



Perancangan Algoritma Optimasi Menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) Untuk Model *Wind Turbine Farm*

Jawwad Sulthon Habiby^{1*)}, Aris Triwiyatno²⁾, Trias Andromeda²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Jl. Budi Utomo No 10 Ponorogo 63471

²⁾Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. H. Soedarto, Tembalang, Kota Semarang 50275

e-mail: jawwad@umpo.ac.id

ABSTRAK

Di Indonesia dengan tuntutan energi listrik yang terus meningkat, produksi bahan bakar yang berupa batu bara dan minyak bumi mungkin akan mencapai batasnya dalam beberapa dasawarsa, disertai peningkatan sejumlah kasus cuaca ekstrem dan pemanasan global. Oleh karena itu, perlu dicari semacam solusi terhadap pemenuhan listrik dengan pemanfaatan energi alternative terbarukan yang cukup berpotensi di Indonesia. Salah satu energi alternatif terbarukan yang saat ini adalah penggunaan teknologi turbin angin dimana energi angin yang diperoleh bebas dari alam, akan diubah sedemikian rupa hingga menjadi energi listrik. Dalam tesis ini dipelajari tentang efek dari penggunaan turbin angin dengan jarak hub yang berbeda di sebuah wilayah produksi pembangkitan listrik tenaga angin, untuk mencari jarak dan jumlah turbin terbaik yang digunakan. Disajikan sebuah formulasi matematis dalam membangun sistem multi-turbin. Mengingat turbin angin dengan jarak dan jumlah turbin yang bervariasi maka model tersebut diselesaikan menggunakan metode Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO). Dengan hasil konfigurasi turbin yang terbaik akan diperoleh biaya yang minimum dan pembangkitan daya yang maksimum.

Kata Kunci : Turbin Angin, Ladang Turbin Angin, Algoritma PSO, Wake Model.

ABSTRACT

In Indonesia, where the demand for electrical energy continues to increase, the production of fuels in the form of coal and oil may reach its limit within a few decades. Along with an increase in the number of cases of extreme weather and global warming, it is necessary to find some kind of solution to the fulfillment of electricity by utilizing renewable alternative energy which has potential in Indonesia. One of them it to use the wind energy, which then converted into electrical one. In this paper, we study the effect of using wind turbines with different hub distances in a wind power production area, to find the best turbine distance and number to use. A mathematical formulation for building a multi-turbine system is presented. Considering the wind turbines with varying distances and number of turbines, the model is solved using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. With the best turbine configuration results, the minimum cost and maximum power generation will be obtained. Keywords: maximum five

Keywords : Wind Turbine, Wind Turbine Farm, Algoritma PSO, Wake Model.

1. Pendahuluan

Di Indonesia dengan tuntutan energi listrik yang terus meningkat, produksi bahan bakar yang berupa batu bara dan minyak bumi mungkin akan mencapai batasnya dalam beberapa dasawarsa, disertai peningkatan sejumlah kasus cuaca ekstrem karena pemanasan global, penggunaan turbin angin sebagai sumber energi listrik menjadi isu yang lebih hangat[1]. Sumber daya tak terbarukan seperti batu

bara dan gas alam dijadikan sumber energi utama di berbagai belahan bumi. Ironinya, sumber-sumber energi tersebut berbahaya bagi lingkungan. Hal ini menjadikan angin sebagai sumber energi alternatif potensial karena ia dapat diperbaharui dan tidak menimbulkan polusi[2].

Angin diciptakan oleh variasi suhu dan tekanan udara di bumi. Dengan manifestasi energi matahari, sirkulasi udara bergerak naik dan tenggelam di udara yang lebih

dingin. Diperkirakan sekitar dua persen energi matahari yang diterima bumi diubah menjadi energi kinetik angin[3].konversi energi dari angin ke listrik dengan kapasitas kecil dalam penelitian [4] telah dipelajari dan dapat dibangun pada area yang sempit, namun dalam kapasitas besar terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya kondisi angin, luas area, faktor biaya, jarak dan jumlah turbin yang akan di gunakan[5]–[7].

