

Model optimasi penyusunan tata letak turbin pada pembangkit listrik tenaga arus laut

Optimization model of turbine layout in a tidal power plant

Rudi Nurdiansyah*

*Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5, Malang, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, 65145, Indonesia

*Email: rudi.nurdiansyah.ft@um.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

- Histori Artikel
- Artikel dikirim
16/09/2024
 - Artikel diperbaiki
23/09/2024
 - Artikel diterima
06/10/2024

ABSTRAK

Dengan dua pertiga wilayahnya adalah lautan, Indonesia memiliki potensi yang sangat besar untuk mengekstraksi energi arus laut menjadi listrik dengan menggunakan turbin. Tujuan dari riset ini adalah untuk menyusun tata letak turbin pada pembangkit listrik tenaga arus laut (PLTAL) dengan pendekatan pemodelan optimasi. Model optimasi mempertimbangkan *wake effect* untuk menunjukkan interaksi antara turbin dalam PLTAL. Untuk menyelesaikan model tersebut, dua algoritma metaheuristik digunakan, yaitu algoritma *simulated annealing* (SA) dan algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Studi kasus penyusunan tata letak turbin adalah pada selat Riau. Hasil studi kasus menunjukkan bahwa performa algoritma SA melebihi algoritma PSO. Hal ini ditunjukkan dengan nilai fungsi objektif yang didapatkan algoritma SA lebih kecil daripada nilai fungsi objektif yang didapatkan oleh algoritma PSO. Susunan tata letak yang dihasilkan algoritma SA memberikan ruang antara turbin yang lebih longgar daripada susunan *layout* yang dihasilkan algoritma PSO. Dampaknya adalah meminimalkan *wake effect* yang dapat meningkatkan output energi sehingga nilai fungsi objektifnya lebih kecil.

Kata Kunci: Tata letak turbin; model optimasi; PSO; SA

ABSTRACT

With two-thirds of its territory covered by marine, Indonesia holds significant potential to harness marine current energy and convert it into electricity using turbines. This study aims to design the turbine layout in a Tidal Power Plant through a modeling-based optimization approach. The optimization model considers the wake effect to show the interactions between turbines in the tidal power plant. To solve the model, two metaheuristic algorithms are used, simulated annealing (SA) algorithm and the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The case study for the turbine layout design is conducted in the Riau Strait. The case study results show that the performance of the SA algorithm surpasses that of the PSO algorithm. This is demonstrated by the fact that the value of objective function obtained by the SA algorithm is smaller than the value of objective function obtained by the PSO algorithm. The layout generated by the SA algorithm provides greater spacing between turbines compared to the layout produced by the PSO algorithm. The impact is the minimization of the wake effect, which can increase energy output, resulting in a smaller objective function value.

Keywords: Turbine layout; optimization model; PSO; SA

1. PENDAHULUAN

Indonesia menduduki peringkat ke-13 dalam konsumsi energi primer global [1]. Pada tahun 2020, total pasokan energi primer di Indonesia mencapai 201,6 juta TOE (*Tonnes Oil Equivalent*), dengan pasokan energi yang masih didominasi oleh sumber daya tak terbarukan seperti batu bara, gas, dan minyak bumi [2][3]. Sumber energi fosil masih mendominasi pembangkit listrik di Indonesia, dengan kapasitas sebesar 62.399 MegaWatt (MW), sementara energi terbarukan hanya menyumbang 10.490 MW. Penggunaan energi listrik di Indonesia terus meningkat, dengan kenaikan sebesar 4,49% pada tahun 2022 dan diproyeksikan meningkat 13,9% pada tahun-tahun berikutnya. Namun, dengan semakin menipisnya sumber daya tak terbarukan dan meningkatnya permintaan energi, Indonesia semestinya mengganti ke bahan baku energi yang lebih berkelanjutan.

Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi terbarukan, terutama dalam rangka mencapai target pemerintah yang menginginkan 23% energi terbarukan (*renewable energy*) pada tahun 2025 dan 37% pada tahun 2050 [4]. *Renewable energy*, seperti panas bumi, angin, bioenergi, matahari, dan air, dihasilkan secara terus-menerus dari sumber daya alam yang melimpah [5]. Indonesia sebagai negara yang dua pertiga luas wilayahnya adalah perairan, memiliki potensi besar untuk memanfaatkan energi kelautan sebagai sumber daya energi yang berkelanjutan.

