

Respon Getaran Lateral dan Torsional Pada Poros *Vertical-Axis Turbine* (VAT) dengan Pemodelan Massa Tergumpal

Ahmad Aminuddin, Yeri Susatio, dan Ridho Hantoro.

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-Mail: hantoro@ep.its.ac.id

Abstrak—Getaran merupakan gerakan bolak balik yang melewati titik kesetimbangan. Telah dilakukan penelitian yang menganalisa adanya getaran lateral dan torsional pada sebuah turbin jenis VAT. Metode yang digunakan untuk menganalisa dinamika sistem empat derajat kebebasan yaitu *State Space*. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan 0,7 m/s; 0,8 m/s; 0,9 m/s; 1,0 m/s. Untuk VAT ujung bebas simpangan paling besar terjadi pada kecepatan 1,0 m/s yaitu 6.36×10^{-4} m pada massa ke-1 dan 7.63×10^{-3} m pada massa ke-2. Sedangkan pada model VAT ujung terikat simpangan maksimumnya yaitu 2.62×10^{-4} m pada massa ke-1 dan 9.44×10^{-5} m pada massa ke-2. Untuk getaran torsional simpangan maksimumnya juga terjadi pada kecepatan 1,0 m/s. Getaran torsional pada VAT dengan ujung bebas nilai maksimumnya yaitu $3,12 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-1 dan $7,59 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-2. Sedangkan pada model VAT ujung terikat simpangan maksimumnya yaitu $1,47 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-1 dan $1,12 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-2. Semakin besar kecepatan aliran air sungai, semakin besar pula gaya eksitasi yang dihasilkan, sehingga amplitudo getarannya juga makin besar. Sistem VAT memiliki frekuensi natural yang cukup tinggi. Untuk sistem VAT dengan ujung bebas frekuensi naturalnya bernilai 89.33 rad/s; 93.36 rad/s; 218.83 rad/s dan 429.10 rad/s. sedangkan untuk sistem VAT dengan ujung terikat nilai frekuensi naturalnya adalah 193.62 rad/s; 257.41 rad/s; 428.3 rad/s dan 773.41 rad/s. Sistem VAT ini bekerja pada frekuensi kerja yang rendah yaitu, 5,30 rad/s; 5,56 rad/s; 6,57 rad/s dan 7,28 rad/s. Sehingga tidak terjadi resonansi pada sistem VAT tersebut. Frekuensi kerja yang paling mendekati frekuensi natural adalah pada kecepatan 1,0 m/s yaitu 7,28 rad/s. Meskipun demikian, nilai tersebut masih jauh dibawah frekuensi naturalnya.

Kata Kunci—*Vertical-Axis Turbine*, getaran lateral, getaran torsional, frekuensi natural, statespace

I. PENDAHULUAN

SALAH satu upaya mengatasi masalah krisis energi adalah dengan mencari sumber-sumber energi alternatif pengganti BBM. Diantaranya yaitu sumber energi arus sungai yang memiliki potensi sangat besar untuk dikembangkan di Indonesia. Sistem yang cukup tepat untuk diterapkan pada pemanfaatan energi arus sungai adalah sistem turbin dengan sumbu tegak atau disebut juga VAT. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan gaya yang dihasilkan oleh arus sungai.

Akan tetapi, gaya tersebut menghasilkan getaran pada poros turbin. Getaran tersebut pada kondisi tertentu dapat mengakibatkan kerugian pada sistem baik berupa keretakan sampai patahnya poros turbin. Untuk itu perlu dilakukan studi

analisa getaran yang terjadi pada poros VAT agar bisa mengetahui kondisi-kondisi yang dapat mengakibatkan kerusakan tersebut.

II. TEORI DASAR

A. *Vertical-Axis Turbine* (VAT)

Turbin jenis *Vertical-Axis Turbine* (VAT) memiliki beberapa kelebihan yaitu mekanisme peralatan yang dapat diletakkan di atas permukaan tanah sehingga memudahkan proses perawatan karena dapat dijangkau dengan mudah. Keuntungan yang lain adalah ukuran *blade* pada turbin jenis VAT dapat ditingkatkan tanpa adanya batasan seperti pada turbin jenis *Horisontal-Axis Turbine* (HAT) [1].

VAT dapat digunakan untuk keperluan pembangkit listrik tenaga arus sungai maupun arus laut. Gaya aliran arus yang menghasilkan putaran pada VAT, putaran tersebut dikonversikan untuk memutar generator sehingga dapat menghasilkan listrik yang bisadimanfaatkan untuk keperluan sehari-hari. Gambar 1 menunjukkan penggunaan VAT pada pembangkit listrik tenaga arus sungai.

B. Getaran

Sebuah sistem massa-pegas-damper dengan satu buah massamerupakan sistem dengan 1 (satu) derajat kebebasan (1 DOF). Ini merupakan konsep sistem getaran sederhana.

