PENGARUH MASSA KABEL (*WIRE ROPE*) PADA FREKUENSI ALAMI DAN PREDIKSI GAYA AKSIAL TARIK

Margeritha Agustina Morib[1)]

[1)]Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Immanuel Yogyakarta

e-mail : margerithaagustina@yahoo.co.id

INTISARI

Pengukuran gaya aksial tarik yang mudah dan akurat pada kabel jembatan merupakan hal yang sangat penting dalam rangka pembangunan dan pemeliharaan jembatan cable stayed dan jembatan suspensi. Penelitian ini dimaksudkan untuk memperhitungkan pengaruh massa dan keakuratannya dalam pengukuan gaya aksial tarik kabel dengan mengetahui perilaku dinamiknya menggunakan metode vibrasi. Benda uji berupa kabel (wire rope) dengan dimensi 6x37+IWRC berdiameter 6 mm dengan panjang 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m digantung vertikal pada tumpuan sendi dan diberi gaya aksial tarik.

Massa yang digunakan untuk membandingkan perhitungan teoritis dan hasil penelitian adalah massa terukur dengan berdasarkan pada diameter aktual wire rope saat menerima beban, massa tertimbang yaitu massa wire rope per meter panjang dan massa berdasarkan perhitungan teoritis. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan dua buah accelerometer yang dipasang pada ½ dan ¼ bentang kabel dan sinyal getaran diterima oleh A/D converter Dewe 43 kemudian dibaca dan diolah menggunakan software dewesoft. Frekuensi hasil eksperimen digunakan untuk memprediksi gaya aksial tarik pada kabel dengan menggunakan taut string theory.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa prediksi dengan menggunakan taut string teori memberikan hasil yang paling mendekati eksperimental apabila digunakan massa terukur. Semakin panjang kabel prediksi semakin akurat.

Kata kunci : kabel, wire rope, vibrasi, frekuensi alami, gaya aksial

I. PENDAHULUAN

Jembatan *cable stayed* dan jembatan suspensi berkembang dengan sangat pesat dan menjadi *landmark* suatu daerah. *Wire rope* pada jembatan *cable stayed* memegang peranan sangat penting dalam mendukung gaya aksial tarik dan sangat menentukan kestabilan dan kekuatan dari seluruh jembatan. Pengukuran yang akurat terhadap gaya aksial tarik yang terjadi pada *wire rope* sangat diperlukan dalam rangka pembangunan jembatan (*construction site monitoring*) dan

pemeliharaan jembatan (*structural health monitoring*). Metode pengukuran yang mudah dan akurat dilakukan adalah dengan menggunakan metode vibrasi. Metode ini perlu terus dikembangkan untuk meningkatkan keakuratannya dengan mempertimbangkan keseluruhan sifat fisik dan mekanik dari *wire rope*.

Metode vibrasi merupakan metode pengukuran tidak langsung yang didasarkan pada frekuensi alami, dikembangkan atas dasar hubungan antara modal properties (frekueni alami dan *mode shape*) dengan gaya aksial tarik pada *wire rope*. Prosedur metode vibrasi pada kabel secara umum digunakan dengan mengumpulkan respon kabel yang mengalami getaran bebas (*free vibration*) yang ditangkap oleh *accelerometer* dan dilakukan perekaman frekuensi alami struktur dengan menggunakan bantuan *software* dan *A/D converter* terhadap gaya eksitasi berupa *impact* dengan pukulan tangan atau *hammer*, kabel ditarik kemudian dilepas (*pull release*) maupun *ambient vibration*. Kemudian frekuensi alami dan nomer mode diekstrak dari hasil analisis menggunakan teknik analisis modal untuk mengumpulkan data dan akhirnya gaya aksial tarik *wire rope* ditentukan berdasarkan *analytical close form solution* yang menghubungkan antara frekuensi alami dan gaya aksial tarik (Kim dan Park, 2007).

Penelitian ini menggunakan *wire rope* dengan konstruksi 6x37+IWRC berdiameter 6 mm dengan panjang 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m yang digantung secara vertikal dan mengalami peningkatan gaya aksial tarik. Dari penelitian ini diharapkan akan diperoleh hubungan antara variasi panjang dan peningkatan gaya aksial tarik pada *wire rope* dengan tumpuan sendi terhadap frekuensi alami *wire rope* dengan menggunakan metode vibrasi.

1. Tujuan Penelitian

a. Mengetahui hubungan antara gaya dan kekakuan aksial non linier yang terjadi pada *wire rope*.
b. Mengetahui pengaruh massa *wire rope* pada frekuensi alami dan prediksi gaya aksial tarik
c. Mengetahui pengaruh variasi panjang *wire rope* pada frekuensi alami dari *wire rope* dan prediksi gaya aksial tarik.
d. Membandingan hasil perhitungan metode vibrasi dengan *taut string theory*, hasil perhitungan numerik dengan SAP 2000 dan dengan hasil pengukuran eksperimental.

2. Kajian penelitian estimasi gaya aksial tarik menggunakan metode vibrasi

Penelitian mengenai perilaku mekanik *wire rope* dilakukan oleh Elata, dkk (2003) dengan membuat model baru untuk mengsimulasi respon mekanik *wire rope* dengan *independent wire rope core* (IWRC). *Wire rope* menerima beban aksial tarik dan aksial torsi. Permodelan sempurna *wire rope* adalah dengan menggunakan konfigurasi *double helix* dari masing-masing *wire* yang terikat

pada *strand*. Model tersebut kemudian dibandingkan dengan data eksperimental yang dilakukan dengan melakukan pengujian tarik pada *wire rope* dengan konstruksi 6x36+IWRC dengan beban aksial mencapai 150 KN. Panjang *wire rope* yang digunakan adalah 1500 mm dan dijepit dengan dua buah soket pada kedua ujungnya.

Zui, dkk (1996) melakukan penelitian untuk menemukan formula praktis dalam memperkirakan gaya aksial tarik pada kabel menggunakan metode vibrasi. Formula tersebut mempertimbangkan pengaruh dari gaya aksial, kekakuan lentur dan sag pada kabel. Formula tersebut bisa diaplikasikan pada semua tipe kabel selama pengukuran frekuensi alami mode 1 dan 2 bisa terukur. Formula tersebut diverivikasi dengan membandingkan hasil perhitungan dengan penelitian yang dilakukan Shinke, dkk (1980) dan analisis elemen hingga yang dilakukan Shimada (1994). Hampir keseluruhan hasil perhitungan menunjukkan hasil mendekati baik hasil eksperimental yang dilakukan oleh Shinke, dkk (1980) ataupun solusi numerik yang dilakukan oleh Shimada (1994) dengan kesalahan maksimum 0,4%.

Fang dan Wang (2012) melakukan penelitian untuk menemukan formula praktis dalam mengestimasi gaya aksial tarik pada kabel dengan formula yang sederhana dimana kekakuan lentur dari kabel diperhitungkan tetapi pengaruh *sag* diabaikan. Keandalan dari formula tersebut diverifikasi melalui perbandingan dengan hasil pengujian yang telah ada dan solusi numerik dengan *finite element analysis*. Hasil perbandingan tersebut mengindikasikan bahwa formula yang dihasilkan akurat dan bisa diaplikasikan dalam pengukuran gaya aksial dari jembatan *cable stayed* maupun jembatan suspensi. Akurasi dari formula tersebut diverifikasi dengan membandingkan hasil dari formula pendekatan dengan eksperimen yang dilakukan oleh Shinke, dkk (1980) dan analisis elemen hingga yang dilakukan oleh Shimada (1994). Eksperimen yang dilakukan oleh Shinke, dkk (1980) di laboratorium menggunakan specimen kabel sepanjang 3,40 m dan 31,5 m, w = 0,144 kN/m dan EI = 34,5 kN/m^2. Sedangkan Shimada (1994) melakukan analisis elemen hingga untuk kabel dengan metode vibrasi dengan properti w = 1,028 kN/m, EI = 380,3 kN/m^2, panjang 301,9 m dan sudut inklinasi 23°.

