

# Simulasi Optimalisasi Pemanenan Energi Pijakan Piezoelektrik Menggunakan Sistem MPPT Berbasis Algoritma FOCV (Fractional Open Circuit Voltage)

Wildan Arjuna Fasya<sup>1</sup>, M. Jasa Afroni<sup>2</sup>, Oktriza Melfazen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universitas Islam Malang

Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam Malang

Jl. MT Haryono 193 Malang

[22201053029@unisma.ac.id](mailto:22201053029@unisma.ac.id), [jasa.afroni@unisma.ac.id](mailto:jasa.afroni@unisma.ac.id), [oktriza.melfazen@unisma.ac.id](mailto:oktriza.melfazen@unisma.ac.id)

## Abstract

*This study discusses the optimization of piezoelectric footstep energy harvesting using a Maximum Power Point Tracking system based on the Fractional Open Circuit Voltage algorithm. The research was conducted using a partial approach, in which real footstep voltage data were obtained from piezoelectric measurements and then used as input for numerical simulation in MATLAB M-file. The modeled system consists of a piezoelectric source, bridge rectifier, DC bus capacitor, open-circuit sampling switch, boost converter, and energy storage. The simulation compares two operating conditions, namely a baseline system with fixed duty cycle and an MPPT FOCV system. The FOCV algorithm works by sampling the open-circuit voltage, calculating the reference voltage using  $V_{ref} = k \times V_{oc}$ , and adjusting the duty cycle so that  $V_{bus}$  approaches  $V_{ref}$ . The tested parameters include  $k$ ,  $T_{oc}$ , and  $T_{smp}$ . The simulation results show that the best parameter combination is obtained at  $k = 0.6$ ,  $T_{smp} = 2$  s, and  $T_{oc} = 0.5$  s. At this condition, the MPPT FOCV system produces an average power of 0.791 mW and stored energy of 123.152 mJ, while the baseline system produces an average power of 0.487 mW and stored energy of 75.793 mJ. The stored energy increases by 62.48% compared to the baseline. These results indicate that the MPPT FOCV method can improve the performance of piezoelectric footstep energy harvesting compared to a fixed-duty baseline system.*

**Keywords**— Piezoelectric, Energy harvesting, MPPT, FOCV, MATLAB, Footstep energy.

## Abstraksi

Penelitian ini membahas optimalisasi pemanenan energi pijakan piezoelektrik menggunakan sistem *Maximum Power Point Tracking* berbasis algoritma *Fractional Open Circuit Voltage*. Penelitian dilakukan dengan pendekatan partial, yaitu data tegangan pijakan nyata diperoleh dari hasil pengukuran piezoelektrik, kemudian digunakan sebagai input simulasi numerik menggunakan M-file MATLAB. Sistem yang dimodelkan terdiri dari sumber piezoelektrik, bridge rectifier, kapasitor DC bus, switch open-circuit, boost converter, dan penyimpan energi. Simulasi dilakukan dengan membandingkan dua kondisi, yaitu sistem baseline dengan duty cycle tetap dan sistem MPPT FOCV. Algoritma FOCV bekerja dengan melakukan sampling tegangan open-circuit, menghitung tegangan referensi menggunakan persamaan  $V_{ref} = k \times V_{oc}$ , kemudian mengatur duty cycle agar  $V_{bus}$  mendekati  $V_{ref}$ . Parameter yang diuji meliputi  $k$ ,  $T_{oc}$ , dan  $T_{smp}$ . Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi parameter terbaik diperoleh pada  $k = 0,6$ ,  $T_{smp} = 2$  s, dan  $T_{oc} = 0,5$  s. Pada kondisi tersebut, sistem MPPT FOCV menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,791 mW dan energi tersimpan sebesar 123,152 mJ, sedangkan sistem *baseline* menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,487 mW dan energi tersimpan sebesar 75,793 mJ. Peningkatan energi tersimpan yang diperoleh sebesar 62,48% dibandingkan *baseline*. Hasil ini menunjukkan bahwa metode MPPT FOCV mampu meningkatkan performa pemanenan energi pijakan piezoelektrik dibandingkan sistem *baseline* dengan duty cycle tetap.

**Kata Kunci**— Piezoelektrik, Energy Harvesting, MPPT, FOCV, MATLAB, Energi pijakan.

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan perangkat elektronik berdaya rendah, seperti sensor mandiri, sistem monitoring portabel, dan perangkat Internet of Things, mendorong kebutuhan sumber energi alternatif yang mandiri dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan adalah energi mekanik dari aktivitas manusia, terutama pijakan kaki. Energi pijakan tersedia secara berulang pada area yang sering dilalui manusia, seperti gedung, koridor, kampus, stasiun, dan fasilitas

umum. Energi tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan material piezoelektrik.