Gambar 2 menunjukkan sebuah sistem massa-pegas damper yang dikenai suatu gaya pengganggu F yang berupagangguan yang harmonik. Dari Gambar 2, dapat dicari persamaan matematika yang dapat dituliskan seperti di bawah ini

$$M_1 \ddot{X} + C_p \dot{X} + K_p X = F \quad (1)$$

Keterangan :

M_p : massa benda

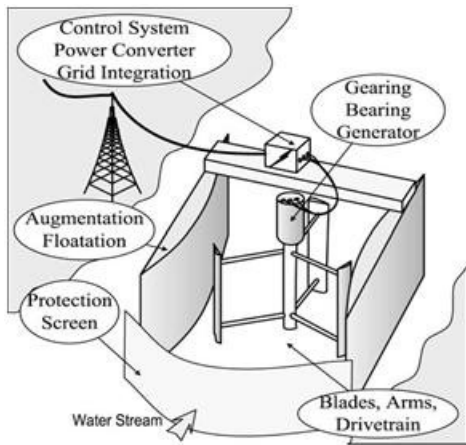
\ddot{X} : percepatan getaran

C_p : koefisien redaman benda

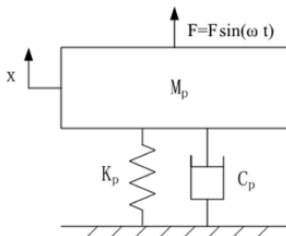
\dot{X} : kecepatan getaran

K_p : koefisien kekakuan benda

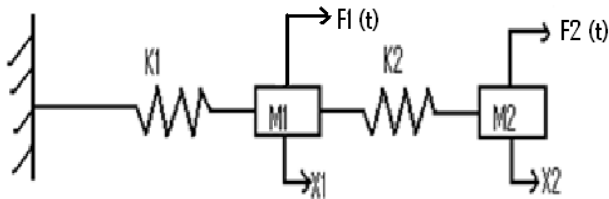
X : simpangan/respon getaran



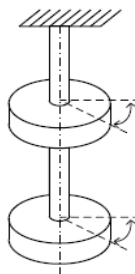
Gambar. 1. Penggunaan VAT untuk pembangkit listrik [2]



Gambar. 2. Gambar sistem getaran satu DOF



Gambar. 3. Getaran lateral sistem VAT



Gambar. 4 Getaran torsional sistem VAT

Persamaan diferensial ini dapat diselesaikan dengan berbagai cara, antara lain dengan metode *state-space*, *inverse laplace*, dan *operator D*.

Sedangkan sistem VAT untuk getaran lateral dapat dimodelkan sebagai sistem dengan 2 *degree of freedom*.

$$M_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_1(t) \tag{2}$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = F_2(t) \tag{3}$$

Sama halnya dengan getaran lateral yang dapat dimodelkan dengan sistem 2 DOF, pada getaran torsional juga dapat dimodelkan dengan 2 DOF juga. Gambar 4 menunjukkan

diagram bebas dari sistem VAT dengan memperhatikan aspek getaran torsionalnya (lihat Gambar 3 juga).

Persamaan matematis untuk model di atas adalah sebagai berikut:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + c_{t1} \dot{\theta}_1 + c_{t2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k_{t1} \theta_1 + k_{t2} (\theta_2 - \theta_1) = M_1(t) \tag{4}$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + c_{t2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k_{t2} (\theta_2 - \theta_1) = M_2(t) \tag{5}$$

dimana J adalah Momen inersia, $\ddot{\theta}$ percepatan sudut, $\dot{\theta}$ kecepatan sudut, θ simpangan sudut, C koefisien redaman puntir, k koefisien kekakuan puntir, M momen inersia [3].

C. StateSpace

State Space merupakan sebuah metode untuk menyelesaikan persamaan diferensial orde tinggi. Metode ini biasa digunakan bidang elektro maupun mekanik termasuk vibrasi. Metode ini digunakan untuk mengatasi permasalahan dari persamaan diferensial yang tidak bisa diselesaikan dengan dengan metode eksak seperti dengan menggunakan *Transformasi Laplace* [4]. Untuk membantu penyelesaian, biasanya digunakan software untuk membantu dalam perhitungan yang rumit. Software yang biasa digunakan seperti *MathCad* dan juga *MatLab*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Studi Literatur

Mencari dan mempelajari berbagai literature seperti buku, jurnal, internet dan para pakar untuk bisa mendapatkan informasi maupun data-data yang diinginkan berkaitan dengan getaran dan sistem VAT.

B. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu kecepatan arus sungai yang bervariasi mulai dari 0,7 m/s menghasilkan kecepatan 50,6 rpm, 0,8 m/s menghasilkan kecepatan 53,1 rpm, 0,9 m/s menghasilkan kecepatan 62,8 rpm dan 1,0 m/s menghasilkan kecepatan 60,6 rpm. Turbin vertikal aksis ini dapat dianalogikan sebagai sistem pegas 4 *degree of freedom* (DOF) sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5.

