

Optimization of Power Energy Harvesters Based on Genetic Algorithm Using Transverse Galloping

Ismoyo Haryanto^{1,*}, Achmad Widodo¹, Djoeli Satrijo¹ dan Toni Prahasto¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro - Semarang

*Korespondensi: ismoyo_h@undip.ac.id

Abstract. Researches on aeroelastic energy-based energy harvesters, including galloping-based energy harvesters, have been increasing significantly. Galloping is one of the phenomena of classical aeroelastic instability that can be characterized as low oscillation frequency and large amplitude. Due to a large oscillation amplitude, galloping can be an admissible scenario to actuate the piezoelectric-based energy harvester. In the case of harvesting energy from galloping vibrations, a prismatic bluff body is attached on the free end of a piezoelectric cantilever beam and the oscillation occurs in a plane normal to the incoming flow. The electrical power then can be extracted from the piezoelectric sheet bonded in the cantilever structure due to the dynamic strain. This study is proposed to develop a theoretical model to simulate a galloping-based piezoelectric energy harvester. A free modal analysis of the structure is carried out utilizing FEM procedure to determine natural frequencies and vibration modes of the structure. Whereas the aerodynamic lift and drag coefficients of the tip bluff body are determined using CDF. The dynamic response of the system can be determined by directly solving differential equation of motion. In present study, the optimization method based on Genetic Algorithm (GA) was applied to obtain the maximum output voltage with optimization variables of dimension of piezoelectric sheet and electric load resistance. The results showed that optimum voltage obtained by GA better than that obtained by gradient-based method.

Abstrak. Penelitian mengenai pemanen energi (*energy harvesting*) berbasis aeroelastik, termasuk pemanen energi berbasis galloping, akhir-akhir ini menunjukkan peningkatan yang pesat. Galloping adalah salah satu fenomena ketidakstabilan aeroelastik klasik yang dapat dicirikan sebagai frekuensi osilasi rendah dan amplitudo besar. Karena amplitudo osilasi yang besar, galloping dapat menjadi skenario yang dapat diterima untuk menggerakkan pemanen energi berbasis piezoelektrik. Untuk kasus pemanenan energi dari getaran galloping, sebuah bodi aerodinamis diletakkan pada ujung bebas batang kantilever dan osilasi terjadi di bidang normal terhadap arah aliran angin. Daya listrik kemudian dapat diekstraksi dari lembaran piezoelektrik yang ditempelkan pada struktur kantilever akibat adanya regangan dinamis. Dalam penelitian ini, sebuah model teoritis dikembangkan untuk memprediksi karakteristik dinamika sistem pemanen energi dengan bodi aerodinamis berpenampang segitiga. Prosedur FEM digunakan untuk menentukan frekuensi natural dan bentuk modus struktur. Selain itu, gaya galloping yang diinduksi dimodelkan dengan menggunakan aproksimasi kuasi-stedi. Untuk tujuan ini, koefisien-koefisien gaya angkat dan gaya hambat bodi aerodinamis untuk bilangan Reynolds tertentu dan berbagai sudut serang ditentukan menggunakan prosedur dinamik fluida komputasional (CFD). Respon dinamis dari pemanen kemudian dapat diperoleh secara langsung dengan memecahkan persamaan diferensial yang mewakili gerakan transversal pemanen energi. Prosedur optimasi numerik berdasarkan Algoritma Genetika kemudian diterapkan untuk mendapatkan voltase keluaran dari pemanen energi yang maksimum dimana ukuran piezoelektrik dan tahanan beban sebagai variabel optimasi. Hasil menunjukkan bahwa optimasi dengan GA memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan optimasi menggunakan *gradient-based method*.