Kim, dkk (2007) melakukan studi perbandingan berbagai teknik dalam memperkirakan gaya aksial kabel dengan metode vibrasi yang tersedia dalam pengukuran jembatan kabel. Metode estimasi yang digunakan yaitu *taut string theory* (gaya aksial saja), *beam string theory* (gaya aksial dan kekauan lentur), *modern cable theory* (*sag* tanpa kekakuan lentur), formula praktis Zui, dkk (1996) (gaya aksial, kekakuan lentur dan *sag*) dan pengujian statik dengan metode *lift of test*. Berbagai teknik diaplikasikan dalam mengukur empat buah kabel miring (*incline cable*) pada jembatan *Seohae Grand Bridge* dan tujuh buah *double hangers* pada jembatan *Yeongjong Grand Bridge*. Estimasi gaya aksial dibandingkan dengan pengujian statik. Untuk *cable stayed* pada jembatan *cable stayed*, akurasi dari hasil perkiraan dipengaruhi oleh perbadingan *sag* terhadap

panjang kabel dan kekakuan lentur dari kabel. Untuk *hangers* pada jembatan suspensi, perbandingan lokasi jepitan (*clamp location*) dan panjang efektif adalah faktor kritis yang mempengaruhi akurasi dari hasil perkiraan. Diantara berbagai teknik yang digunakan dengan berbasis pada identifikasi frekuensi alami menunjukkan hasil perkiraan yang konsisten dengan kesalahan 3 % pada berbagai aplikasi.

3. Landasan teori

a. Gaya aksial tarik berdasarkan frekuensi alami kabel dengan *Taut String Theory*

Kabel suspender dimodelkan sebagai kabel vertikal dengan panjang L, dengan tumpuan sendi pada kedua ujungnya, Luas tampang kabel (A) merupakan luas ekuivalen dari perkalian jumlah luas seluruh *wire strand* kabel. Pada *taut string model* kekakuan lentur diabaikan. Massa kabel per meter panjang (m) dinyatakan dari massa jenis baja ρ dikalikan luas penampang *wire strand* $m = \rho A$.

$$T = 4mL^2\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \qquad \text{……..} \qquad (1)$$

dengan :

T	:	gaya aksial tarik kabel (N)
m	:	massa per satuan panjang kabel (kg/m')
L	:	panjang kabel (m)
f_n	:	frekuensi alami mode ke-n (Hz)
n	:	nomor mode

b. Massa *wire rope*

Massa *wire rope* sangat mempengaruhi keakuratan pengukuran, oleh karena itu digunakan berbagai metode pengurukuran massa. Asumsi massa yang pertama yaitu massa yang diperoleh dari hasil perhitungan secara teoritis. Secara teoritis massa kabel per meter panjang dinyatakan dari massa jenis baja ρ dikalikan luas penampang *wire strand.*

$$m = \rho A \qquad \text{……..} \qquad (2)$$

dengan :

m	:	massa *wire rope* (kg/m')
ρ	:	massa jenis baja (kg/m^3)
A	:	luas ekuivalen dari perkalian jumlah luas seluruh *wire strand* kabel (m^2)

Asumsi massa yang kedua adalah massa terukur yaitu massa yang dihitung berdasarkan luasan *wire rope* keseluruhan. Diameter luar luar *wire rope* diukur pada saat kabel tegang yaitu saat kabel menerima beban sehingga *wire rope* diasumsikan bekerja sebagai satu kesatuan yang disatukan dengan gesekan/friksi antar *wire*. Massa dihitung berdasarkan luasan *wire rope* yang dihitung dengan menggunakan diameter luar-luar *wire rope* dikalikan dengan massa jenis *wire rope*.

Asumsi massa yang ketiga adalah massa tertimbang yaitu *wire rope* yang digunakan untuk penelitian ditimbang dan hasil penimbangan tersebut yaitu massa *wire rope* per meter panjang digunakan sebagai massa dalam perhitungan prediksi gaya aksial tarik.

c. Teknik analisis modal

Metode untuk menentukan *mode shape* dan frekuensi alami dari struktur disebut dengan teknik analisis modal. Jenis mode getaran diketahui dengan bisa digambarkannya mode getaran berdasarkan besarnya amplitudo yang terukur oleh *accelerometer*. Amplitudo getaran yang terukur berupa amplitudo percepatan dan perlu diubah menjadi simpangan untuk dapat menggambarkan *mode shape*. Untuk mengubah percepatan menjadi simpangan digunakan rumus :

$$X_{(t)} = \frac{\ddot{x}_{(t)}}{(2\pi\ fn)^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (3)$$

dengan :

$X_{(t)}$ = simpangan dinamik (mm)

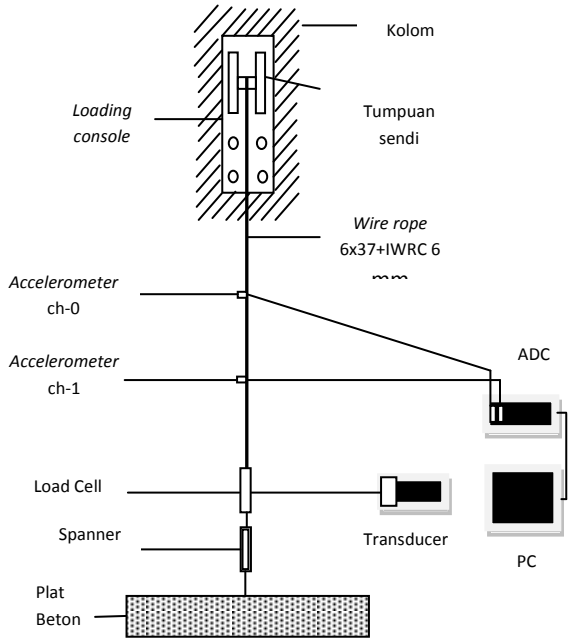
$\ddot{x}_{(t)}$ = percepatan dinamik (mm/det^2)

fn = frekuensi alami (Hz)

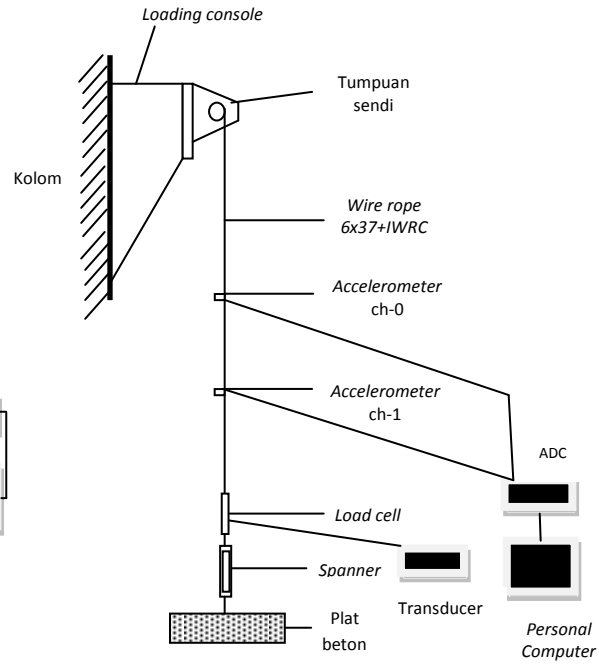
4. Metode Penelitian

Benda uji pada penelitian ini menggunakan empat buah *wire rope* dengan konstruksi 6x37+IWRC berdiameter 6 mm dengan panjang pilin 3 cm. Panjang masing-masing benda uji yaitu 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m. *Wire rope* digantungkan secara vertikal pada tumpuan sendi dan diberikan gaya aksial tarik sebesar 1580 N, 3160 N, 4740 N, 6120 N, 7900 N dan 10590 N. Dua buah *accelerometer* dipasang pada ½ dan ¼ bentang dari panjang *wire rope* untuk menjumput sinyal getaran yang akan diterima oleh *A/D Converter Dewe 43* kemudian dibaca dan diolah dengan bantuan *software Dewesoft*. Sinyal getaran yang terukur adalah sinyal getaran yang diperoleh dari pengujian *impact vibration* dengan pukulan tangan dan pengujian *ambient vibration*.