C. Pemodelan sistem VAT dengan massa terdamp

Dari plan VAT pada gambar 5 dapat dimodelkan secara fisis dengan pemodelan massa terdamp. sistem tersebut dibagi menjadi dua elemen massa yang identik, yaitu M_1 dan M_2 . masing-masing elemen ini akan mengalami getaran berupa getaran lateral dan torsional (lihat Gambar 6).

model matematis untuk ujung bebas:

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} X_1(t) + C_1 \left(\frac{d}{dt} X_1(t) \right) + C_2 \left(\frac{d}{dt} X_1(t) - \frac{d}{dt} X_2(t) \right) + K_1 \cdot X_1(t) + K_2 \cdot (X_1(t) - X_2(t)) = F_1(t)$$

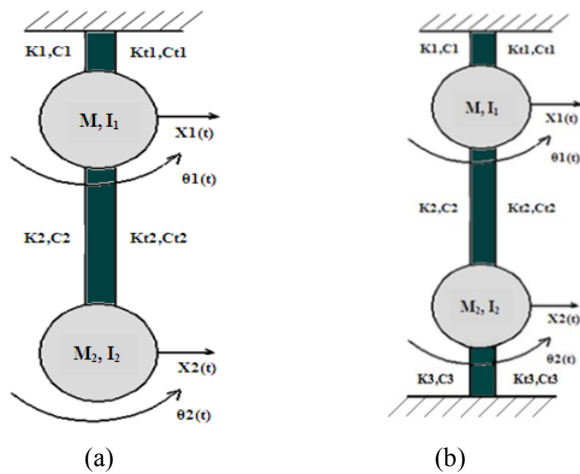
$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} X_2(t) + C_2 \left(\frac{d}{dt} X_2(t) - \frac{d}{dt} X_1(t) \right) + K_2 \cdot (X_2(t) - X_1(t)) = F_2(t)$$

$$I_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta_1(t) + C_{t1} \left(\frac{d}{dt} \theta_1(t) \right) + C_{t2} \left(\frac{d}{dt} \theta_1(t) - \frac{d}{dt} \theta_2(t) \right) + K_{t1} \cdot \theta_1(t) + K_{t2} \cdot (\theta_1(t) - \theta_2(t)) = L_1(t)$$

$$I_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta_2(t) + C_{t2} \left(\frac{d}{dt} \theta_2(t) - \frac{d}{dt} \theta_1(t) \right) + K_{t2} \cdot (\theta_2(t) - \theta_1(t)) = L_2(t)$$



Gambar. 5. Turbin vertikal aksis [5]



Gambar. 6. diagram bebas sistem VAT (a) ujung bebas (b) ujung terikat

model matematis untuk ujung terikat :

$$\begin{aligned}
 M1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} X1(t) + C1 \cdot \left(\frac{d}{dt} X1(t) \right) + C2 \cdot \left(\frac{d}{dt} X1(t) - \frac{d}{dt} X2(t) \right) + K1 \cdot X1(t) + K2 \cdot (X1(t) - X2(t)) &= F1(t) \\
 M2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} X2(t) + C2 \cdot \left(\frac{d}{dt} X2(t) - \frac{d}{dt} X1(t) \right) + C3 \cdot \left(\frac{d}{dt} X2(t) \right) + K2 \cdot (X2(t) - X1(t)) + K3 \cdot X2(t) &= F2(t) \\
 I1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta1(t) + Ct1 \cdot \left(\frac{d}{dt} \theta1(t) \right) + Ct2 \cdot \left(\frac{d}{dt} \theta1(t) - \frac{d}{dt} \theta2(t) \right) + Kt1 \cdot \theta1(t) + Kt2 \cdot (\theta1(t) - \theta2(t)) &= L1(t) \\
 I2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta2(t) + Ct2 \cdot \left(\frac{d}{dt} \theta2(t) - \frac{d}{dt} \theta1(t) \right) + Ct3 \cdot \left(\frac{d}{dt} \theta2(t) \right) + Kt2 \cdot (\theta2(t) - \theta1(t)) + Kt3 \cdot \theta2(t) &= L2(t)
 \end{aligned}$$

D. Parameter Sistem

Parameter sistem ini didapatkan melalui hasil pengukuran dan perhitungan dari sistem VAT. Parameter-parameter yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi Massa, momen inersia, tetapan kekakuan, tetapan kekakuan torsional, tetapan redaman, dan tetapan redaman torsional.

M ₁	= 6.98 kg	C ₂	= 109,5 N.m/s
M ₂	= 6.98 kg	C ₃	= 408,2 N.m/s
I ₁	= 0.22 kg.m ²	K _{t1}	= 8300N.m/rad

I ₂	= 0.22 kg.m ²	K _{t2}	= 3112N.m/rad
K ₁	= 1444400 N/m	K _{t3}	= 12450N.m/rad
K ₂	= 76169 N/m	C _{t1}	= 0,52 N.s.m/rad
K ₃	= 4874850 N/m	C _{t2}	= 0,27 N.s.m/rad
C ₁	= 384,4 N.m/s	C _{t3}	= 0,61 N.s.m/rad

E. Parameter Pengganggu

Parameter gaya pengganggu yang digunakan pada penelitian ini berasal dari aliran arus sungai yang menyebabkan turbin dapat berputar dan terjadi getaran. parameter tersebut berupa gaya pada sumbu x (F_x), gaya pada sumbu y (F_y), gaya torsional (L).

Deret Fourier digunakan untuk mendapatkan fungsi kontinu dari parameter gaya pengganggu tersebut (lihat Tabel 1-4).