Perairan Indonesia yang mencakup dua pertiga dari total wilayah negara memberikan potensi besar bagi pengembangan pembangkit listrik tenaga arus laut (PLTAL) [6]. Arus laut di Indonesia, yang relatif stabil dan mudah diprediksi arahnya, menjadikannya sumber energi yang menarik untuk dieksplorasi [7]. Beberapa perusahaan internasional telah menguji keandalan PLTAL, dan teknologi ini telah terbukti layak secara ekonomi dan ramah lingkungan. Selat Riau, dengan kecepatan arus laut yang tinggi, rata-rata 1,39 meter per detik, menjadi salah satu lokasi potensial untuk pengembangan PLTAL di Indonesia, dengan potensi menghasilkan listrik sebesar 6 GigaWatt [8].

Pengembangan PLTAL di Selat Riau memerlukan perencanaan tata letak turbin yang optimal untuk memaksimalkan ekstraksi energi. Beberapa aspek utama dalam desain PLTAL adalah jumlah dan daya keluaran turbin, serta penentuan tata letak dan jarak antara turbin untuk meminimalkan *wake effects* [9]. *Wake effects*, terjadi di belakang turbin dan mengurangi kecepatan arus laut, dapat mempengaruhi *output* energi secara signifikan, sehingga penting untuk mempertimbangkan interaksi antara turbin dalam perancangan PLTAL. Riset ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis dalam menyelesaikan permasalahan tata letak turbin untuk mendesain PLTAL.

Penggunaan algoritma metaheuristik seperti algoritma *Simulated Annealing* (SA) dan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) telah terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan optimasi [10]. Algoritma ini bekerja dengan menghasilkan solusi secara iteratif dan menggabungkan aturan tertentu untuk mendapatkan hasil yang optimal. Algoritma SA merupakan algoritma berbasis probabilitas yang terinspirasi dari proses annealing dalam metalurgi. Algoritma ini sangat handal dalam menyelesaikan masalah optimasi kompleks seperti *line balancing problem*, *feature selection*, *vehicle routing problem* dan berbagai permasalahan optimasi lainnya [11]. Algoritma PSO, yang merupakan metode optimasi berbasis populasi, memiliki efisiensi dan kemudahan implementasi serta telah banyak diterapkan dalam menyelesaikan berbagai macam permasalahan optimasi seperti penjadwalan produksi, *vehicle routing problem*, penjadwalan proyek dan lain sebagainya [12][13][14][15][16].

Dalam penelitian ini, algoritma PSO dan algoritma SA digunakan untuk mengoptimalkan tata letak turbin PLTAL di selat Riau. Performa dari kedua algoritma tersebut akan dibandingkan berdasarkan nilai fungsi objektif yang digunakan pada penelitian ini. Dengan pendekatan ini, diharapkan pengembangan PLTAL di Indonesia dapat lebih maksimal, menghasilkan energi listrik yang lebih efisien, dan membantu Indonesia mencapai target bauran energi terbarukan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis dalam mengilustrasikan permasalahan yang diangkat. Model matematis yang digunakan merujuk pada fungsi objektif yang digunakan adalah meminimalkan biaya untuk membangun PLTAL (*cost*) dibagi dengan energi yang dihasilkan oleh PLTAL dalam satuan Watt (*power*) seperti pada (1).

$$\min \frac{cost}{Power} \quad (1)$$

Cost pada (1) dihitung menggunakan (2) dimana persamaan ini merujuk pada yang mengasumsikan bahwa semakin banyak jumlah turbin yang dipasang (N) pada PLTAL, proporsi *cost* akan semakin berkurang.

$$cost = N \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{(-0.00174N^2)} \right) \quad (2)$$

Power merupakan penjumlahan output energi yang dikeluarkan oleh tiap turbin j (P_j), dalam satuan Watt, yang dihitung menggunakan (3).