Piezoelektrik merupakan material yang mampu menghasilkan tegangan listrik ketika menerima tekanan, getaran, atau deformasi mekanik. Pada sistem pemanenan energi pijakan, tekanan dari kaki manusia menyebabkan elemen piezoelektrik menghasilkan tegangan listrik. Namun, keluaran piezoelektrik akibat pijakan manusia memiliki karakteristik impulsif, tidak kontinu, dan berubah-ubah sesuai besar tekanan, durasi pijakan, serta pola langkah. Selain itu, energi yang dihasilkan dari satu pijakan relatif kecil, sehingga diperlukan rangkaian

pengolah daya agar energi dapat disearahkan, dikondisikan, dan disimpan dengan lebih baik.

Sistem pemanen energi piezoelektrik umumnya membutuhkan rangkaian bridge rectifier, kapasitor DC bus, DC-DC converter, dan penyimpanan energi. Rangkaian tersebut berfungsi untuk mengubah keluaran piezoelektrik yang masih bersifat bolak-balik menjadi tegangan searah, menstabilkan tegangan sementara, serta mengatur proses transfer energi menuju penyimpanan energi. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan proses pemindahan energi adalah Maximum Power Point Tracking atau MPPT.

MPPT digunakan untuk mengatur titik kerja sistem agar mendekati titik daya maksimum. Salah satu metode MPPT yang sederhana dan sesuai untuk sistem energi berskala kecil adalah Fractional Open Circuit Voltage atau FOCV. Metode FOCV bekerja dengan memanfaatkan hubungan antara tegangan rangkaian terbuka atau  $V_{oc}$  dan tegangan kerja optimum. Tegangan referensi pada metode FOCV ditentukan menggunakan persamaan  $V_{ref} = k \times V_{oc}$ . Nilai  $V_{oc}$  diperoleh melalui proses open-circuit sampling, kemudian digunakan untuk menentukan  $V_{ref}$  sebagai acuan pengaturan duty cycle pada boost converter.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pemanenan energi piezoelektrik, rangkaian pengolah daya, serta metode MPPT pada sumber energi terbarukan. Akan tetapi, kajian mengenai penerapan MPPT FOCV pada pemanen energi pijakan piezoelektrik dengan variasi parameter  $k$ ,  $T_{oc}$ , dan  $T_{smp}$  masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter FOCV terhadap performa sistem pemanen energi pijakan piezoelektrik melalui perbandingan antara baseline duty tetap dan sistem MPPT FOCV berbasis simulasi M-file MATLAB.

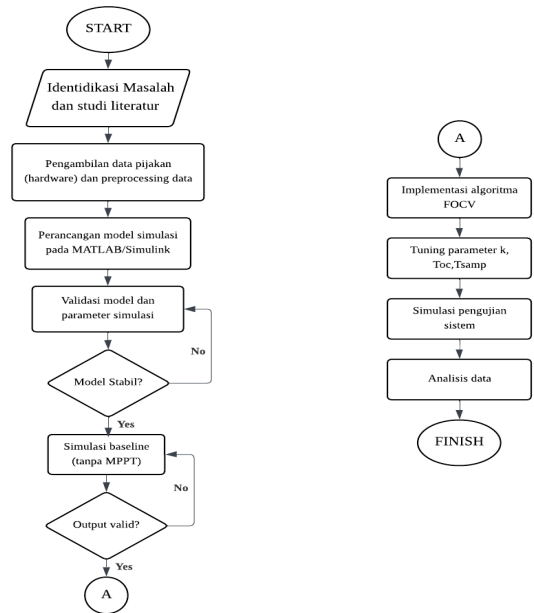
## II. METODE PENELITIAN

### A. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode berbasis simulasi dengan pendekatan partial. Pengambilan data hardware dilakukan untuk memperoleh profil tegangan piezoelektrik akibat pijakan manusia, sedangkan analisis utama dilakukan melalui pemodelan sistem menggunakan M-file MATLAB. Dengan demikian, hardware pada penelitian ini hanya digunakan sebagai sumber data input, bukan sebagai prototipe MPPT penuh.