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}) \tag{6}$$

F. Frekuensi Natural dan Repon Getaran

Fekuenasi natural merupakan frekuensi yang terjadi apabila system tidak dikenai gaya luar atau F(t) = 0 , L(t) = 0. Selain itu system juga tidak teredam atau C = 0. secara sederhana persamaan tersebut bisa dinyatakan sebagai bentuk matriks :

$$[M] \{ \ddot{X} \} + [K] \{ X \} = 0 \tag{7}$$

Dimana [M] disebut matriks inersia dan [K] disebut matrik kekakuan. Penyederhanaan persamaan matriks dapat juga dinyatakan sebagai :

$$\{ \ddot{X} \} + [M]^{-1} [K] \{ X \} = 0 \tag{8}$$

$$\{ \ddot{X} \} + [C] \{ X \} = 0 \tag{9}$$

Dimana [C] disebut matriks dinamis. Dari matriks tersebut dapat ditentukan persamaan karakteristik dari system VAT baik dengan ujung bebas maupun ujung terikat.

Sedangkan untuk mendapatkan respon getaran, baik lateral maupun torsional, maka persamaan gerak dari sistem VAT diselesaikan dengan metode State Space. Software MathCad ddigunakan untuk membantu melakukan perhitungan-perhitungan yang rumit.

IV. ANALISA DATA

Pada bab ini membahas mengenai frekuensi natural dan respon getaran dari simulasisistem turbin vertikal arus sungai. Simulasi didasarkan pada pemodelan dinamika sistem.

A. Hasil Simulasi

Dari hasil pengolahan data dari sistem turbin dan gaya (F) kemudian disimulasikan pada beberapa variasi kecepatan arus sungai dan juga mdel VAT dengan ujung bebas dan VAT dengan model ujung terikat didapatkan frekuensi natural dan respon sistem. Sistem VAT memiliki frekuensi natural yang cukup tinggi. Untuk sistem VAT dengan ujung bebas frekuensi naturalnya bernilai 89.33 rad/s ; 93.36 rad/s; 218.83rad/s dan 429.10rad/s. sedangkan untuk sistem VAT dengan ujung terikat nilai frekuensi naturalnya adalah 193.62rad/s; 257.41rad/s; 428.3rad/s dan 773.41rad/s.

Sementara itu sistem VAT tersebut bekerja pada frekuensi yang rendah yaitu, 5,30 rad/s; 5,56 rad/s; 6,57 rad/s dan 7,28 rad/s. Jadi dapat diketahui bahwa frekuensi kerja tersebut berada jauh di bawah frekuensi naturalnya.

Tabel 1.
Gayalateral dan torsional pada kecepatan 0,7 m/s

Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)	Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)
0	-171.47	74.48	-6.37	180	-252.87	46.75	-10.41
10	-919.05	104.77	6.25	190	-236.86	25.81	-10.27
20	-462.37	181.11	-5.81	200	-214.42	13.46	-10.11
30	-398.04	189.93	-8.55	210	-192.93	11.57	-9.80
40	-372.20	189.30	-10.19	220	-176.88	18.00	-9.32
50	-359.41	182.28	-11.45	230	-169.23	28.27	-8.76
60	-351.05	171.49	-12.49	240	-170.38	36.50	-8.23
70	-342.76	157.62	-13.35	250	-177.09	38.40	-7.82
80	-322.79	139.31	-13.96	260	-184.22	32.84	-7.51
90	-300.04	125.43	-14.23	270	-186.83	23.07	-7.28
100	-280.26	117.47	-14.25	280	-182.86	14.59	-7.05
110	-264.49	114.52	-14.02	290	-173.67	11.65	-6.81
120	-253.31	115.49	-13.54	300	-162.79	15.35	-6.57
130	-247.64	117.78	-12.93	310	-153.74	24.83	-6.29
140	-249.57	116.47	-12.23	320	-149.32	37.62	-6.06
150	-255.57	109.06	-11.57	330	-150.48	50.39	-5.93
160	-261.27	93.76	-11.03	340	-155.99	60.74	-5.96
170	-261.02	71.34	-10.63	350	-163.64	68.30	-6.13

Tabel 2.
Gaya lateral dan torsional pada kecepatan 0,8 m/s

Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)	Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)
0	-216.55	86.44	-6.34	180	-304.45	54.90	-11.30
10	-1064.96	119.68	9.09	190	-284.50	29.49	-11.23
20	-535.60	210.94	-4.93	200	-257.02	15.56	-11.09
30	-463.98	222.58	-8.12	210	-231.41	14.81	-10.75
40	-436.47	223.52	-10.07	220	-213.13	24.35	-10.16
50	-424.30	216.28	-11.58	230	-205.59	38.16	-9.45
60	-416.53	203.34	-12.88	240	-208.93	48.73	-8.79
70	-408.02	185.58	-13.97	250	-218.89	51.02	-8.26
80	-384.42	161.99	-14.80	260	-229.20	43.61	-7.88
90	-356.51	144.04	-15.21	270	-233.72	30.50	-7.56
100	-331.53	134.50	-15.30	280	-229.67	18.77	-7.23
110	-311.51	132.54	-15.07	290	-218.89	13.94	-6.91
120	-298.03	136.20	-14.56	300	-205.79	17.50	-6.58
130	-292.23	141.54	-13.88	310	-194.85	28.52	-6.21
140	-296.50	141.77	-13.12	320	-189.57	43.76	-5.90
150	-305.89	133.38	-12.41	330	-191.16	58.95	-5.73
160	-314.33	114.15	-11.85	340	-198.00	70.93	-5.79
170	-314.59	85.70	-11.48	350	-207.28	79.49	-6.03