Beberapa tahun belakangan ini, pembangkitan listrik tenaga angin telah banyak dikembangkan di beberapa negara maju[3], [8]–[10]. Pada masa awal perkembangannya, teknologi energi angin lebih banyak dimanfaatkan oleh manusia dalam bidang pertanian dan manufaktur, kini dengan teknologi dan bahan yang baru, manusia membuat turbin angin untuk membangkitkan energi listrik yang sangat bermanfaat, baik untuk penerangan, sumber panas atau tenaga pembangkit untuk alat-alat industri dan juga peralatan rumah tangga.

Di Indonesia juga telah dikembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)/Angin. Salah satu diantaranya yaitu PLTB Sidrap yang merupakan pembangkit tenaga angin terbesar di Indonesia. Dengan kapasitas 75 MW, pembangkit ini terdiri dari 30 turbin angin yang masing-masing berkapasitas 2,5 MW[11]. Model turbin yang digunakan dari *Gamesa Iolice Corporation* (Spanyol) [12] pada menara baja setinggi 80 meter dengan panjang baling-baling 57 meter.

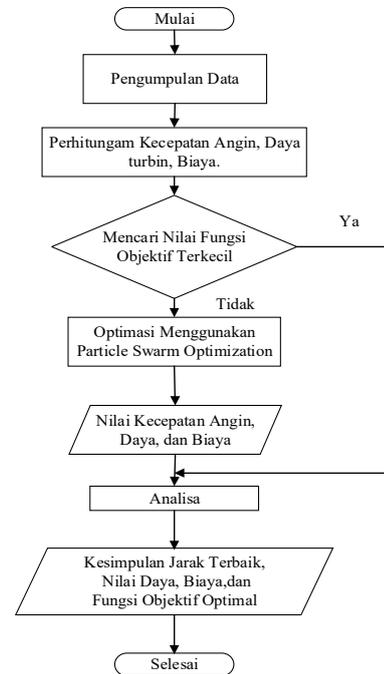
Dalam pengoptimalan kapasitas daya yang dapat dihasilkan dalam sebuah sistem pembangkitan listrik tenaga angin, terdapat beberapa masalah misalnya, optimasi tata letak turbin[13]–[18]. Masalah ini dapat diselesaikan dengan beberapa cara dan salah satunya menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)[15]. PSO adalah sebuah solusi untuk menyelesaikan berbagai persoalan berbasis populasi. Dalam PSO populasi disebut dengan *swarm*, dan individu disebut dengan partikel. Tiap partikel berpindah dengan kecepatan yang diadaptasi dari daerah pencarian dan menyimpannya sebagai posisi terbaik yang pernah dicapai[19]–[22].

Penerapan algoritma PSO yang diusulkan dalam tesis ini adalah model PSO yang diaplikasikan pada sistem *Wind Turbine Farm* untuk mengoptimalkan tata letak turbin, dengan kriteria *biaya* yang minimal dan daya yang maksimal. Salah satu penelitian [15] membuktikan bahwa metode PSO dapat memberi kita pendekatan baru terhadap alat yang sudah kita miliki di bidang optimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis PSO dapat dimanfaatkan dalam optimalisasi *wind park*, di samping berbagai aplikasi di bidang control dan *Power engineering* lainnya.

2. Metode

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai fungsi pengurangan kecepatan angin, fungsi daya, fungsi biaya, dan fungsi objektif menggunakan metode *particle swarm optimization* pada *Wind Turbine Farm* guna mendapatkan nilai fungsi objektif yang optimal. Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

2.2. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari data angin Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) berupa data angin yang memiliki potensi di wilayah Indonesia.

Kemudian spesifikasi turbin yang digunakan dalam perhitungan penelitian ini juga mengacu pada model turbin yang telah digunakan di Indonesia yaitu jenis turbin Gamesa kelas IIA dengan kapasitas daya.

2.3. Perancangan Sistem

Dalam pembuatan program simulasi optimasi menggunakan algoritma *particle swarm optimization* (PSO) untuk model *wind turbine farm*, perancangan sistem merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan hasil output yang dihasilkan dari program simulasi ini. Secara umum fungsi tujuan dari program simulasi ini adalah pengurangan kecepatan angin, total daya yang dibangkitkan dan total biaya yang dibutuhkan serta fungsi objektif optimal yang dapat dihasilkan. Batasan fungsi dari optimasi model *wind turbine farm* ini dinyatakan sebagai berikut :

1. Luas Area Penangkapan Angin

$$200 \text{ m} < D < 2000 \text{ m}$$

Luas area penangkapan angin pada penelitian ini memiliki jarak antara 200 m hingga 2000 m. Jarak minimal 200 m memiliki asumsi agar tidak terjadi benturan antar baling-baling turbin dan jarak maksimal 2000 m karena batasan lahan.