Sistem yang dimodelkan terdiri dari piezoelektrik sebagai sumber energi, bridge rectifier sebagai penyearah, kapasitor DC bus sebagai penyangga tegangan, switch open-circuit sebagai bagian dari proses sampling  $V_{oc}$ , boost converter sebagai pengatur transfer energi, dan penyimpanan energi. Sistem diuji dalam dua kondisi, yaitu baseline tanpa MPPT dengan duty cycle tetap dan sistem MPPT FOCV dengan duty cycle yang berubah berdasarkan proses sampling dan tracking.

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian dimulai dari studi literatur, pengambilan data tegangan piezoelektrik, pemodelan sistem pada MATLAB, simulasi baseline, simulasi MPPT FOCV, pengujian variasi parameter, analisis hasil, dan penentuan parameter terbaik.

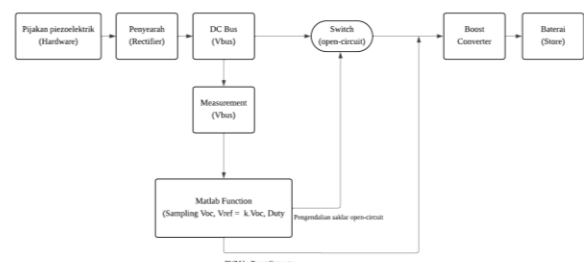


Gambar 1. Flowchart alur penelitian

### B. Data Input Piezoelektrik

Data input pada penelitian ini berupa data tegangan piezoelektrik terhadap waktu yang diperoleh dari hasil pengukuran pijakan manusia. Data tersebut digunakan sebagai input yang sama untuk seluruh skenario pengujian, baik baseline maupun MPPT FOCV. Penggunaan data input yang sama bertujuan agar perbandingan hasil simulasi lebih adil, sehingga perbedaan keluaran sistem disebabkan oleh metode kontrol dan variasi parameter FOCV, bukan karena perbedaan sumber tegangan input.

Rangkaian sistem yang dimodelkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem terdiri dari piezoelektrik, bridge rectifier, kapasitor DC bus, switch open-circuit, boost converter, dan penyimpanan energi. Pada sistem baseline, duty cycle dibuat tetap, sedangkan pada sistem MPPT FOCV duty cycle diatur berdasarkan nilai  $V_{ref}$ .



Gambar 2. Rangkaian Sistem Pemanen Energi Piezoelektrik

Berdasarkan hasil pengambilan data, tegangan piezoelektrik meningkat secara bertahap dari 0 V hingga sekitar 3,559 V selama 120 pijakan dengan waktu pengukuran 154,29 s. Tegangan mencapai sekitar 1 V pada waktu 59,144 s, 2 V pada waktu 99,003 s, dan 3 V pada waktu 124,718 s. Karakteristik ini menunjukkan bahwa energi dari pijakan manusia dapat dikumpulkan secara bertahap pada kapasitor DC bus setelah melalui proses penyearahan.

### C. Algoritma MPPT FOCV

Algoritma FOCV bekerja dengan melakukan proses sampling Voc pada kondisi open-circuit. Pada saat sampling, sumber piezoelektrik dilepaskan sesaat dari rangkaian konversi untuk memperoleh nilai tegangan rangkaian terbuka. Setelah Voc diperoleh, sistem menghitung tegangan referensi menggunakan persamaan:

$$V_{ref} = k \times V_{oc}$$

Keterangan:

$V_{ref}$  = tegangan referensi

$k$  = konstanta fraksi FOCV

$V_{oc}$  = tegangan open-circuit

Setelah nilai  $V_{ref}$  diperoleh, sistem kembali ke mode tracking. Pada mode ini, duty cycle boost converter diatur agar  $V_{bus}$  dapat bergerak mendekati  $V_{ref}$ . Parameter yang diuji pada penelitian ini adalah  $k$ ,  $T_{oc}$ , dan  $T_{samp}$ . Nilai  $k$  digunakan untuk menentukan besarnya tegangan referensi,  $T_{oc}$  digunakan untuk menentukan lama waktu sampling Voc, sedangkan  $T_{samp}$  digunakan untuk menentukan periode pengulangan sampling.

### D. Skenario pengujian

Pengujian dilakukan dengan membandingkan sistem baseline dan sistem MPPT FOCV. Pada sistem baseline, duty cycle dibuat tetap sehingga sistem tidak menyesuaikan titik kerja terhadap perubahan tegangan input piezoelektrik. Pada sistem MPPT FOCV, duty cycle berubah berdasarkan hasil sampling Voc dan perhitungan  $V_{ref}$ .