Kata kunci: pemanen energi, piezoelektrik, galloping, aeroelastik, algoritma genetika

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Teknologi nir-kabel (*wireless*) dalam sistem penginderaan telah banyak digunakan guna pemantauan kondisi struktur tertentu. Dalam pemakaiannya, sensor ini membutuhkan sumber energi listrik yang berasal dari baterai. Akan tetapi dalam batas waktu tertentu baterai tersebut memerlukan penggantian. Hal inilah yang merupakan salah satu

tantangan utama dalam sistem perangkat mandiri (*self-power devices*) seperti jaringan sensor nir-kabel [1]. Disisi lain, getaran struktural merupakan salah satu domain mekanis yang paling banyak ditemukan dan memungkinkan untuk diubah menjadi listrik dengan memanfaatkan beberapa pemanen energi (*energy harvester*). Salah satu sistem pemanen energi yang telah dikembangkan oleh

banyak peneliti adalah pemanen energi getaran berbasis piezoelektrik. Hal ini dikarenakan sistem tersebut cukup sederhana serta frekuensi operasi yang efisien dan luas. Ada banyak penelitian yang telah dipublikasikan yang bertujuan untuk mengembangkan pemanenan energi piezoelektrik sebagai catu daya perangkat elektronik, baik sebagai sistem pengisian baterai atau catu daya utama [2-5].

Pada akhir-akhir ini ada kecenderungan yang meningkat terhadap pengembangan pemanen energi berbasis getaran aeroelastik, terutama ber-basis galloping. Galloping adalah salah satu fenomena ketidakstabilan aeroelastik klasik yang dapat dicirikan sebagai osilasi frekuensi rendah dan amplitudo besar. Sebagai fenomena aeroelastik, galloping dihasilkan oleh interaksi antara gaya-gaya aerodinamik, elastik dan inersia. Karena menyebabkan amplitudo osilasi besar, galloping dapat menjadi skenario yang dapat diterima untuk menggerakkan pemanen energi berbasis piezoelektrik.

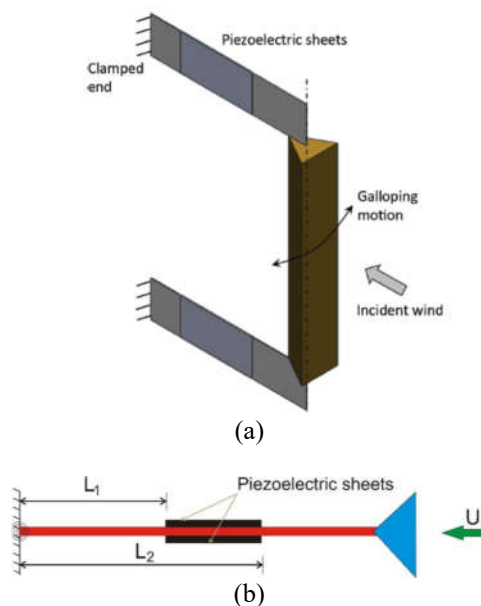
Dalam kasus pemanenan energi dari getaran galloping, sebuah massa dari batang prismatik ditempelkan pada ujung bebas dari balok kantilever piezoelektrik. Osilasi terjadi di bidang normal terhadap arah aliran udara. Daya elektrik kemudian dapat diekstraksi dari lembaran piezoelektrik yang ditempel pada struktur kantilever yang mengalami regangan dinamis.

Dalam penelitian ini simulasi dan analisis sistem pemanen energi berbasis galloping menggunakan batang kantilever dengan lembaran piezoelektrik telah dilakukan. Sebagai masa ujung (*tip mass*) digunakan batang prismatis dengan penampang segitiga sama sisi. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan daya elektrik yang maksimal dengan variabel optimasi adalah dimensi lembaran piezoelektrik dan tahanan beban yang digunakan.

Pemodelan Pemanen Energi

Model pemanen energi yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1, dimana struktur tersebut terdiri dari tiga bagian, yaitu batang, piezoelektrik dan massa ujung yang berpenampang segitiga. Pada model tersebut jika massa ujung dikenai medan aliran udara maka akan terjadi getaran akibat induksi angin yang mengakibatkan massa tersebut mengalami gallop dalam arah transversal sehingga terjadi getaran lentur tereksitasi diri (*self-excited bending vibrations*) pada batang. Energi selanjutnya dapat dipanen dari akibat regangan lembar piezoelektrik yang ditempelkan pada batang.