$$Power = \sum_{j=1}^N t_j \cdot P_j \quad (3)$$

Perhitungan output energi yang dikeluarkan oleh tiap turbin j menggunakan (4), dimana ρ adalah tingkat kerapatan air laut, C_p adalah tingkat koefisien daya turbin, A menunjukkan luas sapuan turbin yang dihitung menggunakan (5), v_j menunjukkan kecepatan arus laut yang menempa turbin j , G_e adalah efisiensi dari turbin dan B_e adalah efisiensi bantalan *gearbox* pada turbin.

$$P_j = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v_j^3 \cdot G_e \cdot B_e, \quad \forall j \in N \quad (4)$$

$$A = \pi r^2 \quad (5)$$

Kecepatan arus laut yang menempa turbin j terpengaruh *wake effects* jika turbin tersebut ditempatkan di belakang turbin yang lain. Untuk menghitung kecepatan arus laut yang terkena *wake effects* tersebut, digunakan (6), dimana C_t adalah koefisien dorong turbin, κ merupakan suatu konstanta yang menunjukkan perluasan *wake*, d adalah jarak antara turbin dan r merupakan panjang bilah turbin.

$$v_j = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t}}{\left(1 + \frac{\kappa d}{r}\right)^2} \quad (6)$$

Jarak antara turbin tidak boleh kurang dari jarak yang dipersyaratkan (D) untuk mengurangi *wake effects*. Untuk menunjukkan batasan non negativitas, digunakan (8) sampai (12).

$$\sqrt{dx_j^2 + dy_j^2} \geq D, \forall j, j \in J; i \neq j \quad (7)$$

$$v_j \geq 0, \forall j \in J$$

$$P_j \geq 0, \forall j \in J$$

$$cost \geq 0$$

$$Power \geq 0$$

$$N \geq 0 \quad (8)$$

Algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan model matematis di atas adalah algoritma PSO dan algoritma SA. Algoritma PSO akan dibahas yang pertama. Algoritma PSO diusulkan oleh Eberhart dan Kennedy [17]. Algoritma ini bekerja dengan menginisialisasi sekumpulan solusi yang disebut partikel, yang masing-masing mewakili calon solusi. Setiap partikel memiliki kecepatan yang mengarahkan pergerakannya dalam ruang pencarian. Secara umum, tahapan utama dalam algoritma PSO adalah: (1) inialisasi partikel, di mana setiap partikel diberikan posisi dan kecepatan awal; (2) evaluasi fitness, di mana setiap partikel dievaluasi berdasarkan fungsi objektif; (3) pembaruan posisi dan kecepatan partikel berdasarkan posisi terbaik

individu dan posisi terbaik global di antara semua partikel. Proses ini diulang hingga kriteria konvergensi terpenuhi atau jumlah iterasi tertentu tercapai. *Pseudocode* algoritma PSO yang digunakan untuk menyelesaikan model optimasi yang dipakai pada studi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Pseudocode* algoritma PSO.

Particle Swarm Optimization Algorithm

Input: Number of particles N , inertia weight w , cognitive coefficient c_1 , social coefficient c_2 , maximum iterations max_iter

Output: Optimal turbine layout

Initialize:

For each particle i in the swarm:

Initialize particle position x_i randomly (representing turbine layout)

Initialize particle velocity v_i randomly

Evaluate fitness of x_i : $cost_i = CostFunction(x_i)$

Set personal best position $pbest_i = x_i$

Set personal best cost $pbest_cost_i = cost_i$

Set global best position $g_{best} =$ position of particle with the lowest cost

Set global best cost $g_{best_cost} =$ lowest cost among all particles

For each iteration $t = 1$ to max_iter :

For each particle i in the swarm:

Update velocity:

$v_i = w \cdot v_i + c_1 * rand() * (pbest_i - x_i) + c_2 * rand() * (g_{best} - x_i)$

Update position:

$x_i = x_i + v_i$

Evaluate fitness of updated position x_i : $cost_i = CostFunction(x_i)$

Update personal best:

If $cost_i < pbest_cost_i$:

$pbest_i = x_i$

$pbest_cost_i = cost_i$

Update global best:

If $cost_i < g_{best_cost}$:

$g_{best} = x_i$

$g_{best_cost} = cost_i$

Return g_{best} as the optimal turbine layout

End Algorithm

Tabel 1 menunjukkan bahwa terdapat 5 input parameter yang perlu ditentukan pada algoritma PSO, yaitu jumlah partikel (N) bobot (w), jumlah iterasi maksimal, koefisien c_1 , dan c_2 . Pada tahap inisialisasi, setiap partikel dalam *swarm* mewakili sebuah solusi potensial berupa tata letak turbin. Partikel memiliki posisi x_i , kecepatan v_i , dan nilai fitness (dalam hal ini ada fungsi objektif yang digunakan pada riset ini) berdasarkan tata letak turbin yang diwakilinya ($cost_i$). Setiap partikel menyimpan posisi terbaik pribadi ($pbest_i$) dan nilai fitness terbaik pribadi ($pbest_cost_i$). Posisi terbaik secara global (g_{best}) dan biaya terbaik secara global (g_{best_cost}) juga disimpan.

Pada iterasi utama, setiap partikel memperbarui kecepatannya berdasarkan inersia ($w \cdot v_i$), serta kecenderungan untuk mengikuti posisi terbaik pribadi ($c_1 * rand() * (pbest_i - x_i) + c_2 * rand() * (g_{best} - x_i)$). Posisi partikel diperbarui dengan menambahkan kecepatan yang baru dihitung. Nilai fitness dari posisi baru dievaluasi menggunakan *Cost Function*, yang mempertimbangkan interaksi antara turbin dan *wake effects* (6). Apabila nilai fungsi objektif yang baru lebih baik daripada nilai fungsi objektif pribadi (tiap individu partikel) terbaik sebelumnya, partikel memperbarui $pbest_i$ dan $pbest_cost_i$. Jika ada partikel yang mencapai nilai fungsi objektif yang lebih baik daripada nilai fungsi objektif global (keseluruhan partikel)

terbaik sebelumnya, g_{best} dan g_{best_cost} diperbarui. Setelah mencapai jumlah iterasi maksimum, posisi terbaik global g_{best} dianggap sebagai tata letak optimal untuk turbin pada PLTAL.

Algoritma kedua yang diaplikasikan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam riset ini adalah Algoritma *Simulated Annealing* (SA). Algoritma SA awalnya diperkenalkan oleh [24]. Metode ini terdiri dari 3 langkah primer, yakni: (1) pembangkitan solusi awal; (2) pencarian solusi baru menggunakan metode *neighbor solution*; (3) apabila solusi baru lebih baik dari solusi awal, maka suhu diturunkan hingga mencapai titik tertentu (*minimum temperature*). Jika suhu belum mencapai titik tertentu, proses pencarian solusi baru diulangi kembali. Langkah (2) dan (3) dilakukan berulang kali hingga mencapai jumlah iterasi yang ditentukan. *Pseudocode* untuk algoritma SA yang digunakan untuk menyelesaikan *problem* perancangan tata letak turbin dalam *marine farm* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. *Pseudocode* algoritma SA.

Simulated Annealing Algorithm

Input: Initial temperature T , cooling rate α , minimum temperature, initial solution layout_0
Output: Optimal turbine layout

Initialize:
 $existing_layout = layout_0$
 $best_solution = layout_0$
 T

Evaluate current_solution:
 $existing_cost = CostFunction(existing_layout)$

While $T > minimum_temperature$:
 Create a new_layout by perturbing existing_layout
 Evaluate new_layout:
 $recent_cost = CostFunction(new_layout)$
 Calculate $\Delta E = recent_cost - existing_cost$
If $\Delta E < 0$

 $existing_layout = new_layout$
 $existing_cost = recent_cost$
Else
 Generate a random number r [0, 1]
 If $r < exp(-\Delta E/T)$:
 Accept new_layout
 $existing_layout = new_layout$
 $existing_cost = recent_cost$
 If $existing_cost < best_solution_cost$:
 $best_solution = existing_layout$
 $best_solution_cost = existing_cost$
 Reduce temperature:
 $T = T \cdot \alpha$