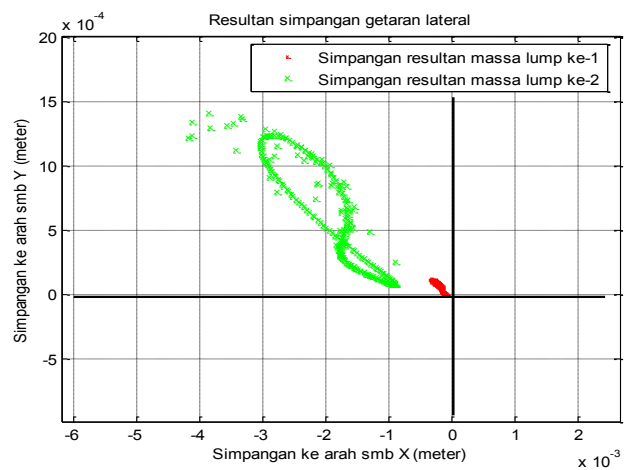
Tabel 3.
Gayalateral dan torsional pada kecepatan 0,9 m/s

Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)	Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)
0	-265.75	114.84	-8.33	180	-389.59	73.76	-14.66
10	-1295.70	153.53	11.82	190	-363.22	40.37	-14.51
20	-636.84	274.08	-5.91	200	-327.39	21.81	-14.28
30	-555.81	291.57	-9.92	210	-293.73	20.18	-13.81
40	-528.36	295.72	-12.37	220	-269.33	31.80	-13.06
50	-518.39	288.19	-14.35	230	-258.64	49.01	-12.18
60	-513.16	272.41	-16.06	240	-261.72	62.28	-11.35
70	-506.28	249.67	-17.53	250	-273.11	64.84	-10.71
80	-481.22	219.28	-18.64	260	-284.64	55.10	-10.26
90	-449.34	194.95	-19.23	270	-288.45	38.60	-9.92
100	-419.69	181.35	-19.38	280	-281.57	24.56	-9.58
110	-395.21	177.80	-19.12	290	-266.61	19.95	-9.22
120	-378.74	181.82	-18.52	300	-249.48	26.17	-8.83
130	-372.21	188.12	-17.73	310	-235.72	41.54	-8.38
140	-378.28	188.17	-16.83	320	-229.64	61.89	-7.97
150	-391.03	176.97	-16.02	330	-232.41	81.64	-7.70
160	-402.31	151.52	-15.37	340	-241.74	96.73	-7.70
170	-402.86	114.13	-14.91	350	-253.90	106.90	-7.95

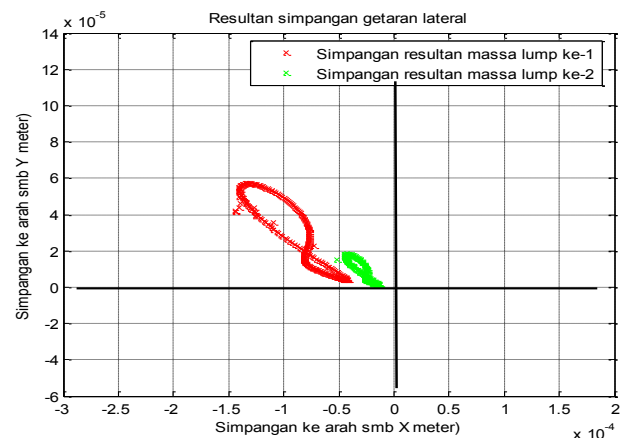
Tabel 4.

Gaya lateral dan torsional pada kecepatan 1,0 m/s

Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)	Azimut	F _x (N)	F _y (N)	L (N.m)
0	-319.78	139.93	-9.53	180	-471.63	90.47	-17.27
10	-1510.28	183.54	15.07	190	-438.83	49.38	-17.09
20	-732.34	331.05	-6.04	200	-394.91	26.84	-16.81
30	-643.08	354.07	-10.75	210	-353.65	25.24	-16.23
40	-615.54	361.60	-13.70	220	-323.98	39.89	-15.33
50	-608.38	354.34	-16.09	230	-311.23	61.24	-14.25
60	-606.28	336.08	-18.19	240	-315.23	77.53	-13.25
70	-601.29	308.16	-20.03	250	-329.15	80.47	-12.47
80	-574.49	270.35	-21.44	260	-342.95	68.23	-11.94
90	-538.15	239.14	-22.21	270	-347.13	47.83	-11.53
100	-502.94	221.44	-22.43	280	-338.13	30.74	-11.14
110	-473.30	217.07	-22.16	290	-319.46	25.47	-10.73
120	-453.55	222.74	-21.49	300	-298.51	33.53	-10.27
130	-446.49	231.50	-20.60	310	-282.00	52.68	-9.72
140	-455.21	232.52	-19.61	320	-275.12	77.81	-9.19
150	-472.19	219.01	-18.73	330	-278.97	101.80	-8.83
160	-486.97	187.29	-18.03	340	-290.67	119.64	-8.80
170	-488.07	140.63	-17.54	350	-305.54	131.16	-9.08