1. Pemodelan Aerodinamika

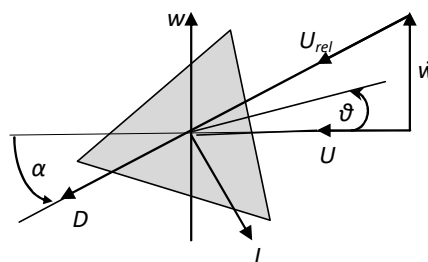


Gambar 1 (a) Model fisik dan (b) skematik struktur pemanen energi sederhana [5].

Jika dikenai medan aliran udara maka pada massa ujung akan terjadi gaya aerodinamik, yaitu gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). Kedua gaya ini berperan penting dalam terjadinya fenomena galloping. Gambar 2 menunjukkan secara diagramatis gaya-gaya yang bekerja pada sebuah massa ujung dengan kecepatan angin U , perpindahan transversal (w) dan perpindahan angular (θ). Gaya angkat (L) and dan gaya hambat (D) yang dibangkitkan selanjutnya dapat diformulasikan dalam bentuk

$$L = \frac{1}{2} \rho (U^2 + (\dot{w}(L_b))^2) b_{tip} C_L \tag{1}$$

$$D = \frac{1}{2} \rho (U^2 + (\dot{w}(L_b))^2) b_{tip} C_D \tag{2}$$



Gambar 2. Gaya-gaya aerodinamika yang bekerja pada penampang massa ujung.

Dimana ρ adalah densitas udara, b_{tip} ketebalan penampang massa ujung, \dot{w} adalah kecepatan transversal. Adapun C_L dan C_D masing-masing menunjukkan koefisien gaya angkat dan koefisien gaya hambat dengan sudut serang efektif α yang diberikan oleh persamaan

$$\alpha = \tan^{-1}(\dot{w}(L_b)/U) + w'(L_b) \tag{3}$$

Proyeksi komponen arah vertikal gaya angkat dan gaya hambat memberikan gaya eksitasi F_{tip} dalam arah ke bawah sebagai

$$F_{tip} = F_z L_{tip} = (L \cos \alpha + D \sin \alpha) L_{tip} \quad (4)$$

dan

$$F_z = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_y \quad (5)$$

dimana L_{tip} panjang batang massa ujung dan $U_{rel} = \sqrt{U^2 + (w/L_b)^2}$. Selanjutnya didefinisikan koefisien gaya aerodinamika dalam bentuk

$$C_y = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (6)$$

Dengan asumsi harga rasio kecepatan w/U cukup kecil maka koefisien gaya dapat didekati sebagai bentuk ekspansi sebagai berikut

$$C_y(\alpha) = \sum_{j=0}^n a_j \alpha^j = \sum_{j=0}^n a_j \left(\frac{w}{U}\right)^j \quad (7)$$

Jika C_L dan C_D sudah ditentukan, baik secara eksperimental maupun dengan metoda komputasi, koefisien-koefisien a_j pada Pers. (7) dapat ditentukan secara numerik.

2. Pemodelan Struktur

Pandang batang kantilever yang padanya dilatkatkan lembaran piezoelektrik. Keduanya, baik balok maupun lembaran piezoelektrik, dianggap elemen batang Euler-Bernoulli. Sehingga matriks kekakuan elemen $[k]$ dan matriks massa elemen $[m]$ batang adalah

$$[k] = \frac{EI}{l_p^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_p & -12 & 6l_p \\ 6l_p & 4l_p^2 & -6l_p & 2l_p^2 \\ -12 & -6l_p & 12 & -6l_p \\ 6l_p & 2l_p^2 & -6l_p & 4l_p^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[m] = \frac{\rho A l_p}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_p & 54 & -13l_p \\ 22l_p & 4l_p^2 & 13l_p & -3l_p^2 \\ 54 & 13l_p & 156 & -22l_p \\ -13l_p & -3l_p^2 & -22l_p & 4l_p^2 \end{bmatrix}$$

Dimana $EI = E_b I_b + 2E_p I_p$ adalah kekakuan fleksural dan $\rho A = b_b (\rho_b t_b + 2\rho_p t_p)$ adalah massa per satuan panjang elemen gabungan batang-piezoelektrik, t_p adalah tebal piezoelektrik.