Return best_solution as the optimal turbine layout
End Algorithm

Pada Tabel 2 ditunjukkan bahwa algoritma SA dimulai dengan pembangkitan solusi awal dan penginputan suhu awal pada tahap inisialisasi. Suhu akan menurun seiring bertambahnya jumlah iterasi. Pada tahap evaluasi solusi, setiap solusi dievaluasi menggunakan *Cost Function* berdasarkan nilai fungsi objektif yang digunakan pada riset ini. Perhitungan tersebut juga mencakup jarak antara turbin, *wake effects*, dan total *output* energi. Untuk menghasilkan solusi atau *layout* baru, algoritma SA melakukan perturbasi solusi saat ini, yaitu dengan menggeser posisi satu turbin. Selanjutnya, dilakukan perbandingan solusi atau nilai fungsi objektif. Jika solusi baru lebih baik (nilai fungsi objektifnya lebih kecil), hasil itu akan diadopsi. Jika tidak,

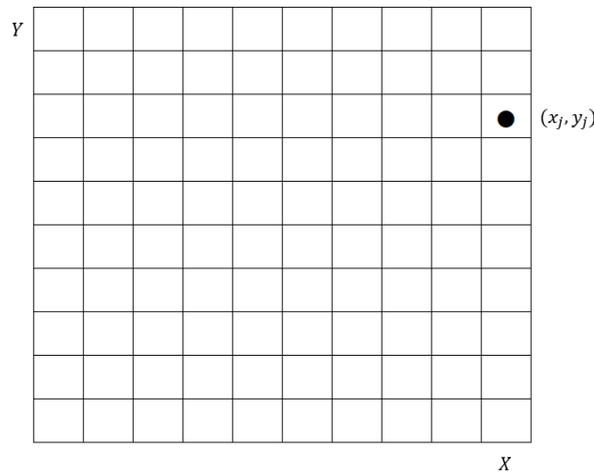
solusi baru bisa diterima dengan probabilitas tertentu berdasarkan suhu. Suhu secara bertahap dikurangi untuk mengurangi probabilitas menerima solusi yang lebih buruk, mengarahkan algoritma menuju konvergensi. Solusi terbaik yang ditemukan selama proses iterasi disimpan sebagai tata letak optimal untuk turbin dalam PLTAL.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Selat Riau dijadikan studi kasus untuk mengevaluasi efektivitas algoritma PSO dan SA dalam memecahkan problem tata letak turbin pada PLTAL. Selat Riau berada di wilayah Kabupaten Tanjung Pinang dan Pulau Batam. Karakteristik selat ini adalah sebagai berikut (dalam kaitannya dengan pembangunan PLTAL): potensial daya laut yang tinggi, kedalaman yang memadai untuk instalasi turbin, populasi yang padat dan dekat dengan kawasan industri dengan kebutuhan listrik tinggi [18].

Area PLTAL, tempat turbin akan dipasang, direpresentasikan secara diskrit. Area ini direpresentasikan ke dalam $X \times Y$ sel berukuran identik, seperti pada Gambar 1. Pendekatan ini diusulkan oleh, dengan memperhitungkan jarak minimum antara turbin. Setiap sel mewakili potensi lokasi penempatan turbin, dengan (x_j, y_j) sebagai koordinat turbin j pada PLTAL [19]. Jika sebuah turbin dipasang pada sebuah sel, turbin tersebut akan diletakkan di tengah-tengah sel tersebut.

Penelitian ini menggunakan asumsi sebagai berikut: (1) merujuk pada, arus laut datang dari sisi kiri PLTAL, dengan kecepatan konstan, dan (2) mengikuti, turbin diinstal secara perpendiculer berhadapan dengan arah datangnya arus laut.



Gambar 1. Representasi area penempatan turbin.

Kedalaman Selat Riau adalah sekitar 20 meter, dengan turbin ditempatkan pada 10 meter di bawah permukaan air laut. Nilai parameter terkait spesifikasi turbin yang dipakai pada PLTAL dan kondisi lingkungan laut bisa dilihat pada Tabel 3. Kecepatan arus laut dan tingkat kerapatan air laut pada selat Riau merujuk pada [20].

Tabel 3. Nilai parameter.