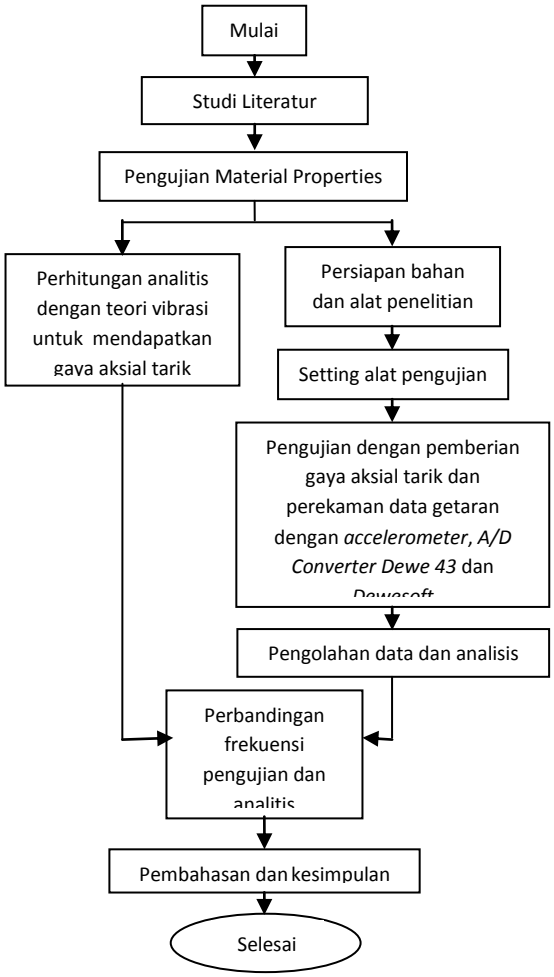
Set up pengujian tampak pada Gambar 1 dan 2 sedangkan bagan alir penetilian tampak pada Gambar 3.



Gambar 1 *Set up* pengujian (tampak depan)



Gambar 2 *Set up* pengujian(tampak samping)

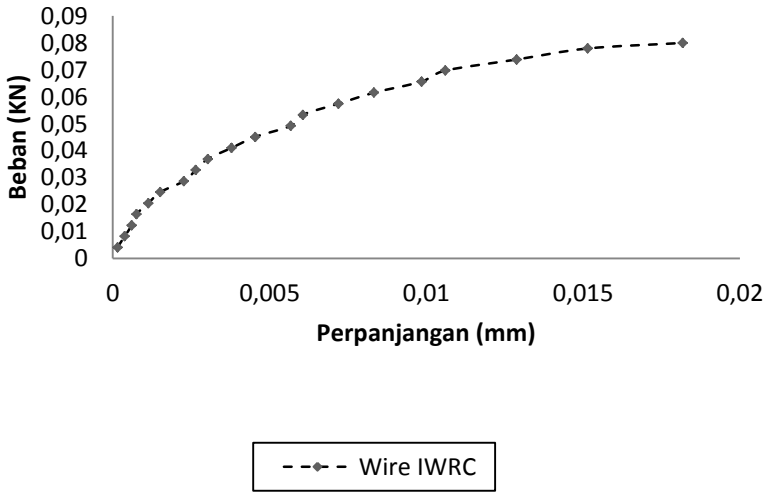


Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

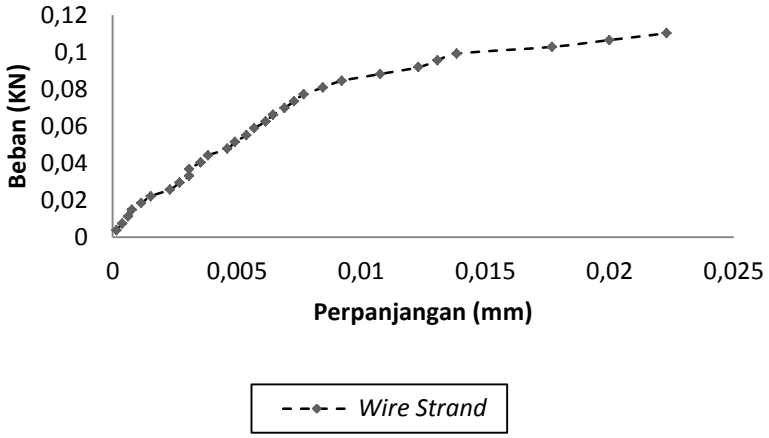
5. Hasil Penelitian dan Pembahasan

a. Hasil pengujian karakteristik bahan

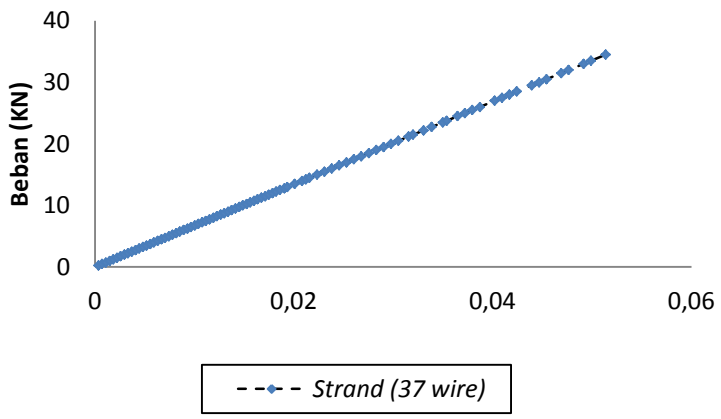
Pengujian tarik dilakukan pada 4 buah specimen pengujian yaitu *wire* penyusun IWRC, *wire* penyusun *strand*, *strand* yang terdiri dari 37 wire dan *wire rope* 6x37+IWRC yang terdiri dari 6 buah *strand* yang masing-masing terdiri dari 37 *wire* dan IWRC yang terdiri dari 7 buah *strand* dengan masing-masing terisi 7 buah *wire*. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan *universal testing machine* (UTM) untuk mendapatkan tegangan leleh, tegangan ultimit dan modulus elastis bahan. Hasil pengujian tarik dapat dilihat pada gambar 4 sampai dengan gambar 7.



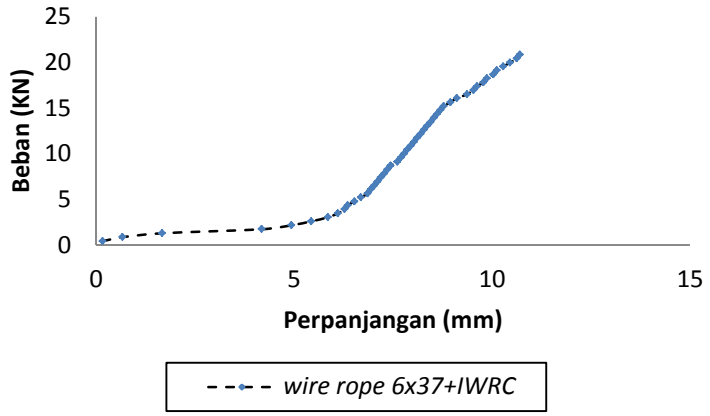
Gambar 4 Grafik hubungan antara beban dan perpanjangan *wire* penyusun IWRC (diameter = 0,23 mm)



Gambar 5 Grafik hubungan antara beban dan perpanjangan *wire* penyusun *strand* (diameter = 0,25 mm)