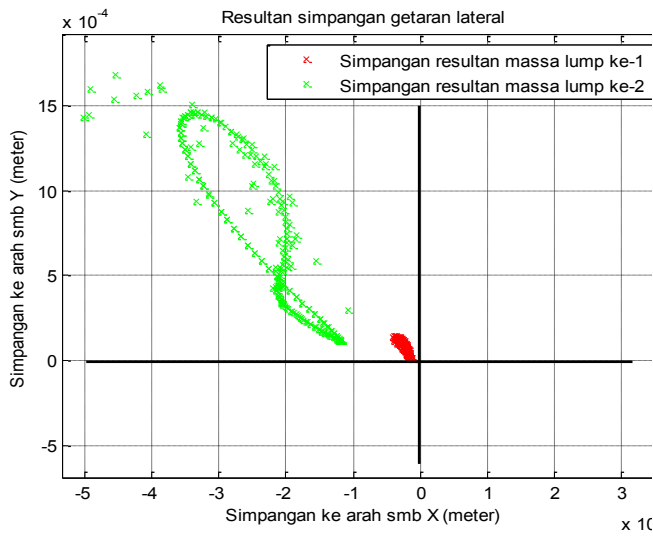


Gambar. 7. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung bebas pada kecepatan 0,7 m/s

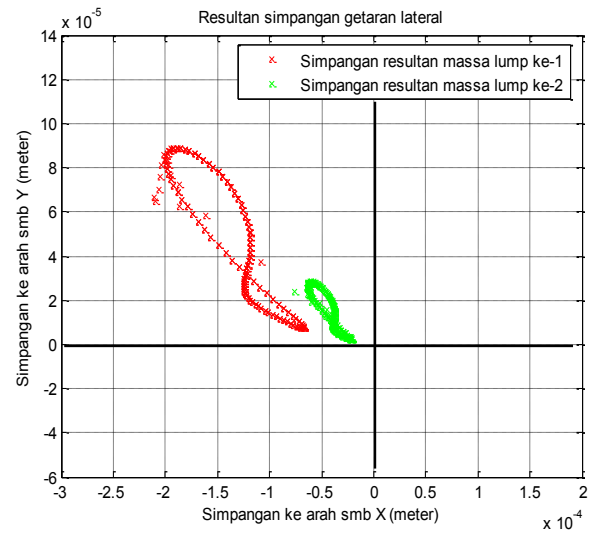


Gambar. 8. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung terikat pada kecepatan 0,7 m/s

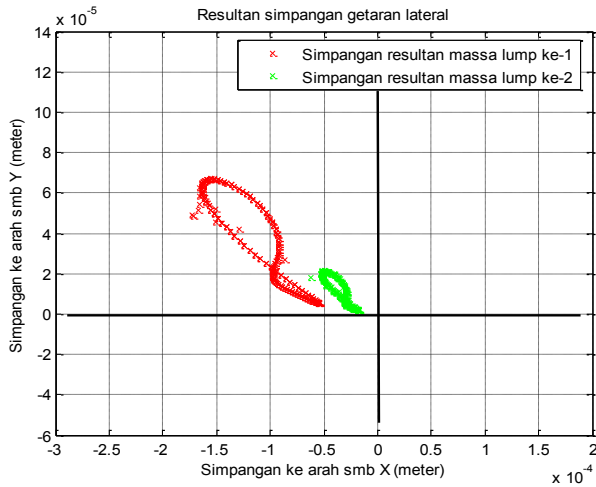
Hal ini menunjukkan sistem VAT berada pada keadaan yang aman karena tidak terjadi resonansi. Resonansi akan terjadi jika frekuensi kerja bernilai sama atau mendekati nilai dari frekuensi natural. Dari hasil tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan arus sungai, semakin besar pula nilai frekuensi kerja dari sistem VAT. Sehingga kemungkinan terjadi resonansi juga akan makin tinggi. Respon getaran lateral pada sistem VAT diberikan dalam Gambar 7-14.



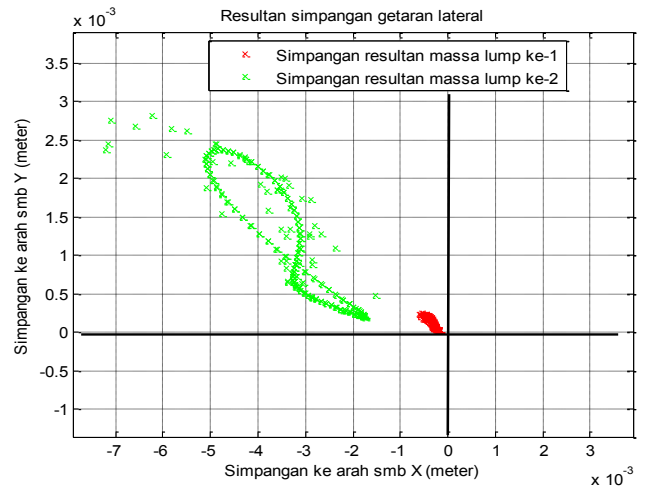
Gambar. 9. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung bebas pada kecepatan 0,8 m/s