Parameter	Nilai
Panjang bilah turbin (r)	9 meter
Koefisien daya turbin (C_p)	50%
Koefisien dorong turbin (C_τ)	0.7
Efisiensi turbin (Ge)	70%
Efisiensi <i>gearbox</i> turbin (Be)	90%
Jarak minimum antara turbin (D)	900 meter
Konstanta <i>wake effect</i> (κd)	2

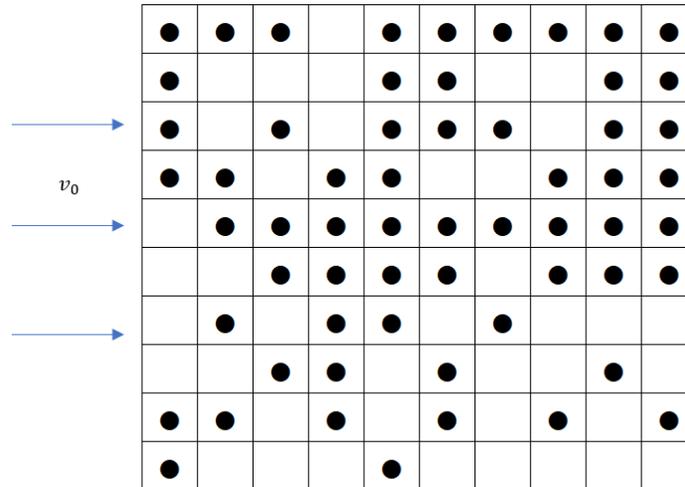
Model optimasi penyusunan tata letak turbin pada pembangkit listrik tenaga arus laut

Kecepatan arus laut (v_0)	1,39 meter per detik
Tingkat kerapatan air laut (ρ)	1025 kilogram per meter kubik.

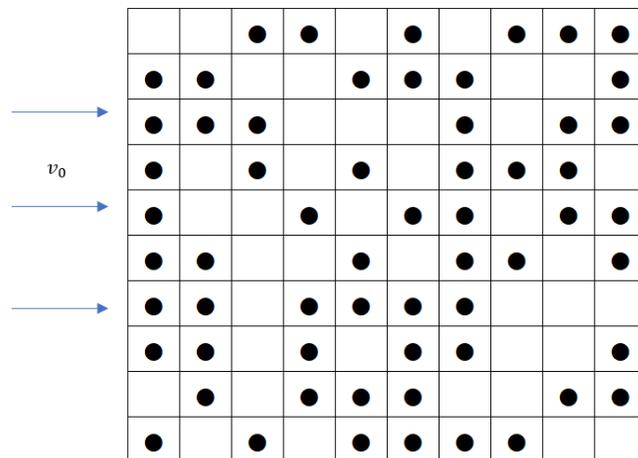
PLTAL pada Selat Riau dirancang dengan 10×10 sel, setiap sel berukuran lebar dan panjang 90 m, sehingga luas total PLTAL mencapai 810.000 m^2 . Sebanyak 60 turbin akan diinstal, dimana penelitian ini mengoptimasi susunan tata letaknya dengan mengaplikasikan algoritma PSO dan algoritma SA menurut fungsi objektif (1).

Nilai parameter yang digunakan pada algoritma SA meliputi, merujuk, jumlah iterasi maksimal sebesar 1000 iterasi, temperatur awal dan akhir berturut-turut sebesar 200 dan 0,1; *cooling rate* ditetapkan sebesar 0,85. Nilai parameter algoritma PSO, merujuk, ditetapkan sebagai berikut: c_1 dan c_2 sebesar 2, jumlah partikel sebanyak 50, jumlah iterasi maksimal sebesar 1000 iterasi dan bobot inersia ditetapkan 0,8. Kedua algoritma tersebut dijalankan sebanyak 10 kali [21]. Hasil terbaik didapatkan berdasarkan nilai fungsi objektif (1) terkecil yang didapat oleh masing-masing algoritma.

Hasil optimasi *layout* turbin dengan mengaplikasikan algoritma PSO ditampilkan pada Gambar 2. Nilai fungsi objektif susunan tata letak tersebut adalah sebesar $7,43 \cdot 10^{-6}$ dengan output energi sebesar 5,38 MW. Sementara itu, *layout* turbin yang disusun oleh algoritma SA dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai fungsi objektif susunan tata letak tersebut adalah sebesar $7,16 \cdot 10^{-6}$ dengan energi yang dihasilkan sebesar 5,58 MW.