**Tabel 1.** Skenario Pengujian Simulasi

| Skenario | Sistem             | Parameter yang diuji                                             | Output yang diamati                                               |
|----------|--------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1        | Baseline           | Duty cycle tetap                                                 | $V_{bus}$ , duty cycle, daya rata-rata, energi tersimpan          |
| 2        | MPPT FOCV          | nilai $k = (0,4;0,5;0,6)$ dengan variasi $T_{oc}$ dan $T_{samp}$ | $V_{oc}$ , $V_{ref}$ , $V_{bus}$ , duty cycle, $P_{avg}$ , energi |
| 3        | Perbandingan akhir | Baseline dan parameter FOCV terbaik                              | $P_{avg}$ , energi tersimpan, peningkatan energi                  |

### E. Perhitungan Daya dan Energi

Energi tersimpan pada penelitian ini diperoleh dari akumulasi daya terhadap waktu selama proses simulasi berlangsung. Daya sesaat dihitung pada setiap waktu

simulasi, kemudian dijumlahkan terhadap selang waktu simulasi. Secara matematis, energi tersimpan dinyatakan dengan persamaan.

$$E = \int P(t)dt \quad (1)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi tersimpan pada sistem baseline sebesar 75,793 mJ, sedangkan energi tersimpan pada sistem MPPT FOCV sebesar 123,152 mJ. Berdasarkan perbandingan tersebut, sistem MPPT FOCV mampu meningkatkan energi tersimpan sebesar 62,48% dibandingkan sistem baseline.

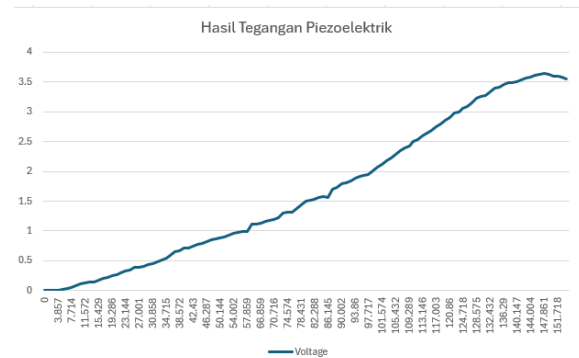
## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Pengambilan Data Tegangan Piezoelektrik

Hasil pengambilan data menunjukkan bahwa tegangan keluaran piezoelektrik akibat pijakan manusia mengalami kenaikan secara bertahap. Tegangan tidak langsung mencapai nilai tinggi, melainkan meningkat sesuai jumlah dan pola pijakan. Hal ini menunjukkan bahwa sumber piezoelektrik akibat pijakan manusia memiliki karakteristik energi yang kecil dan bertahap, sehingga memerlukan proses pengolahan daya yang sesuai.

Data tegangan ini kemudian digunakan sebagai input pada simulasi M-file MATLAB. Dengan menggunakan data input yang sama pada seluruh skenario, hasil baseline dan MPPT FOCV dapat dibandingkan berdasarkan metode kontrol dan variasi parameter FOCV.

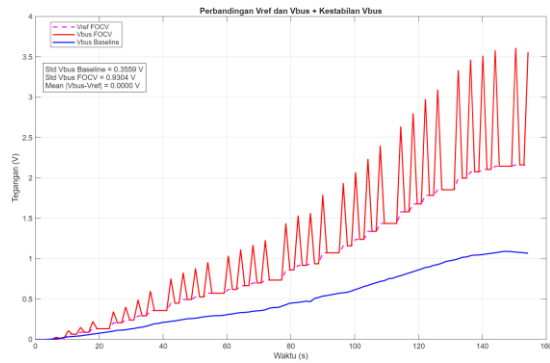
Hasil pengambilan data tegangan piezoelektrik ditunjukkan pada Gambar 3. Tegangan meningkat secara bertahap dari 0 V hingga sekitar 3,559 V selama 120 pijakan dengan waktu pengambilan data 154,29 s. Data ini digunakan sebagai input yang sama pada simulasi baseline dan MPPT FOCV



**Gambar 3.** Hasil Tegangan Piezoelektrik

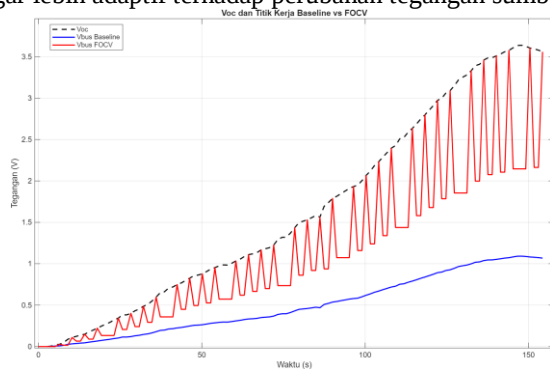
### B. Perbandingan Baseline dan MPPT FOCV