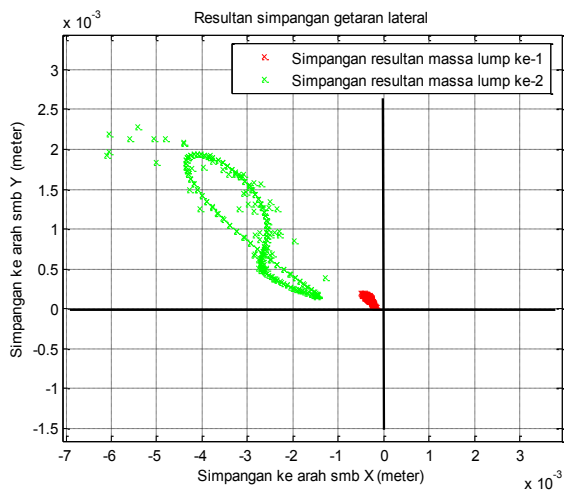
Gambar. 12. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung terikat pada kecepatan 0,9m/s



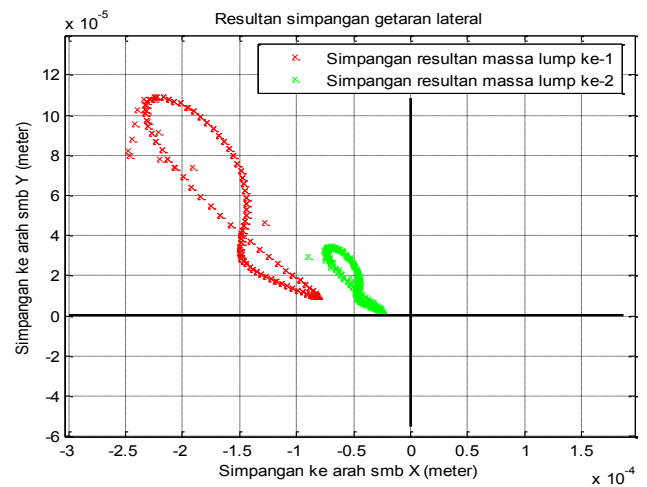
Gambar. 10. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung terikat pada kecepatan 0,8m/s



Gambar. 13. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung bebas pada kecepatan 1,0m/s



Gambar. 11. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung bebas pada kecepatan 0,9m/s



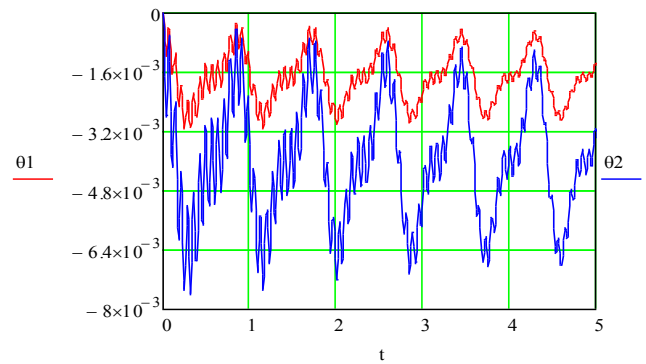
Gambar. 14. Grafik respon getaran lateral VAT dengan ujung terikat pada kecepatan 1,0m/s

Dari gambar 7-14 terlihat bahwa garis merah merupakan respon getaran lateral pada elemen massa tergumpal pertama $X1(t)$, sedangkan garis hijau merupakan respon getaran lateral pada elemen massa tergumpal kedua $X2(t)$. Pada model VAT dengan ujung bebas didapatkan harga simpangan getaran lateral maksimalnya yaitu sebesar 6.36×10^{-4} m untuk elemen massa pertama dan 7.63×10^{-3} m untuk elemen massa kedua. Sedangkan pada model VAT dengan ujung terikat didapatkan simpangan maksimalnya yaitu 2.62×10^{-4} m untuk elemen massa pertama dan 9.44×10^{-5} m untuk elemen massa kedua. Simpangan maksimum tersebut terjadi pada saat kecepatan aliran air 1,0 m/s. Sedangkan untuk getaran torsional sistem VAT pada kecepatan 1,0 m/s dapat dilihat pada Gambar 15-16. Sedangkan untuk kecepatan 0,7 m/s; 0,8 m/s; 0,9 m/s nilai simpangan maksimumnya ada dalam Tabel 5 dan 6.

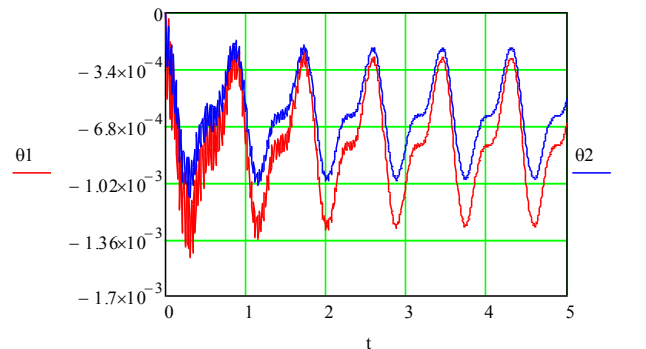
Dari Gambar 15-16 terlihat bahwa garis merah merupakan respon getaran torsional pada elemen massa tergumpal pertama $\theta1(t)$, sedangkan garis biru merupakan respon getaran torsional pada elemen massa tergumpal kedua $\theta2(t)$. Pada model VAT dengan ujung bebas didapatkan harga simpangan getaran lateral maksimalnya yaitu sebesar $3,12 \times 10^{-3}$ rad untuk elemen massa pertama dan $7,59 \times 10^{-3}$ rad untuk elemen massa kedua. Sedangkan pada model VAT dengan ujung terikat didapatkan simpangan maksimalnya yaitu $1,47 \times 10^{-3}$ rad untuk elemen massa pertama dan $1,12 \times 10^{-3}$ rad untuk elemen massa kedua.