Gambar 6 Grafik hubungan antara beban dan perpanjangan *strand* (37 *wire* diameter = 0,25 mm)



Gambar 7 Grafik hubungan antara beban dan perpanjangan *wire rope* (diameter = 5,88 mm)

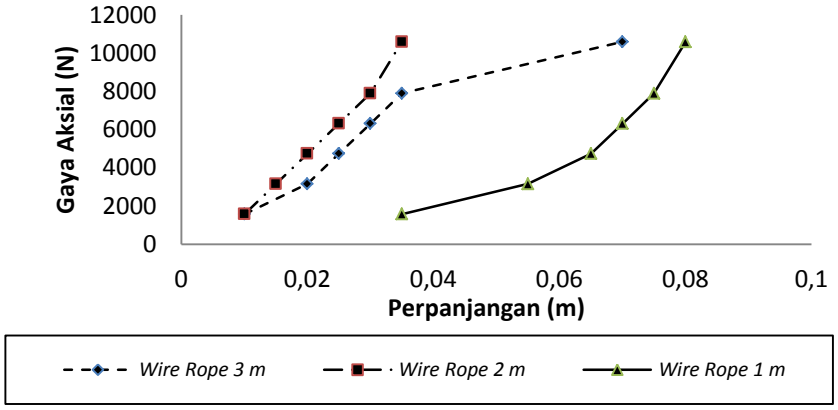
Pada pengujian tarik *wire rope* terjadi peningkatan kekakuan aksial (*axial stiffening*) yang disebabkan karena pengaruh gesekan (*friction*) pada saat kabel semakin mengencang. Pada beban kecil peningkatan kekakuan aksial yang terjadi juga kecil, seiring dengan meningkatnya beban peningkatan kekakuan aksial semakin membesar sampai saat *wire rope* mulai putus dimulai dari *wire strand* terluar sampai pada *core* IWRC. Pada saat *wire* pada *wire rope* mulai putus kekakuan aksial mulai menurun (*softening*) dan akhirnya putus total. Beban aksial terbesar mencapai 20,8402 KN dengan perpanjangan maksimum 10,705 mm.

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa modulus elastisitas *wire rope* lebih rendah dari modulus elastis *wire* penyusunnya. Modulus elastisitas dari *wire* penyusun *strand* lebih rendah dari pada *wire* penyusun IWRC. Dari hasil pengujian tarik diperoleh tegangan leleh dan ultimit dari *wire* penyusun *wire rope* adalah fy = 1792,3 MPa dan fu = 2240 MPa. Hasil tersebut memenuhi

persyaratan minimum klasifikasi berdasarkan kuat tarik kawat (Tabel 3, SNI 0076:2008). *Wire* yang diuji termasuk dalam kelas B dengan persyaratan kuat tarik minimum 1770 N/mm^2 untuk kawat tanpa lapisan atau berlapis seng (termasuk proses penarikan dngin setelah pelapisan seng).

b. Perpanjangan *wire rope*

Perpanjangan pada masing-masing *wire rope* saat menerima beban diukur dan hasilnya digunakan untuk menghitung gaya dalam *wire rope* secara analitis. Hubungan beban perpanjangan *wire rope* disajikan dalam Gambar 8.



Gambar 8 Grafik hubungan gaya aksial dan perpanjangan *wire rope* (eksperimen)

Dari grafik dapat disimpulkan bahwa perpanjangan *wire rope* dipengaruhi oleh peningkatan beban. Pertambahan panjang yang terjadi tidak linier meskipun beban maksimum yang diterima *wire rope* baru mencapai 58% dari fy (masih dibawah tegangan ijin). Semakin besar gaya aksial yang diterima *wire rope* pertambahan panjang semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku *wire rope* tidak sama dengan perilaku batang pejal (*rod*). Pada *wire rope* terjadi peningkatan kekakuan aksial karena pengaruh gesekan (*friction*) antara masing-masing *wire* pada *wire rope*. Pada saat gaya aksial yang diterima *wire rope* membesar rongga antar *wire* mengecil dan mengakibatkan gesekan membesar. Dari hasil eksperimen pada *wire rope* 3 m hasil pengukuran perpanjangannya ada yang menyimpang cukup jauh dari tren yang terjadi. Hal tersebut dipengaruhi oleh faktor jepitan (klem) di ujung *wire rope*. Pada saat beban bertambah besar maka diameter *wire rope* mengecil dan menyebabkan kemungkinan *wire rope* dapat lolos/slip dari klem jepitannya.

c. Analisis sinyal

Pengujian dinamik dilakukan di laboratorium JTSL UGM untuk memperoleh data frekuensi alami dan *mode shape* dari *wire rope* dengan setting up pengujian seperti tampak pada gambar 9.

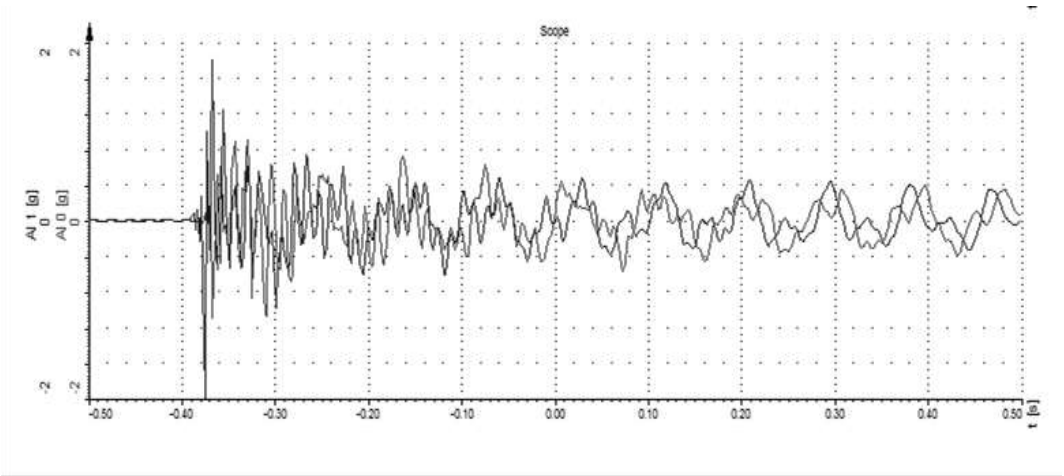
Gambar 9 *Set up* pengujian dan intrumentasi pengukuran

Sinyal frekuensi yang terekam pada *Software Dewesoft* telah mencukupi kebutuhan bentuk sinyal yang diperlukan yaitu sinyal dalam domain frekuensi dan domain waktu. Data *sampling rate* 500 sample/detik didapat frekuensi *nyquist* sebesar 250 Hz untuk kabel 3,5 m, 3 m dan 2 m. Sedangkan untuk kabel 1 m data direkam dengan *sampling rate* 500 sample/detik, 1000 sample/detik dan 2500 sample/detik. Tampilan display analisis dilakukan pada *line resolusion* df = 0.244 Hz (1024) tipe *window Blackman* dan skala tampilan x dan y secara linier.