Gambar 2. Hasil tata letak turbin oleh algoritma PSO.



Gambar 3. Hasil tata letak turbin oleh algoritma SA.

Perbandingan performa antara algoritma PSO dan algoritma SA menunjukkan bahwa nilai fungsi objektif yang dihasilkan oleh algoritma SA, yaitu $7,16 \cdot 10^{-6}$, lebih kecil daripada nilai fungsi objektif yang dihasilkan oleh algoritma PSO, yaitu $7,43 \cdot 10^{-6}$. Dalam hal ini, performa algoritma SA dalam membuat tata letak turbin pada PLTAL di Selat Riau lebih baik dibandingkan algoritma PSO. **Gambar 3** menunjukkan bahwa terdapat lebih banyak “space” antara turbin. Hal ini berdampak meminimalkan *wake effect*. *Wake effect* yang kecil akan meningkatkan jumlah output energi yang dihasilkan oleh PLTAL. Pada akhirnya, dengan output energi yang besar, fungsi objektif (1) menjadi kecil. Sementara itu, **Gambar 2** menunjukkan susunan turbin yang lebih padat. Hal ini meningkatkan *wake effect* yang berdampak pada menurunnya jumlah output energi yang dihasilkan oleh PLTAL. *Output* energi susunan tata letak turbin oleh algoritma SA sebesar 5,58 MW, lebih besar dibandingkan *output* energi hasil susunan tata letak yang dihasilkan oleh algoritma PSO, yaitu sebesar 5,38 MW.

4. SIMPULAN

Artikel ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis untuk merancang tata letak turbin di PLTAL, dengan mempertimbangkan *wake effect* sebagai bagian dari interaksi antara turbin. Untuk menyelesaikan model ini, dua algoritma metaheuristik, yaitu PSO dan SA, diterapkan. Selat Riau dijadikan studi kasus. Hasil penelitian membuktikan bahwa algoritma SA memberikan kinerja yang lebih baik daripada algoritma PSO. Nilai fungsi objektif menjadi pembandingnya, dimana nilai fungsi objektif algoritma SA lebih rendah dari nilai fungsi objektif yang dihasilkan oleh algoritma PSO. Tata letak yang dihasilkan oleh SA menawarkan jarak antara turbin yang lebih longgar, sehingga mampu mengurangi *wake effect* dan meningkatkan output energi, yang pada akhirnya menghasilkan nilai fungsi objektif yang lebih kecil.

REFERENSI

- [1] I. Kurniawan, R. Ichwani, R. Fionasari, A. Batubara, and A. Huda, “Indonesia’s Renewable Energy Outlook: What to Expect in The Future Renewable Energy of Indonesia. A Brief Review,” *Elkawnie*, vol. 8, no. 2, p. 298, 2022, doi: 10.22373/ekw.v8i2.18738.
- [2] R. N. Aprillia, R. Ramdhani, and S. Sriyono, “Analisis Aerodinamika Bodi Kendaraan Urban Single Seater menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD),” *AEEJ J. Automot. Eng. Vocat. Educ.*, vol. 4, no. 2, pp. 95–102, 2023, doi: 10.24036/aej.v4i2.211.
- [3] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, “Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050,” *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 154–162, 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [4] A. Taufiqurrahman and J. Windarta, “Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia,” *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 124–132, 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.10036.
- [5] F. Irawati, F. D. Kartikasari, and E. Tarigan, “Pengenalan Energi Terbarukan dengan Fokus Energi Matahari kepada Siswa Sekolah Dasar dan Menengah,” *Publ. Pendidik*, vol. 11, no. 2, p. 164, 2021, doi: 10.26858/publikan.v11i2.16413.
- [6] Rizki Hamdani, Muchlisinalahuddin, and Rudi Kurniawan Arief, “Analisis Tingkat Kavitas Turbin Francis PLTA Batang Agam,” *JTTM J. Terap. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 78–87, 2021, doi: 10.37373/jttm.v2i2.135.
- [7] M. F. Faali, D. Suharto, A. D. Prasetya, and A. Hamid, “Analysis of the effect of a spring constant of 980 N / m on a wave energy converter device due to heaving,” vol. 5, no. 2, pp. 208–215, 2024, doi: 10.37373/jttm.v5i2.1104.
- [8] R. D. Ray, G. D. Egbert, and S. Y. Erofeeva, “A brief overview of tides in the Indonesian seas,” *Oceanography*, vol. 18, no. SPL.ISS. 4, pp. 74–79, 2005, doi: 10.5670/oceanog.2005.07.
- [9] M. B. R. Topper, S. S. Olson, and J. D. Roberts, “Techno-economic modelling of tidal energy converter arrays in the tacoma narrows,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 9, 2020, doi: 10.3390/JMSE8090646.