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem baseline bekerja dengan duty cycle tetap, sehingga titik kerja sistem tidak menyesuaikan perubahan tegangan input piezoelektrik. Sebaliknya, sistem MPPT FOCV melakukan proses sampling Voc untuk menghitung  $V_{ref}$ , kemudian mengatur duty cycle agar  $V_{bus}$  mendekati  $V_{ref}$ .



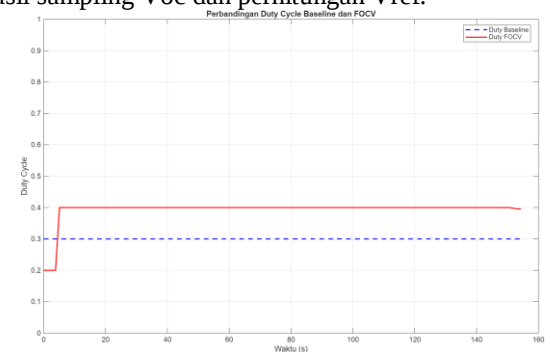
**Gambar 4.** Perbandingan Vref dan Vbus

Pada perbandingan titik kerja, Vbus baseline memiliki nilai lebih rendah karena tidak menggunakan tegangan referensi sebagai acuan kontrol. Sementara itu, Vbus pada sistem FOCV menunjukkan respons yang lebih tinggi dan mengikuti perubahan Voc melalui proses sampling dan tracking. Hal ini menunjukkan bahwa FOCV mampu mengarahkan titik kerja sistem agar lebih adaptif terhadap perubahan tegangan sumber.



**Gambar 5.** Perbandingan Titik Kerja Baseline dan MPPT FOCV

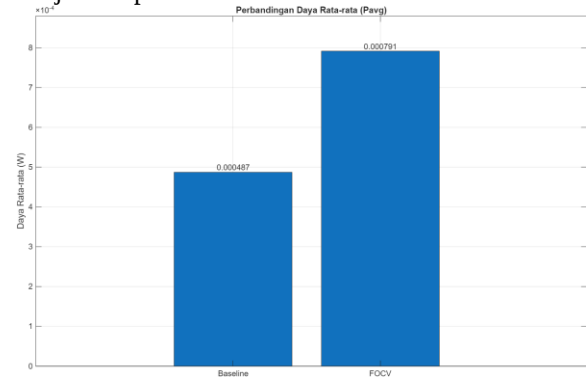
Pada perbandingan duty cycle, sistem baseline memiliki duty cycle tetap sebesar 0,3, sedangkan duty cycle pada sistem FOCV berubah dari sekitar 0,2 menuju 0,4 dan relatif stabil pada nilai tersebut. Perubahan duty cycle ini menunjukkan bahwa sistem FOCV melakukan penyesuaian titik kerja berdasarkan hasil sampling Voc dan perhitungan Vref.



**Gambar 6.** Perbandingan Duty cycle Baseline dan MPPT FOCV

#### C. Perbandingan Daya Rata-rata

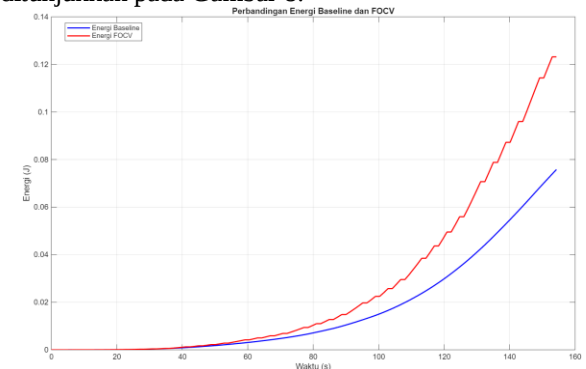
Berdasarkan hasil simulasi, daya rata-rata baseline sebesar 0,487 mW, sedangkan daya rata-rata MPPT FOCV sebesar 0,791 mW. Perbandingan daya rata-rata ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Perbandingan Daya Baseline dan MPPT FOCV