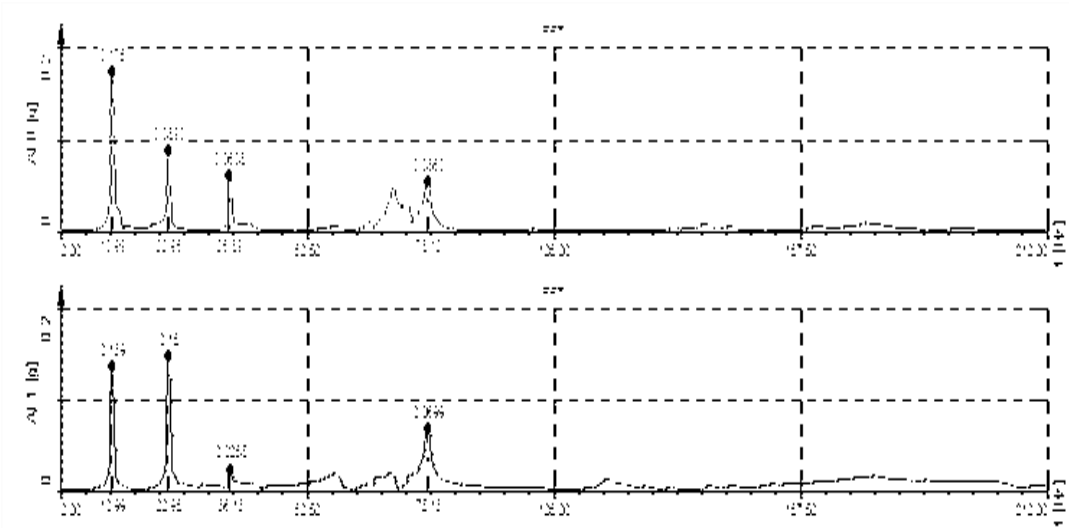
Display *dewesoft* memperlihatkan frekuensi dan amplitudo, ketika diberikan getaran bebas (*free vibration*) dengan metode *impact* dengan pukulan tangan maupun *ambient vibration*. Proses pemukulan ini dilakukan berulang dengan interval waktu saat kecenderungan amplitudo kembali ke titik netral. Frekuensi alami *wire rope* ditetapkan dengan acuan amplitudo yang muncul dengan nilai terbesar dan waktu yang lama pada tampilan *dewesoft*. Seluruh proses dilakukan untuk seluruh tahapan pembebanan berikutnya dengan variasi panjang *wire rope* yang lain.

1) Pengujian *impact vibration*

Hasil pengujian *impact vibration* dapat ditampilkan dalam domain waktu ataupun domain frekuensi. Dalam domain waktu, kurva respon dari masing-masing kabel pada masing-masing pembebanan menunjukkan penurunan yang tidak linier seiring dengan pertambahan waktu. Penurunan tersebut lama kelamaan akan hilang dan ini disebabkan karena adanya faktor redaman yang dimiliki oleh masing-masing *wire rope*. Respon dalam domain waktu dapat dirubah ke dalam domain frekuensi. Garis-garis amplitudo dalam domain frekuensi menunjukkan frekuensi alami dari masing-masing *wire rope* dan pertama menunjukkan frekuensi alami *wire rope* pada mode pertama, sedangkan garis amplitudo kedua menunjukkan frekuensi alami pada mode ke dua dari *wire rope* dan seterusnya. Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan hasil pengujian *impact vibration* dalam domain waktu dan domain frekuensi.



Gambar 10 Respon *wire rope* dalam domain waktu (*impact vibration*)



Gambar 11 Respon *wire rope* dalam domain frekuensi (*impact vibration*)

Hasil pengujian serta persentasi kenaikan frekuensi alami dari hasil pengujian getaran bebas dengan menggunakan metode *impact vibration* pada mode pertama ditunjukkan dalam Tabel 1.

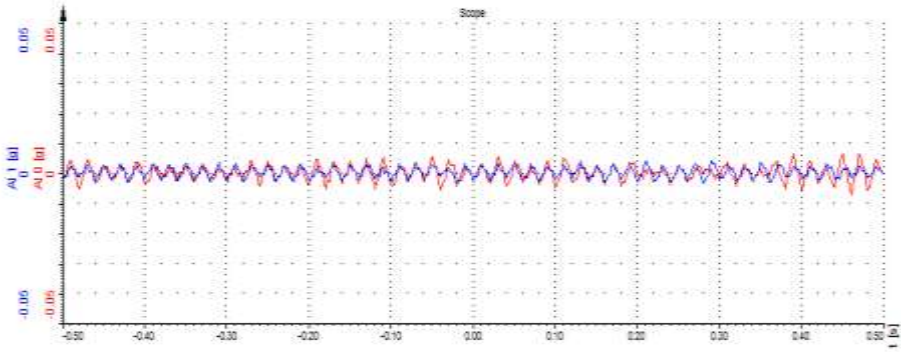
Tabel 1. Hasil pengujian *impact vibration* (Mode 1)

No	Beban (N)	Frekuensi alami (Hz)				Peningkatan frekuensi alami (%)			
		3,5 m	3 m	2 m	1 m	3.5	3	2	1
1	1580	10,99	13,18	17,58	41,99	0	0	0	0
2	3160	14,65	18,55	24,9	53,71	33	41	42	28
3	4740	19,53	22,46	30,03	62,01	78	70	71	48
4	6320	-	25,63	34,18	66,41	-	94	94	58
5	7900	-	28,56	38,57	75,68	-	117	119	80
6	10590	-	33,2	43,95	85,94	-	152	150	105

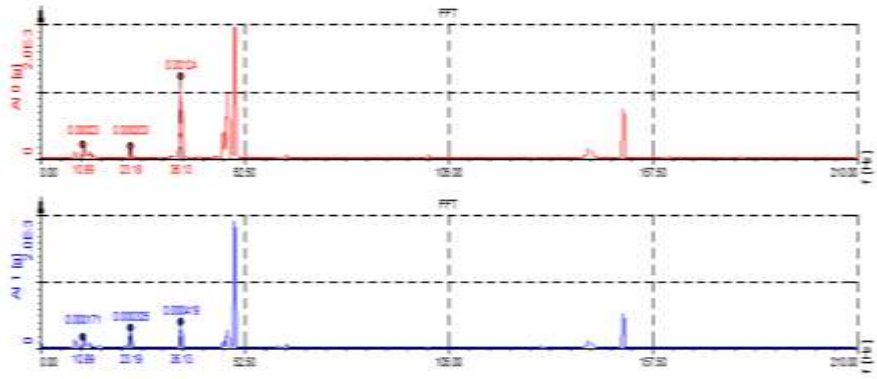
Nilai frekuensi alami yang diperoleh dari pengujian getaran bebas dengan metode *impact vibration* (Tabel 1) dapat diyakini sebagai frekuensi alami pada mode pertama dari masing-masing kabel karena merupakan garis spectrum frekuensi utama pertama yang muncul pada tampilan *software dewesoft*. Pembacaan frekuensi alami dilakukan sampai dengan mode 5. Dalam Tabel 1 diperlihatkan persentase kenaikan frekuensi alami dari ke empat kabel. Bila dibandingkan dengan beban 1580 N maka kenaikan beban 3160 N, 4740 N, 6320 N, 7900 N dan 10590 N akan meningkatkan frekuensi alami masing-masing untuk kabel 3,5 m sebesar 33,3% dan 77,7%, untuk kabel 3 m sebesar 40,744%, 70,410%, 94,461%, 116,692% dan 151,897%, untuk kabel 2 m sebesar 41,638%, 70,819%, 94,425%, 119,397%, dan 150%.

2) Pengujian *ambient vibration*

Selain memberikan *impact* dengan menggunakan pukulan tangan, *wire rope* juga direkam pada kondisi diam (*ambient vibration*) untuk memperoleh frekuensi alami *wire rope* pada kondisi tenang tanpa ada gangguan getaran lainnya. Respon masing-masing *wire rope* terhadap *ambient vibration* yang terekam oleh *software Dewesoft* dalam domain waktu dan domain frekuensi ditampilkan pada gambar 12 dan gambar 13.