Pada studi ini sufiks 'b' menandakan besaran untuk elemen batang sedang sufiks 'p' menyatakan besaran untuk elemen piezoelektrik. A_b dan A_p masing-masing menyatakan luas penampang elemen batang dan piezoelektrik, sedang I_b dan I_p masing-masing adalah momen inersia luas untuk elemen batang dan elemen piezoelektrik. Jika w menyatakan perpindahan vertikal batang, $[\bar{M}]$ dan $[\bar{K}]$ are adalah matriks massa dan kekakuan global

struktur, maka persamaan gerak sistem secara keseluruhan untuk getaran bebas dinyatakan dengan

$$[\bar{M}]\{\ddot{w}\} + [\bar{K}]\{w\} = 0 \quad (9)$$

Penyelesaian Pers. (8) memberikan frekuensi natural, ω_n , dan bentuk modus getar sistem, ϕ .

3. Persamaan Gerak Pemanen Energi

Persamaan diferensial gabungan untuk pemanen energi piezoelektrik, yaitu persamaan aero-elektromekanik, dapat diformulasikan dalam bentuk koordinat rampatu dan muatan listrik yang dihasilkan oleh lembaran piezoelektrik q sebagai

$$M\ddot{u} + Ku + \Theta q = F_{tip} \phi(L_b) \quad (10)$$

$$\Theta^T u + \frac{1}{C_p} q + R_L \dot{q} = 0 \quad (11)$$

dimana M dan K masing-masing menyatakan matriks massa rampat dan matriks kekakuan rampat sistem. Sedangkan Θ koefisien kopel elektromekanik yang didefinisikan sebagai

$$\Theta = \int_{V_p} \frac{z \phi^{nT}}{d_{31} A_p} dV_p \quad (12)$$

Pada Pers. (12) z menyatakan jarak antara sumbu batang kantilever dengan sumbu piezoelektrik, ϕ^n adalah turunan kedua bentuk modus batang. Adapun d_{31} dan V_p adalah koefisien regangan dan volume piezoelektrik. Pada persamaan (11) C_p menyatakan kapasitansi piezoelektrik (pada regangan konstan) yang diformulasikan sebagai

$$C_p = \frac{e_{33} A_p}{t_p} \quad (13)$$

dimana e_{33} menyatakan konstanta dielektrik piezoelektrik.

Dengan mendefinisikan vektor keadaan (*state vector*) yang meliputi bentuk rampat dari perpindahan, kecepatan dan muatan listrik dalam bentuk $X = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T = [u \ \dot{u} \ q]^T$, Pers. (10) dan (11) dapat dituliskan kembali dalam bentuk

$$\dot{X}_1 = X_2$$

$$\dot{X}_2 = -(M^{-1}K)X_1 - (M^{-1}\Theta)X_3 - (M^{-1}\phi(L_b))F_{tip} \quad (14)$$

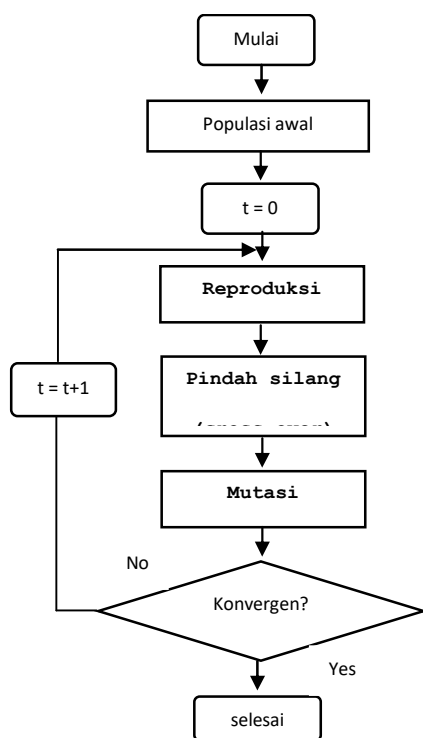
$$\dot{X}_3 = -\left(\frac{1}{R_L}\Theta^T\right)X_1 - \left(\frac{1}{R_L C_p}\right)X_3$$

Sistem persamaan diferensial pada Pers. (14) selanjutnya dapat diselesaikan menggunakan metode numerik yang lazim untuk mendapatkan respon-respon dinamikanya.