#### D. Perbandingan Energi Tersimpan

Energi tersimpan pada sistem baseline sebesar 75,793 mJ, sedangkan energi tersimpan pada sistem MPPT FOCV sebesar 123,152 mJ. Peningkatan energi yang diperoleh sebesar 62,48% dibandingkan baseline. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem MPPT FOCV mampu memindahkan energi lebih optimal menuju penyimpanan energi. Perbandingan energi tersimpan ditunjukkan pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Perbandingan Energi tersimpan dan MPPT FOCV

Peningkatan energi terjadi karena sistem FOCV dapat menyesuaikan titik kerja berdasarkan perubahan Voc. Berbeda dengan baseline yang hanya menggunakan duty cycle tetap, FOCV menggunakan tegangan referensi untuk mengarahkan Vbus mendekati titik kerja yang lebih optimal.

#### E. Pengaruh Variasi k, Toc, dan Tsamp

Pengujian variasi parameter dilakukan untuk mengetahui pengaruh k, Toc, dan Tsamp terhadap performa sistem. Nilai k berpengaruh terhadap besarnya tegangan referensi. Nilai k yang terlalu kecil menghasilkan Vref yang rendah sehingga titik kerja sistem belum optimal. Sebaliknya, nilai k yang lebih

besar dapat menghasilkan  $V_{ref}$  yang lebih sesuai selama masih dapat diikuti oleh sistem.

Nilai  $T_{smp}$  berpengaruh terhadap frekuensi proses sampling.  $T_{smp}$  yang terlalu kecil menyebabkan proses sampling terlalu sering dilakukan, sehingga waktu tracking menjadi lebih pendek. Pada penelitian ini,  $T_{smp} = 2$  s memberikan hasil lebih baik dibandingkan  $T_{smp} = 1$  s karena proses tracking memiliki waktu lebih cukup untuk memindahkan energi.

Nilai  $T_{oc}$  berpengaruh terhadap durasi pembacaan  $V_{oc}$ .  $T_{oc}$  yang terlalu lama dapat mengurangi waktu tracking, sehingga energi yang dipindahkan menuju penyimpanan menjadi lebih kecil. Hasil simulasi menunjukkan bahwa  $T_{oc} = 0,5$  s memberikan keseimbangan yang lebih baik antara proses sampling dan tracking dibandingkan  $T_{oc} = 1$  s.

**Tabel 2.** Hasil Uji Variasi Parameter dengan  $k = 0,4$

| No | k   | $T_{smp}$ | $T_{oc}$ | Pavg Baseline (mW) | Pavg FOCV (mW) | E Baseline (mJ) | E FOCV (mJ) | Kenaikan Energi (%) |
|----|-----|-----------|----------|--------------------|----------------|-----------------|-------------|---------------------|
| 1  | 0.4 | 0.5       | 0.5      | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 2  | 0.4 | 0.5       | 1        | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 3  | 0.4 | 0.5       | 2        | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 4  | 0.4 | 1         | 0.5      | 0,487              | 0,337          | 75,793          | 52,483      | -30,75%             |
| 5  | 0.4 | 1         | 1        | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 6  | 0.4 | 1         | 2        | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 7  | 0.4 | 2         | 0.5      | 0,487              | 0,567          | 75,793          | 88,288      | 16,49%              |
| 8  | 0.4 | 2         | 1        | 0,487              | 0,414          | 75,793          | 64,472      | -14,94%             |
| 9  | 0.4 | 2         | 2        | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |

**Tabel 3.** Hasil Uji Variasi Parameter dengan  $k = 0,5$

| No | k   | $T_{smp}$ (s) | $T_{oc}$ (s) | Pavg Baseline (mW) | Pavg FOCV (mW) | E Baseline (mJ) | E FOCV (mJ) | Kenaikan Energi (%) |
|----|-----|---------------|--------------|--------------------|----------------|-----------------|-------------|---------------------|
| 1  | 0.5 | 0.5           | 0.5          | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 2  | 0.5 | 0.5           | 1            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 3  | 0.5 | 0.5           | 2            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 4  | 0.5 | 1             | 0.5          | 0,487              | 0,450          | 75,793          | 70,055      | -7,57%              |
| 5  | 0.5 | 1             | 1            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 6  | 0.5 | 1             | 2            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 7  | 0.5 | 2             | 0.5          | 0,487              | 0,762          | 75,793          | 118,620     | 56,51%              |
| 8  | 0.5 | 2             | 1            | 0,487              | 0,551          | 75,793          | 85,774      | 13,17%              |
| 9  | 0.5 | 2             | 2            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |

**Tabel 4.** Hasil Uji Variasi Parameter dengan  $k = 0,6$

| No | k   | $T_{smp}$ (s) | $T_{oc}$ (s) | Pavg Baseline (mW) | Pavg FOCV (mW) | E Baseline (mJ) | E FOCV (mJ) | Kenaikan Energi (%) |
|----|-----|---------------|--------------|--------------------|----------------|-----------------|-------------|---------------------|
| 1  | 0.6 | 0.5           | 0.5          | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 2  | 0.6 | 0.5           | 1            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 3  | 0.6 | 0.5           | 2            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 4  | 0.6 | 1             | 0.5          | 0,487              | 0,463          | 75,793          | 71,979      | -5,03%              |
| 5  | 0.6 | 1             | 1            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |
| 6  | 0.6 | 1             | 2            | N/A                | N/A            | N/A             | N/A         | N/A                 |

|   |     |   |     |       |       |        |         |        |
|---|-----|---|-----|-------|-------|--------|---------|--------|
| 7 | 0.6 | 2 | 0.5 | 0,487 | 0,791 | 75,793 | 123,152 | 62,48% |
| 8 | 0.6 | 2 | 1   | 0,487 | 0,563 | 75,793 | 87,609  | 15,59% |
| 9 | 0.6 | 2 | 2   | N/A   | N/A   | N/A    | N/A     | N/A    |

#### F. Parameter Terbaik

Berdasarkan hasil pengujian, kombinasi parameter terbaik diperoleh pada  $k = 0,6$ ,  $T_{smp} = 2$  s, dan  $T_{oc} = 0,5$  s. Pada kombinasi tersebut, sistem MPPT FOCV menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,791 mW dan energi tersimpan sebesar 123,152 mJ. Sistem baseline menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,487 mW dan energi tersimpan sebesar 75,793 mJ. Dengan demikian, sistem MPPT FOCV mampu meningkatkan energi tersimpan sebesar 62,48% dibandingkan baseline.

**Tabel 5.** Rekap Parameter Terbaik MPPT FOCV

| Output                | Nilai   |
|-----------------------|---------|
| k terbaik             | 0,6     |
| $T_{smp}$ terbaik (s) | 2       |
| $T_{oc}$ terbaik (s)  | 0,5     |
| Pavg Baseline (mW)    | 0,487   |
| Pavg FOCV (mW)        | 0,791   |
| E Baseline (mJ)       | 75,793  |
| E FOCV (mJ)           | 123,152 |
| Kenaikan Energi (%)   | 62,48%  |

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi  $k = 0,6$ ,  $T_{smp} = 2$  s, dan  $T_{oc} = 0,5$  s mampu memberikan keseimbangan antara proses sampling dan tracking. Nilai  $k = 0,6$  menghasilkan  $V_{ref}$  yang lebih sesuai terhadap karakteristik input piezoelektrik,  $T_{smp} = 2$  s memberikan waktu tracking yang cukup, dan  $T_{oc} = 0,5$  s memberikan waktu sampling yang cukup tanpa terlalu lama mengganggu proses transfer energi.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan sistem pemanen energi pijakan piezoelektrik menggunakan M-file MATLAB dengan input data tegangan pijakan nyata. Sistem yang dimodelkan terdiri dari piezoelektrik, bridge rectifier, kapasitor DC bus, switch open-circuit, boost converter, dan penyimpanan energi.

Metode MPPT FOCV berhasil diterapkan melalui proses sampling  $V_{oc}$ , perhitungan  $V_{ref} = k \times V_{oc}$ , dan pengaturan duty cycle agar  $V_{bus}$  mendekati  $V_{ref}$ . Sistem baseline digunakan sebagai pembanding dengan duty cycle tetap tanpa proses sampling dan tanpa tegangan referensi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi  $k$ ,  $T_{oc}$ , dan  $T_{smp}$  berpengaruh terhadap daya rata-rata dan energi tersimpan. Kombinasi parameter terbaik diperoleh pada  $k = 0,6$ ,  $T_{smp} = 2$  s, dan  $T_{oc} = 0,5$  s. Pada kondisi tersebut, sistem MPPT FOCV menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,791 mW dan energi tersimpan sebesar 123,152 mJ, sedangkan sistem baseline menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,487 mW dan energi tersimpan sebesar 75,793 mJ. Dengan demikian, sistem MPPT FOCV mampu meningkatkan

energi tersimpan sebesar 62,48% dibandingkan baseline.