Gambar 12 Respon *wire rope* dalam domain waktu (*ambient vibration*)



Gambar 13 Respon *wire rope* dalam domain frekuensi (*ambient vibration*)

Hasil pengujian selengkapnya serta persentasi kenaikan frekuensi alami dari hasil pengujian getaran bebas dengan menggunakan *ambient vibration* dimana frekuensi alami yang diambil adalah frekuensi alami mode pertama saja seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

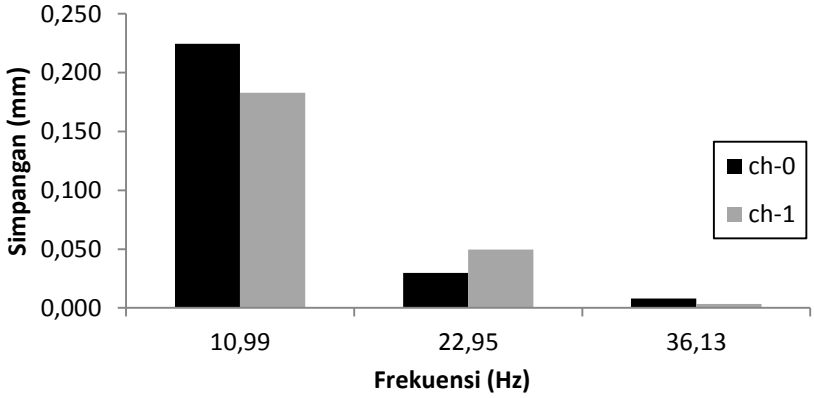
Tabel 2 Hasil pengujian *ambient vibration* (mode 1)

No	Beban (N)	Frekuensi alami (Hz)				Peningkatan frekuensi alami (%)			
		3,5 m	3 m	2 m	1 m	3.5	3	2	1
1	1580	11	13,2	17,5	41,99	0	0	0	0
2	3160	14,7	18,5	25,1	53,71	33,2	40,7	43,2	27,9
3	4740	19,5	22,2	35,1	62,01	77.7	68,6	100	47,7
4	6320	0	25,6	39,1	66,41	0	94,5	122,3	58,2
5	7900	0	28,5	36,8	75,68	0	116,7	109,4	80,2
6	10590	0	33,4	44,2	85,94	0	153,8	151,4	104

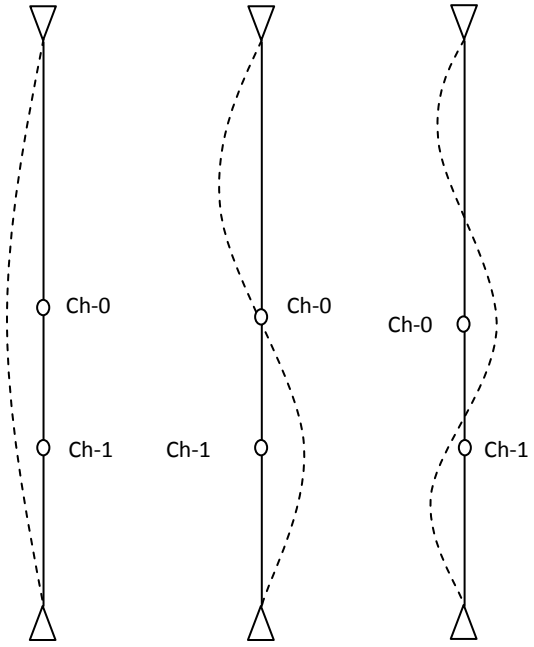
Hasil pengujian *impact vibration* dan *ambient vibration* memberikan hasil yang sama pada pengukuran frekuensi alaminya.

3) Mode shape

Mode shape dapat digambarkan dengan terlebih dahulu merubah amplitudo yang berupa percepatan menjadi simpangan. Karena *accelerometer* hanya terpasang pada ½ dan ¼ bentang *wire rope* maka hanya pada kedua titik tersebut simpangan bisa terbaca. Dari hasil analisis diperoleh bahwa semakin besar frekuensi alami maka simpangan dinamik yang terjadi akan semakin kecil dan pengukuran pada ½ dan ¼ bentang menjadi sama. Seperti tampak pada gambar 14. Hasil keseluruhan pengukuran menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu untuk mode pertama maka simpangan pada ½ bentang lebih besar dari ¼ bentang, untuk mode kedua simpangan pada ½ bentang lebih kecil dari pada ¼ bentang sehingga *mode shape* bisa tergambar seperti tampak pada gambar 15. Begitu juga dengan *mode shape* yang lain.



Gambar 14 Hubungan frekuensi vs simpangan dinamik (*wire rope* 3,5 M beban 1580 N)

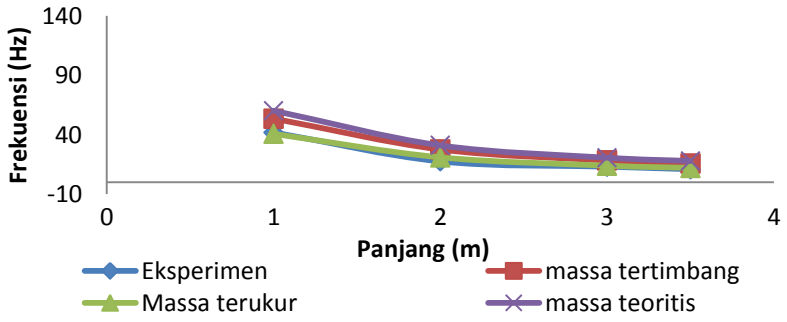


Gambar 15 *Mode shape* (Mode 1,2 dan 3)

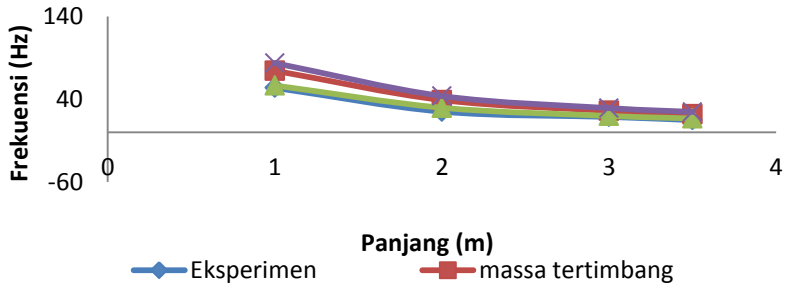
d. Pengaruh Massa Terhadap Frekuensi Alami *Wire Rope*

Massa yang digunakan pada perhitungan dengan menggunakan *taut string theory* adalah massa teoritis, massa tertimbang aktual dari benda uji *wire rope* 6x37+IWRC diameter 6 mm yang digunakan pada saat pengujian di laboratorium dan masa terukur dengan asumsi kabel tegang. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa keseluruhan hasil perhitungan dengan menggunakan massa teoritis yaitu dengan menghitung massa menggunakan perkalian dari luas penampang masing-masing *wire* dikalikan dengan jumlah keseluruhan *wire* dan dikalikan dengan berat jenis baja serta massa tertimbang memberikan hasil *underestimate* dari gaya aksial aktual yang bekerja pada *wire rope* saat pengujian. Namun apabila massa yang digunakan merupakan massa terukur yaitu massa yang diperoleh dari perhitungan luas penampang *wire rope* dikalikan dengan berat jenis baja maka hasil perhitungan akan memberikan hasil yang berbeda. Pada saat *wire rope* menerima beban aksial maka *wire rope* akan semakin melekat satu sama lain dan diasumsikan menjadi satu kesatuan solid dengan diameter terukur yaitu 5,88 mm. Dari hasil perhitungan diperoleh massa *wire rope* sebesar 0,2131 kg/m' dan dengan menggunakan *taut string theory* dilakukan perbandingan hasil prediksi gaya aksial antara massa teoritis, massa tertimbang dan massa terukur.