V. KESIMPULAN

- Kesimpulan yang bisa diambil dari tugas akhir ini adalah:
1. Sistem VAT memiliki frekuensi natural yang cukup tinggi. Untuk sistem VAT dengan ujung bebas frekuensi naturalnya bernilai 89.33 rad/s ; 93.36 rad/s; 218.83 rad/s dan 429.10 rad/s. sedangkan untuk sistem VAT dengan ujung terikat nilai frekuensi naturalnya adalah 193.62 rad/s; 257.41 rad/s; 428.3 rad/s dan 773.41 rad/s.
 2. frekuensi kerja yang rendah yaitu, 5,30 rad/s; 5,56 rad/s; 6,57 rad/s dan 7,28 rad/s. Sehingga tidak terjadi resonansi pada sistem VAT tersebut. Peluang terjadi resonansi paling tinggi yaitu pada kecepatan 1,0 m/s, yaitu ketika frekuensi kerjanya 7,28 rad/s. meskipun frekuensi kerja tersebut masih jauh dibawah frekuensi naturalnya.
 3. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan 0,7 m/s; 0,8 m/s; 0,9 m/s; 1,0 m/s. Untuk VAT ujung bebas simpangan paling besar terjadi pada kecepatan 1,0 m/s yaitu 6.36×10^{-4} m pada massa ke-1 dan 7.63×10^{-3} m pada massa ke-2. Sedangkan pada model VAT ujung terikat simpangan maksimumnya yaitu 2.62×10^{-4} m pada massa ke-1 dan 9.44×10^{-5} m pada massa ke-2.
 4. Untuk getaran torsional simpangan maksimumnya juga terjadi pada kecepatan 1,0 m/s. simpangan torsional pada VAT dengan ujung bebas nilai maksimumnya yaitu $3,12 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-1 dan $7,59 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-2. Sedangkan pada model VAT ujung terikat simpangan maksimumnya yaitu $1,47 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-1 dan $1,12 \times 10^{-3}$ rad pada massa ke-2.



Gambar. 15. Grafik respon getaran torsional VAT dengan ujung bebas pada kecepatan 1,0 m/s



Gambar 16. Grafik respon getaran torsional VAT dengan ujung terikat pada kecepatan 1,0 m/s

Tabel 5. Amplitudo simpangan sistem VAT ujung bebas

kecepatan (m/s)	lateral		torsional	
	X1 (m)	X2 (m)	$\theta1$ (rad)	$\theta2$ (rad)
0,7	3.61×10^{-4}	4.35×10^{-3}	2.12×10^{-3}	5.05×10^{-3}
0,8	4.29×10^{-4}	5.20×10^{-3}	$2,20 \times 10^{-3}$	$5,13 \times 10^{-3}$
0,9	5.35×10^{-4}	6.42×10^{-3}	$2,74 \times 10^{-3}$	$6,89 \times 10^{-3}$
1,0	6.36×10^{-4}	7.63×10^{-3}	$3,12 \times 10^{-3}$	$7,59 \times 10^{-3}$

Tabel 6. Amplitudo simpangan sistem VAT ujung terikat

kecepatan (m/s)	lateral		torsional	
	X1 (m)	X2 (m)	$\theta1$ (rad)	$\theta2$ (rad)
0,7	1.51×10^{-4}	5.44×10^{-5}	$9,53 \times 10^{-4}$	7×10^{-4}
0,8	1.80×10^{-4}	6.47×10^{-5}	$1,02 \times 10^{-3}$	$7,32 \times 10^{-4}$
0,9	2.21×10^{-4}	7.95×10^{-5}	$1,31 \times 10^{-3}$	$9,76 \times 10^{-4}$
1,0	2.62×10^{-4}	9.44×10^{-5}	$1,47 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-3}$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Khoir, "Studi dan Simulasi Getaran pada Turbin Vertikal Aksis Arus Sungai". Jurnal Teknik Pomits Vol. 1, No. 1, (2012) 1-6.
- [2] Khan MJ, Iqbal MT, Quaicoo JE. *River current energy conversion systems: progress prospects and challenges*. Renew Sustain Energy Rev2008;12(8):2013-264.
- [3] A. W. Husodo, I. K. A. P. Utama, I. M. Ariana. Nopember, "Respon Getaran Torsional Poros Model Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal Akibat Eksitasi Momen Puntir", Makara, Teknologi, Vol. 14, No. 2, Nopember 2010:133-137.
- [4] Y. Susatio. 2004. "Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga". Yogyakarta: Andi
- [5] Mulkan, Ibn., "Analisa Performansi Turbin Arus Sungai Vertikal Aksis Terhadap Penambahan Variasi Panjang Dan Rasio Luasan Pada Diffuser". Jurnal Teknik Pomits Vol. 1, No. 1, (2012) 1-6.