4. Algoritma Genetika

Pada penelitian ini Algoritma Genetika (GA)

dipilih sebagai pengoptimasi. Pemilihan ini dikarenakan GA mampu memberikan solusi optimum global. GA sesungguhnya merupakan teknik pencarian secara random untuk menemukan penyelesaian dalam masalah optimasi yang menerapkan metode genetik sebagai model dalam penyelesaian masalah seperti: mutasi, seleksi dan pindah silang (*crossover*). Secara umum diagram alir GA ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir GA.

Secara garis besar struktur dasar dari GA adalah sebagai berikut [6]:

- Membentuk suatu populasi individual secara acak yang terdiri dari n kromosom dengan panjang tertentu.
- Mengevaluasi *fitness* (fungsi yang akan dioptimumkan) dari setiap kromosom pada populasi.
- Membentuk populasi baru dengan melakukan pengulangan dari langkah sebelumnya hingga didapatkan populasi baru yang lengkap.
- Menggantikan generasi yang lama dengan populasi yang baru.
- Apabila kondisi penghentian telah dipenuhi, berhenti, dan individu-individu dalam populasi terakhir merupakan solusi terbaik yang didapat.
- Jika kondisi penghentian tidak didapat, kembali ke langkah dua

Hasil dan Pembahasan

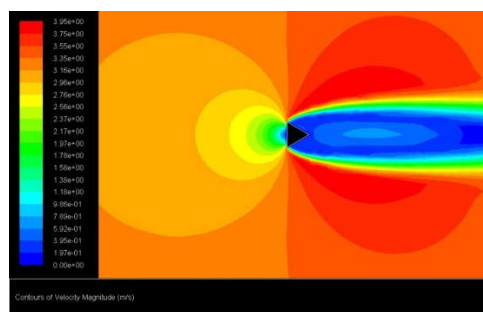
Tabel 1 menunjukkan karakteristik geometris dan material balok kantilever dan piezoelektrik yang digunakan dalam penelitian ini. Massa ujung

0.08 kg digunakan untuk menghasilkan galloping. Analisis CFD dilakukan untuk mendapatkan variasi koefisien gaya angkat dan gaya hambat (C_L dan C_D) pada sudut serang antara -45° sampai 45° dan pada bilangan Reynolds 10800.

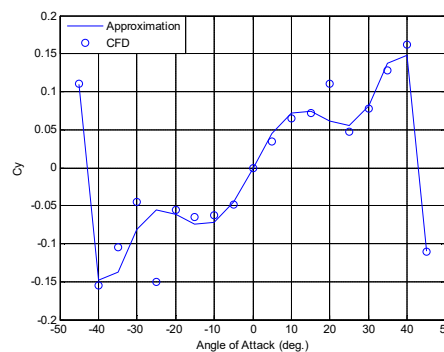
Tabel 1. Geometri dan sifat material pemanen energi.

Parameter	Cantilever Beam	Piezoelectric
Material	Aluminium	Piezoelectric PZT-5H
Length (m)	$l_b = 0.161$	$l_p = 0.0724$
Width (m)	$b_b = 0.038$	$b_p = 0.0362$
Thickness (m)	$t_b = 0.00635$	$t_p = 0.267 \times 10^{-3}$
Young's modulus (N/m ²)	$E_b = 6.9 \times 10^{10}$	$E_p = 6.2 \times 10^{10}$
Density (kg/m ³)	$\rho_b = 2700$	$\rho_p = 7800$
Stress Constant (Vm/N)	-	$g_{31} = 8.5 \times 10^{-3}$
Strain Constant (C/N)	-	$d_{31} = -320 \times 10^{-12}$
Dielectric Constant (nF/m)	-	$\epsilon_{33} = 33.65$

Gambar 4a menunjukkan sampel distribusi kecepatan pada profil segitiga yang diperoleh melalui analisis CFD pada bilangan Reynold 10800. Sedangkan Gambar 4b menunjukkan perbandingan variasi koefisien gaya aerodinamika C_y terhadap perubahan sudut serang yang diperoleh dari analisis CFD dan aproksimasi dengan Pers. (7) dimana harga-harga koefisiennya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.