Secara keseluruhan, metode MPPT FOCV mampu meningkatkan performa pemanenan energi pijakan piezoelektrik dibandingkan sistem baseline duty tetap. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan prototipe hardware sederhana yang terdiri dari piezoelektrik, rectifier, kapasitor, dan boost converter agar hasil simulasi dapat dibandingkan dengan pengujian langsung.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alshareef, M. J. (2025). An Enhanced Fractional Open Circuit Voltage MPPT Method for Rapid and Precise MPP Tracking in Standalone Photovoltaic Systems. *IEEE Access*, 13, 34115–34131. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3543327>
- [2] Alzahrani, A. (2020). A fast and accurate maximum power point tracking approach based on neural network assisted fractional open-circuit voltage. *Electronics (Switzerland)*, 9(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/electronics9122206>
- [3] Arsa, I. P. S., Sutaya, I. W., & Wiratama, W. M. P. (2022, March 30). *FOCV-ased Control Scheme for a Hybrid Solar Panels Application*. <https://doi.org/10.4108/eai.27-11-2021.2315636>
- [4] Baimel, D., Tapuchi, S., Levron, Y., & Belikov, J. (2019). Improved fractional open circuit voltage MPPT methods for PV systems. *Electronics (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/electronics8030321>
- [5] Belghiti, H., Kandoussi, K., Harrison, A., Moustaine, F. Z., Otmani, R. El, Sadek, E. M., Bajaj, M., & Dost Mohammadi, S. A. (2024). A novel adaptive FOCV algorithm with robust IMRAC control for sustainable and high-efficiency MPPT in standalone PV systems: experimental validation and performance assessment. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83512-2>
- [6] Bram Tirta, & Gerhana. (2025). *PEMBANGKIT LISTRIK MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK DENGAN MEMANFAATKAN TEKATANAN DARI PIJAKAN KAKI MANUSIA PADA LANTAI PROYEK AKHIR Laporan akhir ini dibuat dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat Kelulusan Sarjana Terapan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung*.
- [7] Hadi, A. S., Alawiy, T., & Wirateruna, E. S. (n.d.). *Optimasi PV dengan Metode MPPT Berbasis Algoritma Genetika*.
- [8] Hassan, A., Bass, O., & Masoum, M. A. S. (2023). An improved genetic algorithm based fractional open circuit voltage MPPT for solar PV systems. *Energy Reports*, 9, 1535–1548. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.088>
- [9] Kurt, E., Özhan, D., Bizon, N., & Lopez-Guede, J. M. (2021). Design and implementation of a maximum power point tracking system for a piezoelectric wind energy harvester generating high harmonicity. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147709>
- [10] Nadeem, A., Sher, H. A., & Murtaza, A. F. (2020). Online fractional open-circuit voltage maximum output power algorithm for photovoltaic modules. *IET Renewable Power Generation*, 14(2), 188–198. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0171>
- [11] Nia, E. M., Zawawi, N. A. W. A., & Singh, B. S. M. (2018). A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 291(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/291/1/012026>
- [12] Pan, D. (2024). LEAD ZIRCONATE TITANATE (PZT) PIEZOELECTRIC CERAMICS: APPLICATIONS AND PROSPECTS IN HUMAN MOTION MONITORING. In *Ceramics - Silikat* (Vol. 68, Number 3, pp. 444–458). University of Chemistry and Technology, Faculty of Environmental Technology. <https://doi.org/10.13168/cs.2024.0044>
- [13] Selim, K. K., Smaili, I. H., Yehia, H. M., Ahmed, M. M. R., & Saleeb, D. A. (2024). Piezoelectric Sensors Pressed by Human Footsteps for Energy Harvesting. *Energies*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/en17102297>
- [14] Shoorabi Sani, S. (2024). A high effectiveness impact-optimized piezoelectric energy harvesting interface system. *IET Power Electronics*, 17(16), 3120–3138. <https://doi.org/10.1049/pel2.12831>
- [15] Supervisor, K. S., Bai, Y., Juuti, J., Advisor, T., & Kaushalya, T. (2024). *MASTER'S THESIS MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR ULTRALOW-FREQUENCY ENERGY HARVESTERS USING A MODIFIED FRACTIONAL OPEN CIRCUIT VOLTAGE METHOD*.
- [16] Wakshume, D. G., & Plączek, M. Ł. (2024). Optimizing Piezoelectric Energy Harvesting from Mechanical Vibration for Electrical Efficiency: A Comprehensive Review. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 13, Number 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/electronics13050987>