2. Kecepatan Angin

$$U \leq 3 \text{ m/s}$$

Kecepatan angin yang dibutuhkan untuk dapat menggerakkan turbin angin adalah 3 m/s.

2.4. Pemodelan Fungsi Kecepatan Angin

Pemodelan fungsi Kecepatan Angin yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

$$u_i = u_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{u}{u_0} \right)^2} \right] \dots (1)$$

Dimana :

u_i = kecepatan angin hilir / downstream / downwind

u_0 = kecepatan angin hulu / upwind

N = Jumlah turbin

2.5. Pemodelan Persamaan Fungsi Daya

Fungsi daya [26] digunakan untuk mencari besar daya yang terbangkitkan dari seluruh jumlah turbin yang digunakan pada setiap solusi tata letak turbin. Parameter dari turbin angin yang digunakan antara lain *blade* turbin, kecepatan, dan daya total. Secara teori nilai maksimum C_p adalah 0,59 ($\cong 0,6$). Pada proses optimasi ini, nilai tersebut yang akan dipergunakan sebagai

$$P = \frac{1}{2} A v^3 C_p = \frac{1}{2} A v^3 \times 0.6 = 0.3 A \dots (2)$$

2.6. Pemodelan Persamaan Fungsi Biaya

Pemodelan persamaan fungsi biaya yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

$$\text{Cost} = N_t \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0,00174 N_t^2} \right] \dots (3)$$

Dimana :

Cost = Total biaya investasi

N_t = Jumlah turbin angin yang dibeli.

2.7. Pemodelan Persamaan Fungsi Objektif

Pemodelan persamaan fungsi objektif yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

$$FO = \frac{1}{\text{Total daya}} k_1 + \frac{\text{Total biaya}}{\text{Total daya}} k_2 \dots (4)$$

Dimana :

FO = Fungsi Objektif

K_1, K_2 = Penyetara nilai

2.8. Perancangan Metode PSO

Metode Optimasi yang digunakan untuk model *wind turbine farm* dalam tesis ini menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, proses algoritmanya terinspirasi oleh tingkah laku sosial pada kawanan burung yang terbang bersama-sama. Perilaku sosial ini terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Setiap individu atau particle berperilaku secara terdistribusi dengan menggunakan kecerdasan (*intelligence*) sendiri dan juga dipengaruhi kelompok kolektifnya. Dengan demikian, jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat (*optimal*) menuju sumber makanan, maka sisa anggota kelompok yang lainnya juga akan mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka didalam kelompok tersebut tidak saling berdekatan.

1. Mengasumsikan bahwa ukuran kelompok atau kawanan (jumlah partikel) adalah N .
2. Membangkitkan populasi awal X dengan rentang $X(B)$ dan $X(A)$ secara ran-dom sehingga didapat X_1, X_2, \dots, X_N
3. Menghitung kecepatan dari semua partikel. Awalnya semua kecepatan dari partikel diasumsikan sama dengan nol. Set iterasi $i=1$.
4. Pada iterasi ke- i , temukan 2 parameter penting untuk setiap partikel j yaitu:
 - a. Nilai terbaik sejauh ini dari $X_j(i)$ (koordinat partikel j pada iterasi i) dan nyatakan sebagai $P_{best,j}$, dengan nilai fungsi obyektif paling rendah (kasus minimasi), $f[X_j(i)]$, yang ditemui sebuah partikel j pada semua iterasi sebelumnya. Nilai terbaik untuk semua partikel $X_j(i)$ yang ditemukan sampai iterasi ke- i , G_{best} , dengan nilai fungsi tujuan paling kecil/minimum diantara semua partikel untuk semua iterasi sebelumnya, $f[X_j(i)]$.
 - b. Menghitung kecepatan partikel j pada iterasi ke i dengan rumus sebagai berikut