(a)



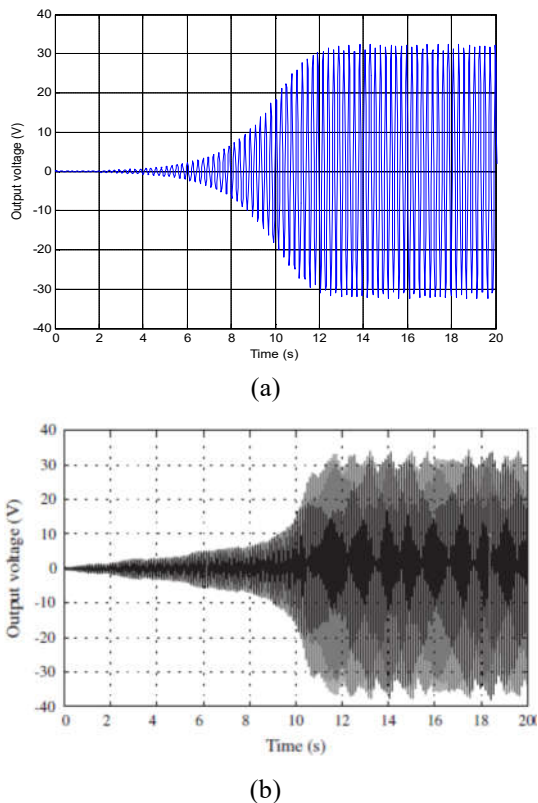
(b)

Gambar 4. (a) Distribusi kecepatan, (b) koefisien gaya aerodinamika C_y .

Tabel 2. Koefisien polinomial untuk aproksimasi C_y

Section	a_1	a_3	a_5	a_7
Triangular	1.427	-38.666	-18.49	-0.398

Metode Elemen Hingga diterapkan untuk menganalisis getaran bebas (Pers. (7)) dan diperoleh frekuensi natural pemanen energi sebesar 10.44 Hz. Harga ini bersesuaian dengan yang diperoleh oleh Sirohi dan Mahandik, yaitu 10.43 Hz [5]. Selanjutnya perbandingan tegangan listrik keluaran yang diperoleh dari pendekatan komputasional dan pengukuran pada kecepatan angin 4,47 m/s dan tahanan beban 37 kΩ masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5a dan 5b. Dapat dilihat bahwa tegangan hasil komputasisebesar 32.83 V dan mempunyai kecenderungan yang sesuai dengan tegangan yang diperoleh dari pengukuran. Oleh karena itu dapat disimpulkan metoda analisis yang diterapkan dalam penelitian ini dapat diterima.



Gambar 5. Tegangan keluaran untuk $U = 4.47$ m/s dan $R = 37$ kΩ, (a) hasil pendekatan komputasional, (b) pengukuran [5].

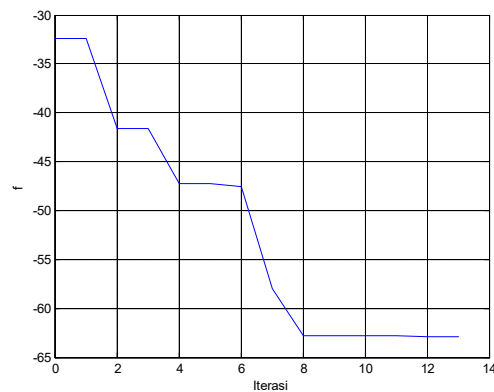
Langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi. Langkah ini dimaksudkan untuk mendapatkan tegangan luaran yang paling maksimum. Adapun sebagai variabel optimasi adalah dimensi lembar piezoelektrik (panjang, l_p , lebar, w_p , dan tebal, t_p) dan tahanan beban, R . Sekalipun prosedur optimasi dalam penelitian ini digunakan GA akan tetapi metoda konvensional yang didasarkan pada

metoda gradien, *Gradient-Based Method* (GBM), juga diterapkan sebagai pembanding. Batas atas dan batas bawah yang diterapkan dalam optimasi ini adalah sebagai berikut:

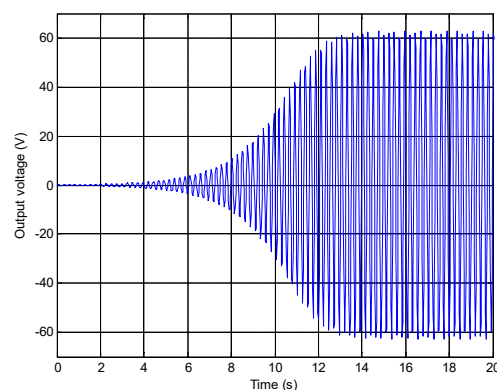
$$\begin{aligned}
 10 &\leq l_p \leq 100 \text{ mm} \\
 10 &\leq w_p \leq 38 \text{ mm} \\
 0.1 &\leq t_p \leq 0.4 \text{ mm} \\
 10 &\leq R \leq 100 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Sebagai harga tebakan awal (hanya untuk GBM) digunakan harga-harga seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Gambar 6 menunjukkan fungsi obyektif hasil optimasi yang diperoleh melalui GBM. Dari gambar tampak bahwa fungsi obyektif sudah mengalami konvergensi pada iterasi ke-13 dengan harga tegangan maksimum sebesar 62.858 V. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7 yang menampilkan tegangan keluaran optimum pemanen energi yang diperoleh menggunakan GBM.



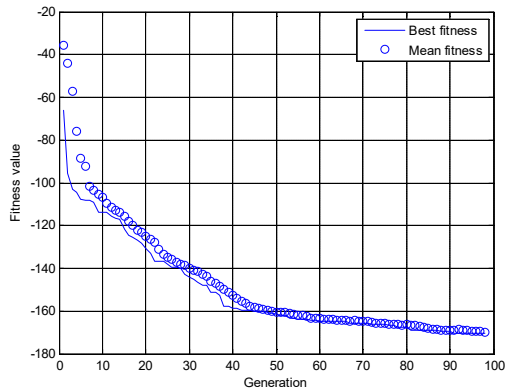
Gambar 6. Fungsi obyektif.



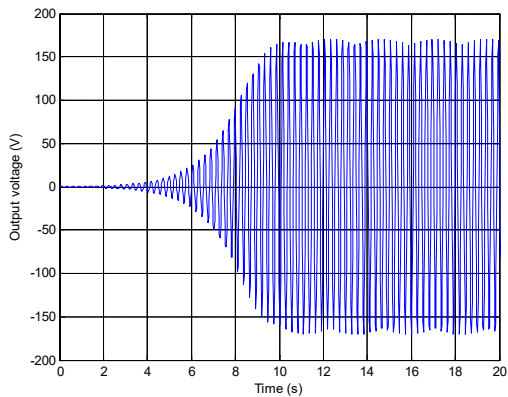
Gambar 7. Tegangan keluaran optimum pemanen energi untuk $U = 4.47$ m/s dengan optimasi menggunakan GBM.

Parameter-parameter GA yang digunakan guna optimasi dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3. Sedangkan Gambar 8 menunjukkan konvergensi fitness yang diperoleh. Dari Gambar 8 tampak bahwa konvergensi diperoleh pada generasi ke-98

dengan harga tegangan keluaran maksimum sebesar 170.177 V. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 9 yang menunjukkan tegangan keluaran optimum yang diperoleh dengan optimasi menggunakan GA.



Gambar 8. Best dan mean fitness.



Gambar 9. Tegangan keluaran optimum pemanen energi untuk $U = 4.47$ m/s dengan optimasi menggunakan GA.

Tabel 3. Paramer GA yang digunakan.