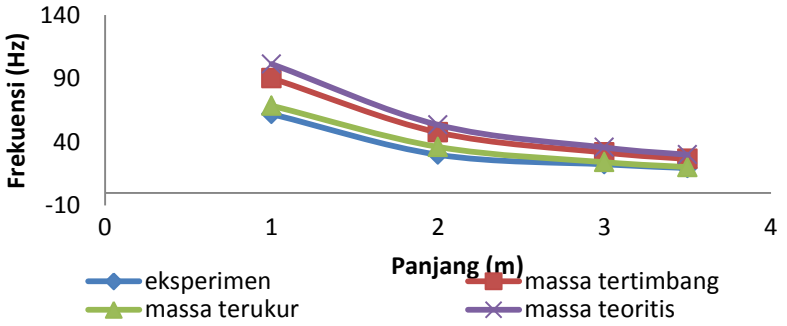
Perbandingan perhitungan menggunakan *taut string theory* dengan massa teoritis, massa tertimbang, massa terukur dengan hasil eksperimental untuk *wire rope* panjang 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m pada mode 1 secara grafis dapat dilihat pada gambar 23.



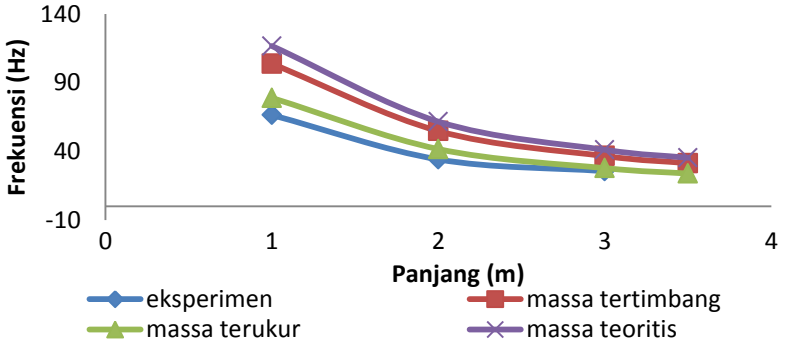
Gambar 16 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 1580 N)



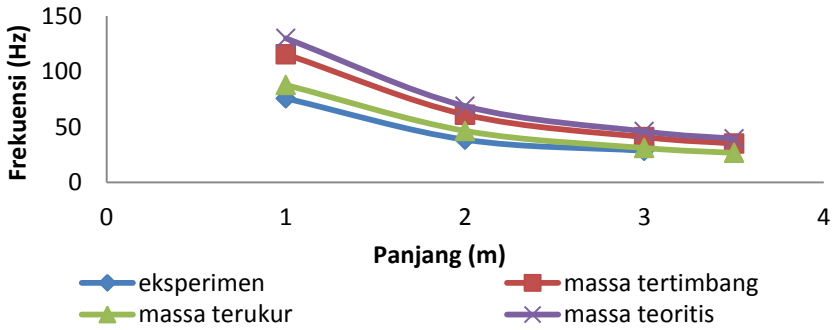
Gambar 17 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 3160 N)



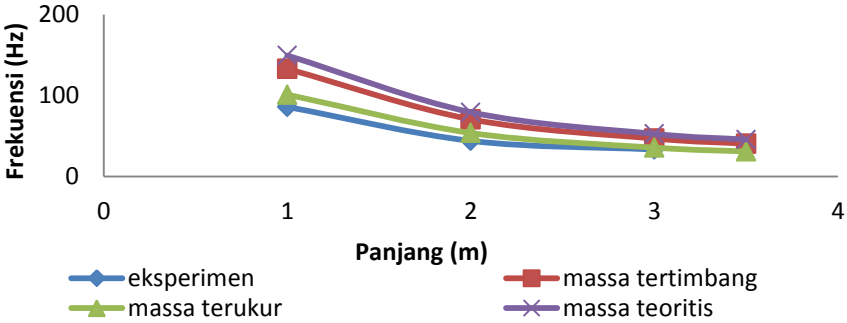
Gambar 18 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 4740 N)



Gambar 19 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 6320 N)



Gambar 20 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 7900 N)

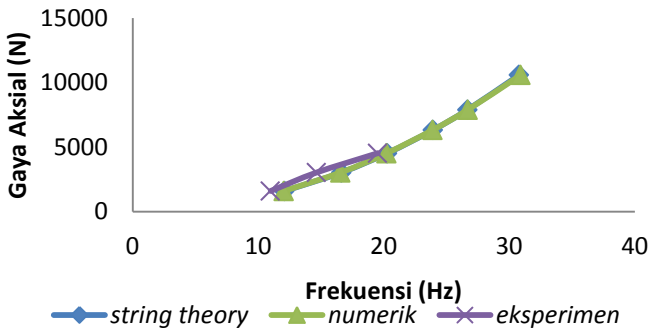


Gambar 21 Perbandingan hasil massa tertimbang dan massa terukur menggunakan *taut string theory* dengan hasil eksperimen (beban 10590 N)

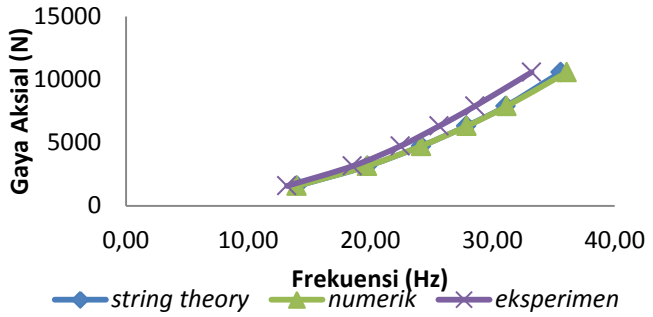
Grafik pada gambar 16 sanpai 21 menunjukkan hasil bahwa massa terukur dengan mengasumsikan *wire rope* bekerja sebagai satu kesatuan yang solid hasilnya jauh lebih tepat dan mendekati hasil pengukuran eksperimental di laboratorium dibandingkan dengan perhitungan menggunakan massa tertimbang dan massa teoritis. Perhitungan dengan menggunakan massa teoritis memberikan hasil yang paling jauh dari kenyataan pada saat eksperimen. Tren yang terjadi pada keseluruhan perhitungan, pada beban kecil hasilnya sangat dekat dengan eksperimental sedangkan pada beban yang semakin membesar hasilnya semakin menjauh karena pengaruh pertambahan panjang dan peningkatan kekakuan aksial tidak terakomodasi dalam perhitungan *taut string theory*. Berdasarkan hal tersebut dapat dinyatakan bahwa perhitungan dengan menggunakan asumsi massa terukur jauh lebih tepat dibandingkan menggunakan massa tertimbang dan massa teoritis.

e. Perhitungan analitik dan numerik

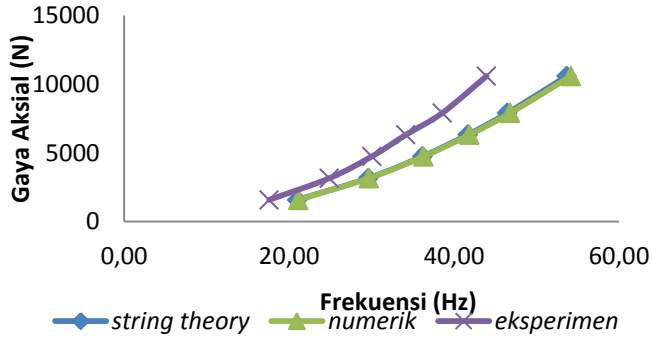
Perhitungan analitik dilakukan dengan menggunakan *taut string theory* untuk menghitung frekuensi alami dan estimasi gaya aksial tarik. Perhitungan numerik menggunakan *software SAP 2000* versi 11. Perbandingan hasil pengukuran eksperimen, analitis dan numerik pada mode 1 tampak pada gambar 22 sampai dengan gambar 25.