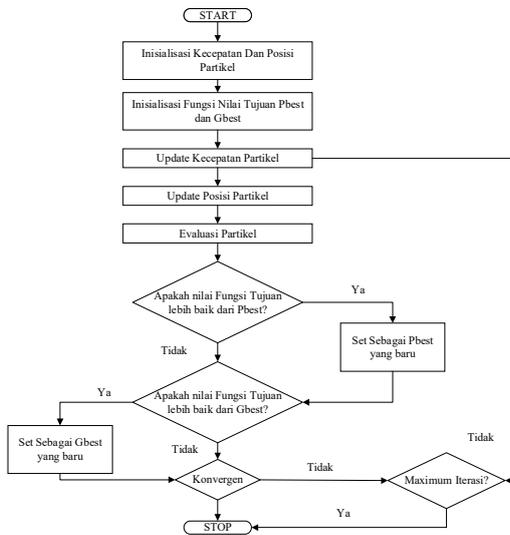
$$v_j(i) = v_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - x_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best} - x_j(i-1)]$$

$$j=1, 2, \dots, N$$
 - c. Menghitung posisi atau koordinat partikel j pada iterasi ke- i dengan cara

$$X_j(i) = X_j(i-1) + v_j(i); j=1, 2, \dots, N$$
 - d. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan untuk setiap partikel dan nyatakan sebagai

$$f[X_1(i)], f[X_2(i)], \dots, f[X_N(i)]$$
 - e. Cek apakah solusi yang sekarang sudah konvergen. Jika posisi semua partikel menuju ke satu nilai yang sama, maka ini disebut konvergen. Jika belum konvergen maka langkah 4 diulang dengan memperbarui iterasi $i = i + 1$, dengan cara menghitung nilai baru dari $P_{best,j}$ dan G_{best} . Proses iterasi ini dilanjutkan sampai semua partikel menuju ke satu titik solusi yang sama. Biasanya akan

ditentukan dengan kriteria penghentian (stopping criteria), misalnya jumlah selisih solusi sekarang dengan solusi sebelumnya sudah sangat kecil.



Gambar 2. Diagram Alir Optimasi Algoritma PSO

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Pengurangan Kecepatan Angin

3.1.1 Analisis Pertama Pengurangan Kecepatan Angin

Data analisis pengurangan kecepatan angin pada penelitian ini diambil dari data kecepatan angin yang berada di Indonesia pada wilayah Jeneponto Sulawesi Selatan. Data diperoleh dari data LAPAN dengan kecepatan angin rata-rata adalah 7m/s.

Tabel 1. Data penurunan kecepatan angin dan daya turbin dengan jarak 200 m

Nomor Turbin	V in (m/s)	Daya (Watt)	V out (m/s)
1	7	1.312.214	4,6
2	4,6	377.322	1,5
3	1,5	3.975	0,5
4	0,5	518	0,2
5	0,2	19	0,1
6	0,1	1	0,0
7	0,0	0	0,0
8	0,0	0	0,0
9	0,0	0	0,0
10	0,0	0	0,0

Dengan jarak antar turbin 200 m pada Tabel 1 menunjukkan bahwa dengan kecepatan angin awal adalah 7 m/s maka mengalami penurunan kecepatan angin mulai dari turbin yang pertama yaitu 4,6 m/s, dan selanjutnya mengalami penurunan pada turbin kedua hingga 1,5m/s dan seterusnya. Kemudian daya yang dihasilkan pada turbin pertama 1.312.214 Watt juga mengalami penurunan daya 377.322 Watt pada turbin kedua selanjutnya 13.975

Watt pada turbin ketiga. Hingga total daya pada keseluruhan turbin yang dapat dihasilkan adalah 1.704.049 Watt.

3.1.2 Analisis Kedua Pengurangan Kecepatan Angin

Data analisis kedua pengurangan kecepatan angin dilakukan pada jarak 400m.

