dua kabel utama yang paralel berdampingan dengan jarak melintang 3,5 meter. Pada kondisi oprasional kabel utama pada jembatan gantung akan berperan sebagai komponen utama dalam menahan beban. Gaya aksial pada kabel utama untuk struktur tanpa dan dengan *wind cable* dapat dilihat pada Gambar 23. Gaya aksial yang terjadi pada kabel utama untuk struktur jembatan tanpa dan dengan *wind cable* memiliki pola yang sama namun dengan nilai yang berbeda, pada jembatan tanpa *wind cable* menghasilkan gaya aksial pada kabel utama yang lebih besar seperti yang dapat dilihat pada Gambar 23. Gaya aksial terbesar terletak di area *pylon* dan bertahap berkurang ke tepi dan ke tengah bentang, yang artinya semakin besar derajat kemiringannya maka semakin besar pula gaya aksial yang terjadi.

Jembatan gantung pada penelitian ini memiliki total 58 pasang komponen *hanger* dengan jarak antar batang *hanger* adalah 4 meter. Gaya aksial yang terjadi pada *hanger* jembatan dapat dilihat pada Gambar 24. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 24, gaya aksial yang terjadi pada *hanger* jembatan relatif seragam dari *hanger* 1-13, *hanger* 46-58 (*pylon* ke tepi), dan *hanger* 16-43 (*pylon* ke *pylon*). Sedangkan *hanger* 15, 16 dan *hanger* 44, 45 (di area *pylon*) menunjukkan nilai yang berbeda. Untuk jembatan tanpa *wind cable*, *hanger* di area *pylon* menghasilkan gaya aksial yang lebih kecil dan sebaliknya untuk jembatan dengan *wind cable*, *hanger* 15, 16 dan *hanger* 44, 45 menghasilkan gaya aksial yang lebih besar dari *hanger* yang lainnya.



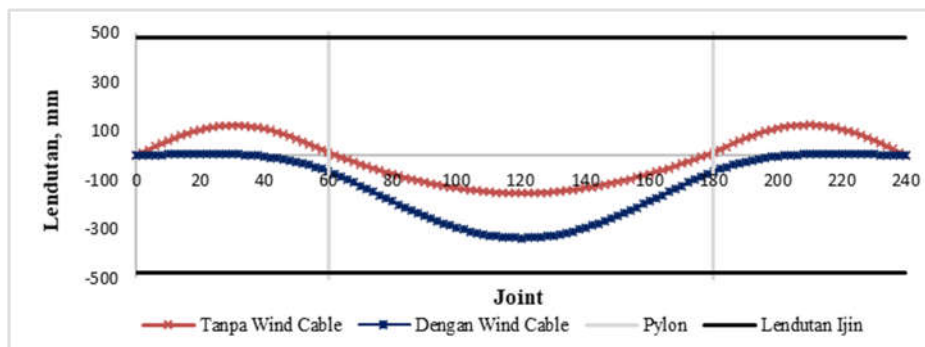
Gambar 23. Gaya Aksial pada Kabel Utama Struktur Jembatan Gantung



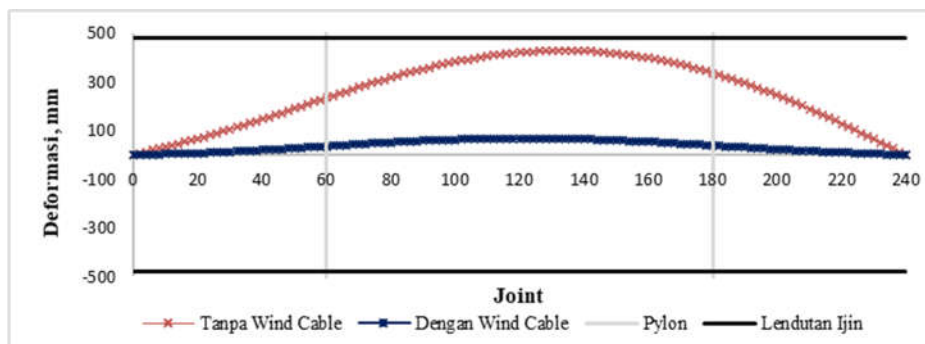
Gambar 24. Gaya Aksial pada Hanger Struktur Jembatan Gantung

Tinjauan deformasi dilakukan pada arah vertikal (lendutan) dan arah transversal jembatan untuk struktur tanpa *wind cable* dan dengan *wind cable* seperti yang ditunjukkan Gambar 25 dan Gambar 26. Tinjauan lendutan dilakukan di node tepi bawah lantai jembatan terhadap beban layan yang bekerja. Berdasarkan hasil analisis, jembatan tanpa *wind cable* memiliki lendutan maksimal sebesar 135 mm dan jembatan dengan *wind cable* memiliki lendutan maksimum sebesar 336 mm. Kedua nilai pada setiap kondisi masih memenuhi persyaratan lendutan yaitu $L/250 = 480$ mm. Lendutan yang terjadi pada struktur tanpa *wind cable* lebih kecil dibandingkan lendutan pada struktur dengan *wind cable*.

Terdapat perbedaan yang signifikan pada pengecekan deformasi arah transversal jembatan, dimana struktur jembatan gantung tanpa *wind cable* memiliki deformasi yang jauh lebih besar dibandingkan struktur jembatan gantung dengan *wind cable*. Deformasi transversal maksimum untuk jembatan tanpa *wind cable* adalah sebesar 427 mm sedangkan untuk jembatan dengan *wind cable* sebesar 67 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan *wind cable* sangat berpengaruh signifikan dalam meningkatkan kekakuan jembatan arah transversal dan dapat mereduksi deformasi arah transversal jembatan.