- [10] S. W. Kareem, K. W. Hama Ali, S. Askar, F. S. Xoshaba, and R. Hawezi, "Metaheuristic algorithms in optimization and its application: a review," *JAREE (Journal Adv. Res. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 7–12, 2022, doi: 10.12962/jaree.v6i1.216.
- [11] V. F. Yu, P. T. Anh, and Y. W. Chen, "The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows, Partial Recharges, and Parcel Lockers," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 16, 2023, doi: 10.3390/app13169190.
- [12] M. Boukedroun, D. Duvivier, A. Ait-El-Cadi, V. Poirriez, and M. Abbas, "A hybrid genetic algorithm for stochastic job-shop scheduling problems," *RAIRO - Oper. Res.*, vol. 57, no. 4, pp. 1617–1645, 2023, doi: 10.1051/ro/2023067.
- [13] A. P. Utami and B. P. Ichtiarto, "Sweep Algorithm in Cvrp To Optimize Delivery Automotive Spare Part," *J. PASTI*, vol. 15, no. 3, p. 245, 2021, doi: 10.22441/pasti.2021.v15i3.002.
- [14] H. Dang Quoc, L. Nguyen The, and C. Nguyen Doan, "An Effective Hybrid Algorithm Based on Particle Swarm Optimization with Migration Method for Solving the Multiskill Resource-Constrained Project Scheduling Problem," *Appl. Comput. Intell. Soft Comput.*, vol. 2022, no. i, 2022, doi: 10.1155/2022/6230145.
- [15] Y. Hu, C. Liu, M. Zhang, Y. Jia, and Y. Xu, "A Novel Simulated Annealing-Based Hyper-Heuristic Algorithm for Stochastic Parallel Disassembly Line Balancing in Smart Remanufacturing," *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.3390/s23031652.
- [16] R. Alwajih *et al.*, "Hybrid binary whale with harris hawks for feature selection," *Neural Comput. Appl.*, vol. 34, no. 21, pp. 19377–19395, 2022, doi: 10.1007/s00521-022-07522-9.
- [17] A. Slowik, "Particle Swarm Optimization," *Ind. Electron. Handb. - Five Vol. Set*, no. May 2011, 2011, doi: 10.1007/978-3-319-46173-1_2.
- [18] M. Nurhayati and D. D. Wijaya, "Ocean Tides Model in Eastern Indonesian Sea Using Data Assimilation from Altimetry, Tide Gauge, and Hydrodynamic Model," *J. Inotera*, vol. 9, no. 1, pp. 239–249, 2024, doi: 10.31572/inotera.vol9.iss1.2024.id346.
- [19] F. Manzano-Agugliaro, M. Sánchez-Calero, A. Alcayde, C. San-Antonio-gómez, A. J. Perea-Moreno, and E. Salmeron-Manzano, "Wind turbines offshore foundations and connections to grid," *Inventions*, vol. 5, no. 1, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/inventions5010008.
- [20] A. M. A. Arafat and Y. Arafat, "Assessment of Tidal Energy Resources in Bali Strait," *Ris. Sains dan Teknol. Kelaut.*, vol. 6, no. 2, pp. 125–133, 2023, doi: 10.62012/sensistek.v6i2.31737.
- [21] J. L. K. Ming, M. S. Anuar, M. S. How, S. B. M. Noor, Z. Abdullah, and F. S. Taip, "Development of an artificial neural network utilizing particle swarm optimization for modeling the spray drying of coconut milk," *Foods*, vol. 10, no. 11, 2021, doi: 10.3390/foods10112708.