Tabel 2. Data penurunan kecepatan angin dan daya turbin dengan jarak 400 m

Nomor Turbin	V in (m/s)	Daya (Watt)	V out (m/s)
1	7	1.312.214	5,6
2	5,6	657.851	1,9
3	1,9	24.365	0,6
4	0,6	902	0,2
5	0,2	33	0,1
6	0,1	1	0,0
7	0,0	0	0,0
8	0,0	0	0,0
9	0,0	0	0,0
10	0,0	0	0,0

Dengan jarak antar turbin 400 m terlihat pada Tabel 2 bahwa kecepatan angin awal adalah 7 m/s dan mengalami penurunan kecepatan angin mulai dari turbin pertama yaitu 5,6 m/s, dan selanjutnya mengalami penurunan pada turbin kedua hingga 1,9 m/s dan seterusnya. Kemudian daya yang dihasilkan pada turbin pertama 1.312.214 Watt juga mengalami penurunan daya 657.851 Watt pada turbin kedua selanjutnya 24.365 Watt pada turbin ketiga. Hingga total daya pada keseluruhan turbin yang dapat dihasilkan adalah 1.995.367 Watt.

3.1.3 Analisis Ketiga Pengurangan Kecepatan Angin

Data analisis ketiga pengurangan kecepatan angin dilakukan pada jarak 800m. Dengan jarak antar turbin 800 m terlihat pada

Tabel 3 dengan kecepatan angin awal adalah 7 m/s dan mengalami penurunan kecepatan angin mulai dari turbin pertama yaitu 6,8 m/s, dan selanjutnya mengalami penurunan pada turbin kedua hingga 2,3 m/s dan seterusnya. Kemudian daya yang dihasilkan pada turbin pertama 1.312.214 Watt juga mengalami penurunan daya 1.229.256 Watt pada turbin kedua selanjutnya 45.528 Watt pada turbin ketiga. Hingga total daya pada keseluruhan turbin yang dapat dihasilkan adalah 2.588.749 Watt.

Tabel 3. Data penurunan kecepatan angin dan daya turbin dengan jarak 800 m

Nomor Turbin	V in (m/s)	Daya (Watt)	V out (m/s)
1	7	1.312.214	6,8
2	6,8	1.229.256	2,3
3	2,3	45.528	0,8
4	0,8	1.686	0,3
5	0,3	62	0,1
6	0,1	2	0,0
7	0,0	0	0,0
8	0,0	0	0,0
9	0,0	0	0,0
10	0,0	0	0,0

3.1.4 Analisis Keempat Pengurangan Kecepatan Angin

Data analisis keempat pengurangan kecepatan angin dilakukan pada jarak 1000m.

Tabel 4. Data penurunan kecepatan angin dan daya turbin dengan jarak 1000 m

Nomor Turbin	V in (m/s)	Daya (Watt)	V out (m/s)
1	7	1.312.214	6,9
2	6,9	1.254.701	2,3
3	2,3	46.470	0,8
4	0,8	1.721	0,3
5	0,3	64	0,1
6	0,1	2	0,0
7	0,0	0	0,0
8	0,0	0	0,0
9	0,0	0	0,0
10	0,0	0	0,0

Dengan jarak antar turbin 1000 m pada Tabel 4 menunjukkan bahwa dengan kecepatan angin awal adalah 7 m/s maka mengalami penurunan kecepatan angin mulai dari turbin yang pertama yaitu 6,9 m/s, dan selanjutnya mengalami penurunan pada turbin kedua hingga 2,3 m/s dan seterusnya. Kemudian daya yang dihasilkan pada turbin pertama 1.312.214 Watt juga mengalami penurunan daya 1.254.701 Watt pada turbin kedua selanjutnya 46.470 Watt pada turbin ketiga. Hingga total daya pada keseluruhan turbin yang dapat dihasilkan 2.615.173 Watt.

3.1.5 Analisis Kelima pengurangan Kecepatan Angin

Data analisis kelima pengurangan kecepatan angin dilakukan pada jarak 2000m. Dengan jarak antar turbin 2000 m pada Tabel 5 menunjukkan bahwa dengan kecepatan angin awal adalah 7 m/s maka mengalami penurunan kecepatan angin mulai dari turbin yang pertama yaitu 7,0 m/s, dan selanjutnya mengalami penurunan pada turbin kedua hingga 2,4 m/s dan seterusnya. Kemudian daya yang

dihasilkan pada turbin pertama 1.312.214 Watt juga mengalami penurunan daya 1.295.248 Watt pada turbin kedua selanjutnya 47.972 Watt pada turbin ketiga. Hingga total daya pada keseluruhan turbin yang dapat dihasilkan 2.657.279 Watt.