Gambar 25. Lendutan Struktur Jembatan Gantung



Gambar 26. Deformasi Transversal Struktur Jembatan Gantung

Jembatan gantung beserta struktur *pylon* didesain menggunakan komponen baja struktural. Pengecekan kekuatan komponen struktur dilakukan untuk jembatan tanpa dan dengan *wind cable* seperti yang disajikan pada Tabel 2. Dapat dilihat bahwa pada struktur jembatan dengan *wind cable* terdapat beberapa komponen struktur yang memiliki nilai *demand per capacity ratio* (D/C ratio) di atas 1,00; hal tersebut menunjukkan komponen tersebut tidak memenuhi syarat kekuatan berdasarkan SNI 1729:2015 dan ANSI/AISC 360-16.

Tabel 2. Rekapitulasi Pengecekan Kekuatan Komponen Struktur

No	Penampang	Tipe Desain	D/C Ratio	
			Tanpa <i>Wind Cable</i>	Dengan <i>Wind Cable</i>
1	WF 200.150.6.9	<i>Beam</i>	0.847	0.937
2	2L 130.130.12	<i>Beam</i>	1.030	0.951
3	2L 75.75.6	<i>Brace</i>	1.164	0.821
4	2L 70.70.6	<i>Brace</i>	0.564	0.351
5	2L 60.60.6	<i>Beam</i>	0.984	0.133
6	L 100.100.10	<i>Beam</i>	0.228	0.196
7	L 75.75.6	<i>Column</i>	0.061	0.061
8	L 70.70.6	<i>Brace</i>	0.299	0.302
9	L 60.60.6	<i>Brace</i>	1.718	0.204
10	H 350.350.12.19	<i>Column</i>	0.705	0.721
11	C 180.75.7.10.5	<i>Beam</i>	0.963	0.973
12	C 150.75.6,5.10	<i>Brace</i>	0.289	0.286

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam makalah ini dilakukan analisis terhadap jembatan gantung untuk jalur konveyor tanpa dan dengan *wind cable*. Disajikan perbandingan antara karakteristik dinamik dan statik dari keduanya, dan dapat disimpulkan antara lain bahwa mode getar alami pertama menunjukkan arah getaran transversal, dimana mode tersebut lebih dipengaruhi beban transversal akibat angin, dengan frekuensi getaran arah transversal meningkat signifikan pada jembatan dengan *wind cable*. Rasio frekuensi torsional terhadap frekuensi lentur vertikal pada jembatan tanpa dan dengan *wind cable* lebih besar dari 2,00; sehingga keduanya sama-sama memiliki kerentanan yang rendah terhadap pengaruh *flutter* dan dapat dianggap memenuhi kriteria stabilitas aerodinamik. Gaya pada kabel utama akibat beban yang bekerja pada jembatan dengan *wind cable* lebih kecil dari jembatan tanpa *wind cable*. Gaya terbesar terdapat di area *pylon*, dengan demikian semakin besar derajat kemiringannya maka semakin besar pula gaya yang terjadi. Keberadaan *wind cable* berpengaruh pada lebih besarnya gaya pada *hanger* di area *pylon*, namun demikian diluar area *pylon* gaya pada hangger relatif seragam untuk kedua jembatan tanpa dan dengan *wind cable*. *Wind cable* pada jembatan gantung dapat memperkecil deformasi arah transversal dengan cukup signifikan, dan untuk deformasi vertikal pada jembatan dengan *wind cable* lebih besar di bentang utama tetapi lebih kecil di bentang tepi. Dari pengecekan kekuatan, jembatan dengan *wind cable* dapat memperkecil D/C ratio pada beberapa komponen strukturnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Liu, L., W, Li. 2021. Analysis of dynamic and static characteristics of suspension bridge with wind cable. *The Civil Engineering Journal*. 02, 572-579.
- Hao, J. 2015. Natural vibration analysis of long span suspension bridges, *5th International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET)*.
- Permata, R., Shirato, H. 2015. Fenomena flutter pada jembatan bentang panjang: Tinjauan mekanisme, analisis dan penanganan. *Prodiding Seminar dan Pameran Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI)*. Jakarta, Indonesia.

- Johansson, J., Andersen, M. S., Ovre M. S. 2013. Non-flutter design principle for long span bridges. *Proceedings of the Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*.
- Garcia, M., Hernandez, S. 2022. Aerodynamic optimization of suspension bridge decks to mitigate flutter instability, *Journal of Bridge Engineering*. 27(3), 04022024.
- Hafizh, A. N., Muslikh, M. 2021. Analisis kestabilan suspension bridge tipe steel box girder dengan variasi rasio lebar terhadap bentang jembatan. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil*. 11, 55-62.
- Kim, S., Park, J. 2023. Flutter analysis and control of long-span suspension bridges under wind loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 231, 104814.
- Tristanto, L. 2015. Modifikasi sistem kabel utama jembatan gantung untuk meningkatkan stabilitas struktural. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*. 9, 35-42.
- Saputra, A. D., Gunawan, L., Adhy, R. S., Akbar, M. 2022. Pengaruh bentuk penampang seksional dek jembatan bentang panjang terhadap analisis kecepatan kritis flutter. *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan*. 8(2), 89-101.
- Zhang, X. J., Ying, L. D. 2006. Wind resistant measures of long span suspension bridge. *China Highway*. 11, 73-74.
- Andersen, M. S., Sahin, E., Laustsen, B., Lenius, M., Laeso, J. R. 2014. Implementation of the non-flutter design principle. *XIII Conference of the Italian Association for Wind Engineering*. Genova, Italy.
- SNI 1729:2020, T. 2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: BSN.
- ANSI/AISC 360-16, T. 2016. *Specification for Structural Steel Buildings*.