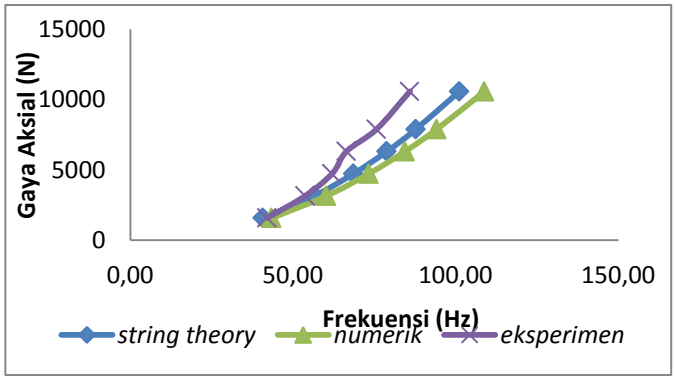
Gambar 22 Hubungan frekuensi alami dan gaya aksial mode 1 (WR 3,5 m)



Gambar 23 Hubungan frekuensi alami dan gaya aksial mode 1 (WR 3 m)



Gambar 24 Hubungan frekuensi alami dan gaya aksial mode 1 (WR 2 m)

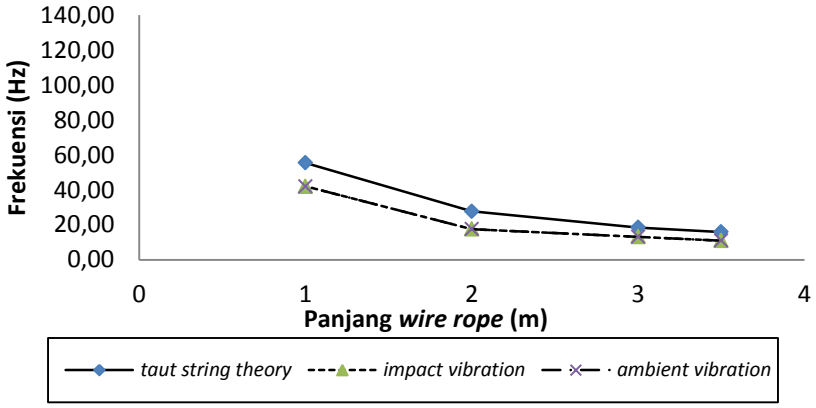


Gambar 25 Hubungan frekuensi alami dan gaya aksial mode 1 (WR 1 m)

Gambar 22 sampai dengan Gambar 25 menunjukkan bahwa seiring meningkatnya frekuensi alami maka meningkat pula gaya aksial tarik yang terjadi pada *wire rope* pada semua variasi panjang *wire rope*. Perhitungan analitik dan numerik pada *wire rope* 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m memberikan hasil yang dekat dengan eksperimen pada frekuensi alami rendah, namun seiring meningkatnya frekuesi alami maka gaya aksial tarik yang terhitung hasilnya semakin jauh dari gaya aksial tarik hasil eksperimen. Hal ini dikarenakan peningkatan kekakuan aksial tidak terakomodasi dalam perhitungan analitik sehingga menyebabkan *underestimate* dalam memprediksi gaya aksial..

a. Perubahan panjang terhadap frekuensi alami *wire rope*

Pada pembebanan tetap dengan *wire rope* yang semakin panjang frekuensi alami akan semakin menurun seperti pada Gambar 21.



Gambar 26 Hubungan panjang *wire rope* dan frekuensi alami pada beban 1580 N

Gambar 26 menunjukkan bahwa semakin panjang *wire rope* maka frekuensi alami akan semakin menurun begitu pula sebaliknya. Semakin panjang *wire rope* hasil pengukuran *impact vibration* dan *ambient vibration* semakin dekat dengan perhitungan analitik dan numerik meskipun keseluruhan hasil *underestimate*.

6. Kesimpulan dan Saran

a. Kesimpulan

1) Kekakuan aksial *wire rope* akan meningkat seiring dengan meningkatnya gaya aksial yang diterima oleh *wire rope*. Peningkatan kekakuan tersebut mempengaruhi hasil pengukuran frekuensi alaminya.
2) Pemilihan massa untuk perhitungan analitik menggunakan *taut string theory* lebih tepat menggunakan massa terukur pada saat kabel tegang dengan asumsi *wire rope* saling melakat menjadi satu kesatuan sebagai suatu benda solid dari pada massa tertimbang dan massa teoriti

3) semakin panjang *wire rope* maka frekuensi alami akan semakin menurun begitu pula sebaliknya. Semakin panjang *wire rope* hasil pengukuran *impact vibration* dan *ambient vibration* semakin dekat dengan perhitungan analitik dan numerik meskipun keseluruhan hasil *underestimate*.

4) Peningkatan frekuensi alami meningkatkan gaya aksial tarik yang terjadi pada *wire rope* pada semua variasi panjang *wire rope*. Perhitungan analitik dan numerik pada *wire rope* 3,5 m, 3 m, 2 m dan 1 m memberikan hasil yang dekat dengan eksperimen pada frekuensi alami rendah, namun seiring meningkatnya frekuesi alami maka gaya aksial tarik yang terhitung hasilnya semakin jauh dari gaya aksial tarik hasil eksperimen. Hal ini dikarenakan peningkatan kekakuan aksial tidak terakomodasi dalam perhitungan analitik sehingga menyebabkan *underestimate* dalam memprediksi gaya aksial..

b. Saran

Saran yang dapat digunakan untuk penelitian yang akan datang adalah sebagai berikut :

1) *Taut string theory* lebih tepat digunakan untuk *single wire* atau batang pejal, sedangkan untuk *wire rope* formula tersebut perlu dikoreksi.
2) Variasi untaian *wire rope* yang berbeda akan memberikan hasil pengukuran yang berbeda.
3) Variasi perbandingan diameter *wire rope* terhadap panjang yang berbeda dapat digunakan untuk mengetahui batas pengaruh kekakuan lentur pada kabel vertikal, apakah kekakuan lentur dapat diabaikan atau tidak.
4) Metode pembebanan yang tepat dapat meminimalkan kesulitan pada saat pengujian dan memberikan hasil pengukuran yang lebih tepat.

DAFTAR PUSTAKA

Bellino A., Garibaldi, L., Fasana, A., and Marchesiello, S., 2010, "*Tension Estimation of Cable With Different Boundary Conditions by Means of The Added Mass Technique"* Dipartimento of Meccanica, Politecnico di Torino

Cho, S., Yim, J, M.ASCE, Shin S.W., Jung, H.J., Yun, C.B, M.ASCE, Wang, M.L, M.ASCE 2013, "*Comparative Field Study of Cable Tension Measurement for a Cable Stayed Bridge*", Journal of Bridge Engineering-ASCE, No. 18, Hal 748-757.

Elata, D., Eshkenazy, R., and Weiss, M.P., 2004, "*The Mechanical Behavior of a Wire Rope With an Independent Wire Rope Core*", International Journal of Solids and Structures 41, Hal Penerbit Erlangga, Jakarta.

Fang, Z. and Wang, J.Q., "*Practical Formula for Cable Tension Estimation by Vibration Method*", Journal of Bridge Engineering, Vol. 17, No. 1, January 1, ASCE, 2012

Gannon Stromquist-LeVoir, 2013, "*Validating and Assessing Integrity of Troubled Bridges in Connecticut: Monitoring Cable Tensions for the Arrigoni Bridge, Middletown, CT*", page 2-5, Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Design Services

Kim, B.H., and Park, T., Shin, H., dan Yoon, T.Y., 2007, "*A Comparative Study of The Tension Estimation Methods for Cable Supported Bridges"*, Steel Structure 7, Hal. 77-84

Paz, M., 1996, "*Dinamika Struktur Teori dan Perhitungan*", Edisi Kedua, Hal.440-442, Erlangga

Priyosulistyo, H., 2012, "*Diktat Kuliah Analisis Dinamik Struktur*"

Standar Nasional Indonesia (SNI) 0076:2008, "*Tali Kawat Baja*", BSN, Jakarta

Zui, H., Shinke T., and Namita, Y., 1996, "*Practical Formula for Estimation of Cable Tension by Vibration Method*", Journal of Structural Engineering, No. 122, Hal. 651-656