Tabel 5. Data penurunan kecepatan angin dan daya turbin dengan jarak 2000 m

Nomor Turbin	V in (m/s)	Daya (Watt)	V out (m/s)
1	7	1.312.214	6,9
2	6,9	1.295.248	2,4
3	2,4	47.972	0,9
4	0,9	1.777	0,4
5	0,4	66	0,2
6	0,2	2	0,0
7	0,0	0	0,0
8	0,0	0	0,0
9	0,0	0	0,0
10	0,0	0	0,0

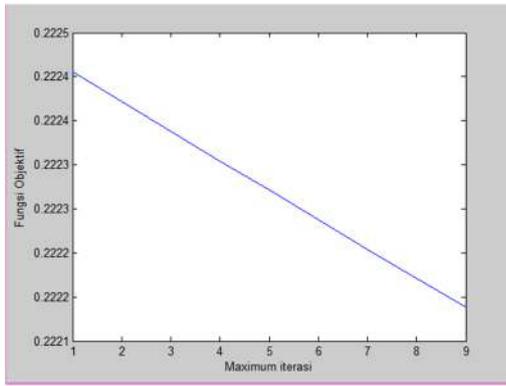
3.2 Hasil Pengujian Algoritma PSO

Pengujian ini diawali dengan menentukan nilai dari parameter PSO, parameter fungsi tujuan, dan syarat sistem. setting awal nilai-nilai yang dibutuhkan pada parameter tersebut sudah ditentukan.

Tabel 6. Parameter Optimasi

Jenis Parameter	Parameter	Nilai
Parameter PSO	N	10
	Maxit	10
	X	*1
	V	*10
	Upbnd	2000
	lwbnd	171
Parameter Perhitungan Turbin	U ₀	7m/s

Setelah parameter-parameter dimasukkan dalam sistem, saat proses optimasi berlangsung akan muncul grafik nilai fungsi tujuan. berdasarkan gambar 4. dapat dilihat bahwa sistem mencapai konvergen sebelum iterasi maksimum (max it = 10) besarnya jumlah iterasi yang diperlukan dalam pengujian dapat bervariasi dikarenakan sistem optimasi menggunakan PSO yang merupakan sebagai pembangkit jumlah bilangan random. Nilai N yang digunakan 10 karena pada pengujian yang dilakukan adalah selama 10 kali, sehingga pengacakan akan berlangsung. Nilai *upbnd* (*Upper Bond*) dan *lwbnd* (*lower bond*) merupakan batas minimal dan maksimal dari jarak antar turbin.



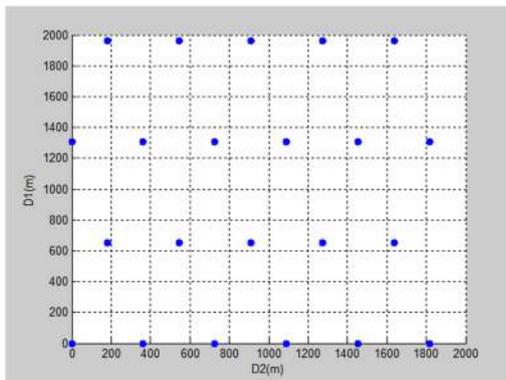
Gambar 3. Grafik Fungsi Tujuan pengujian ke-1 (fungsi objektif terhadap iterasi)

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 3. dapat dilihat bahwa jarak optimal saat kecepatan angin awal 7 m/s. Dengan jumlah N 10, jumlah maxit 10, dan V dikalikan dengan 10. Maka diperoleh hasil fungsi tujuan optimal adalah 0,2222 dengan jarak antar turbin kebelakang (D1) = 1307 m dan kesamping (D2) = 364 m seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Optimasi Pengujian ke-1

Jarak D1	1307
Jarak D2	364
Daya	13.481.259
Biaya	10.304
Fungsi Objektif	0.2222

Dengan hasil yang didapatkan pada Tabel 7. Maka posisi turbin pada pengujian ke-1 menunjukkan hasil jarak antar turbin kebelakang (D1) = 1307 m dan jarak kesamping (D2) = 364 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar Posisi Turbin Pengujian ke-1