Parameter	Type or Value
Crossover Function	0.8
Mutation Function	Gaussian
Population Type	Double Vector
Selection Function	Stochastic Uniform
Population Size	50
Maximum Generation	400

Variabel optimum secara keseluruhan yang diperoleh dari optimasi menggunakan GBM dan GA diberikan pada Tabel 4. Dari hasil yang diperoleh tampak bahwa hasil optimasi menggunakan GA memberikan tegangan keluaran optimum yang jauh lebih besar dibanding hasil optimasi yang diperoleh menggunakan GBM. Hal ini disebabkan karena optimasi menggunakan GA akan memberikan optimum global sedangkan dengan GBM memberikan optimum lokal di sekitar kondisi awa. Jika dibandingkan dengan kondisi awal yang digunakan dalam analisis sebelumnya perubahan harga yang mencolok baik yang diperoleh dari GBM

maupun GA adalah harga yang diberikan oleh tahanan beban yang keduanya menunjukkan harga di sekitar batas atas yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran pemanen energi sangat sensitif terhadap tahanan beban.

Tabel 4. Variabel optimum dengan GBM dan GA.

Variabel	GBM	GA
l_p (mm)	78.018	10.029
w_p (mm)	37.932	37.987
t_p (mm)	0.397	0.399
R (k Ω)	100.000	99.977
V_{maks} (Volt)	62.858	170.177

Perbedaan yang mencolok variabel optimum yang diberikan oleh GBM dan GA adalah panjang lembar piezoelektrik dimana masing-masing berharga 78.018 mm dan 10.029 mm. Dibandingkan dengan harga awal panjang lembara piezoelektrik, perubahan yang signifikan diberikan oleh hasil dari GA sedang hasil yang diperoleh dengan GBM memberikan harga yang tidak jauh berbeda dari kondisi awalnya (lihat Tabel 1). Hal ini disebabkan karena arah pencarian variabel optimasi menggunakan GBM didasarkan pada analisis sensitivitas. Sedangkan tegangan keluaran energi permanen sangat sensitif terhadap perubahan tahanan beban sehingga hasil yang ditunjukkan oleh GBM memberikan perubahan harga tahanan beban yang cukup signifikan terhadap harga awal dibanding perubahan harga dimensi lembar piezoelektrik. Sementara optimasi menggunakan GA dilakukan secara random dan tidak mendasarkan pada studi sensitivitas, sedangkan kuat medan elektrik yang diberikan oleh piezoelektrik berbanding terbalik dengan ukuran panjangnya dalam arah dimana regangan terjadi. Oleh karena itu perubahan ukuran panjang piezoelektrik yang cukup signifikan diberikan oleh optimasi menggunakan GA.

Kesimpulan dan Saran

Dari hasil yang diperoleh, tampak bahwa metoda simulasi dan analisis yang diterapkan dalam penelitian ini memberikan hasil yang cukup memadai. Tampak pula bahwa sistem pemanen energi sangat sensitif terhadap perubahan harga tahanan beban. Adapun optimasi yang diperoleh menunjukkan bahwa GA memberikan hasil yang jauh lebih baik dibanding dengan GBM.

Sekalipun hasil yang diperoleh dalam penelitian ini sangat memuaskan akan tetapi beberapa hal perlu dilakukan untuk perbaikan hasil. Diantaranya adalah analisis CFD sebaiknya dilakukan untuk bilangan Reynold yang lebih bervariasi agar dapat memberikan gambaran yang lebih memadai de-

ngan kondisi riil. Variabel optimasi juga dapat dilakukan tidak hanya dengan melibatkan ukuran lembar piezoelektrik dan tahanan beban saja melainkan juga dimensi batang kantilever dan ukuran massa ujung.

Referensi

- [1]. Abdelkefi, A., 2016. Aeroelastic energy harvesting: A review, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 100, No. 112.
- [2]. Anton, R. and Sodano, A., 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006), *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, R1.
- [3]. Erturk, A., Vieira, W.G.R., De Marqui, C. and Inman, D.J., 2010. On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems, *Applied Physics Letters*, Vol. 96, p. 184103.
- [4]. Roundy, S. and Wright, P.K., 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 1131.
- [5]. Sirohi, J. and Mahadik, R., 2011. Piezoelectric Wind Energy Harvester for Low-Power Sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16.
- [6]. Rao, S.S., 2009. *Engineering Optimization: Theory and Practice* 4th ed., John Wiley & Sons Inc., USA.