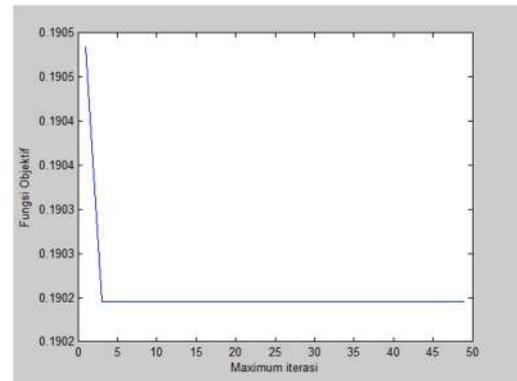
Selanjutnya pengujian ke-2 dilakukan perubahan parameter pada jumlah iterasi yang dibangkitkan. Jumlah iterasi pada pengujian sebelumnya menggunakan 10 iterasi dan pengujian kali ini menggunakan 50 iterasi yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Dengan nilai parameter yang sama pengujian dilakukan beberapa kali. Hasil pengujian ke-2, dapat ditunjukkan pada tabel 9. Dapat dilihat bahwa jarak optimal

saat kecepatan angin awal 7m/s dikalikan dengan 10. Hasil pengujian selanjutnya ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 8. Parameter Optimasi

Jenis Parameter	Parameter	Nilai
Parameter PSO	N	10
	Maxit	50
	X	*1
	V	*10
	Upbnd	2000
	lwbnd	171
Parameter Perhitungan Turbin	U_0	7m/s

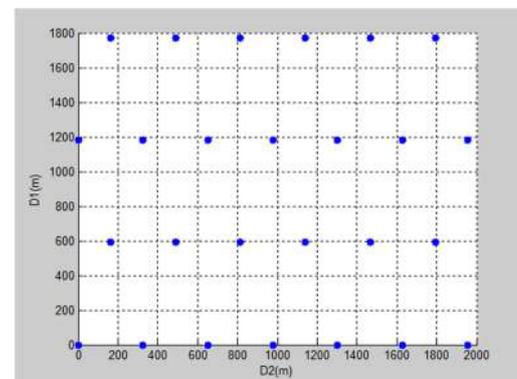


Gambar 5. Grafik Fungsi Tujuan pengujian ke-2 (fungsi objektif terhadap iterasi)

Hasil fungsi tujuan pada pengujian ke-2 menunjukkan fungsi tujuan optimal 0,1902 dengan jarak antar turbin kebelakang (D1) = 1179 m dan kesamping (D2) = 326 m seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Optimasi Pengujian ke-2

Jarak D1	1179
Jarak D2	326
Daya	15.744.830
Biaya	10.657
Fungsi Objektif	0.1902



Gambar 6. Gambar Posisi Turbin Pengujian ke-2

Dengan hasil yang didapatkan pada Tabel 9. posisi turbin pada pengujian ke-2 menunjukkan hasil jarak antar turbin kebelakang (D1) = 1179 m dan jarak kesamping (D2) = 326 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian, Implementasi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dapat digunakan sebagai solusi dari permasalahan tata letak *wind turbine farm* di wilayah penangkapan angin terutama di Indonesia

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang digunakan untuk Optimasi Daya dan Biaya wind turbine farm menunjukkan bahwa 26 turbin angin akan menghasilkan daya optimum sebesar 10.933.958 Watt, dengan total biaya yang diperoleh sebesar 1.995 (dalam satuan mata uang) untuk luas area 4 km².

Parameter yang dipilih dalam algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) memiliki pengaruh terhadap nilai yang dicapai dalam proses optimasi.

Daftar Pustaka

- [1] J. K. Haugland, "Optimization Models for Turbine Location in Wind Farms," 2012.
- [2] J. M. Jonkman, "Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST _ AD Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of," no. December, 2003.
- [3] R. W. Righter, *Wind energy in America : a history*. University of Oklahoma Press, 2008.
- [4] A. Tummala, R. Kishore, D. Kumar, V. Indraja, and V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1351–1371, 2016.
- [5] S. W. Funke, S. C. Kramer, and M. D. Piggott, "Design optimisation and resource assessment for tidal-stream renewable energy farms using a new continuous turbine approach," *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 1046–1061, 2016.
- [6] W. Zhong, "Optimization of Wind Farm Layout : A Refinement Method by Random Search Optimization of Wind Farm Layout : A Refinement Method by Random Search," 2013.

Halaman ini sengaja dikosongkan