

# PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB) 10 MW DI PULAU SUMBA, NTT

## DESIGN OF 10 MW WIND FARM IN SUMBA ISLAND, EAST NUSA TENGGARA

Harry Setyo Wibowo<sup>\*1</sup>, Aditya Muhammad Nur<sup>2</sup>, Mukhlis Ali<sup>3</sup> dan Dimas Alfredo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Balai Besar Bahan dan Barang Teknik

<sup>2</sup>Institut Teknologi Bandung

<sup>3</sup>Universitas Nusa Putra

Diterima: 5 Mei 2020

Direvisi: 6 Juni 2020

Disetujui: 19 Juni 2020

### ABSTRAK

Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Indonesia Timur terutama di provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) yang masih mempunyai rasio elektrifikasi rendah (58,64%) dan masih mengandalkan PLTD sebagai pembangkit listrik utama. Salah satu upaya untuk mencukupi kebutuhan listrik di NTT adalah melalui pengembangan PLTB. Salah satu pulau yang mempunyai potensi energi angin paling baik di NTT adalah Pulau Sumba. Berdasarkan pertimbangan potensi energi angin, topografi lokasi, dan akses transportasi, lokasi yang paling tepat untuk perancangan PLTB di Pulau Sumba adalah di Distrik Mondu. Berdasarkan kebutuhan listrik di Pulau Sumba sebesar 10 MW, maka perancangan PLTB yang dilakukan dengan konsep ladang angin (*wind farm*) menghasilkan rancangan PLTB dengan 105 buah turbin angin dengan tiga baling-baling yang masing-masing berdaya 100 kW. Total daya listrik yang dihasilkan oleh PLTB yang dirancang adalah 10,24 MW setelah memperhitungkan adanya *wake effect* akibat peletakan turbin angin.

**Kata kunci:** perancangan, PLTB, pulau Sumba, ladang angin.

### ABSTRACT

*Wind energy is a renewable energy sources which has big potency to develop in Eastern Indonesia especially in East Nusa Tenggara that has low electrification ratio (58.64%) and mostly depend on Diesel Powered Electric Generator as main electric power generation. One effort to meet electricity needs in NTT is through the development of Wind Powered Electric Generator. One of the islands that have the best wind energy potential in NTT is Sumba Island. Based on consideration of the potential of wind energy, location topography, and transportation access, the most appropriate location for the design of Wind Powered Electric Generator in Sumba Island is the Mondu District. Based on the electricity needs in the island of Sumba of 10 MW, the design of the Wind Powered Electric Generator which is carried out with the concept of a wind farm produces its design with 105 wind turbines with three propellers, each with a power of 100 kW. The total electrical power generated by the PLTB which was designed was 10.24 MW after taking the wake effect into consideration due to the laying of the wind turbine.*

**Keywords:** design, wind powered, Sumba island, wind farm.

### PENDAHULUAN

Nusa Tenggara Timur (NTT) merupakan salah satu provinsi di Indonesia Timur yang saat ini menjadi salah satu tujuan wisata yang sedang berkembang pesat, dengan didukung luas wilayah yang mencapai 47.931,54 km<sup>2</sup>, 1.192 pulau, dan 5.120.061 penduduk [1]. Oleh karena itu

kebutuhan listrik di daerah ini tentu menunjukkan peningkatan yang signifikan.

Namun rasio elektrifikasi di NTT hanya mencapai 58,64%. Menurut catatan hanya sekitar 649.926 rumah tangga di NTT yang sudah menikmati listrik. Sampai saat ini kebutuhan listrik masyarakat setempat yang disuplai oleh PLN, mayoritas berasal dari PLTD yaitu 651,79

\*Corresponding author :

Email: [harrysetyo@kemenperin.go.id](mailto:harrysetyo@kemenperin.go.id)

DOI: <http://dx.doi.org/10.37209/jtbbt.v10i1.170>

MWh dari total produksi listrik sebesar 816,64 MWh [2]. Kondisi ini jelas tidak menguntungkan karena biaya produksi listrik menjadi mahal dan tidak ramah lingkungan akibat ketergantungan yang sangat tinggi terhadap ketersediaan bahan bakar fosil. Oleh karena itu perlu adanya pengembangan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan yang sesuai dengan potensi di daerah setempat.

NTT merupakan salah satu tempat dengan potensi energi angin terbesar di Indonesia. Data dari Wind Atlas menunjukkan bahwa Pulau Sumba di NTT mempunyai potensi energi angin terbesar dibanding pulau yang lain. Rata-rata kecepatan angin di pulau tersebut mencapai 5,5 m/s, cukup memadai untuk digunakan sebagai sumber energi listrik [3]. Sehingga Pulau Sumba menjadi kandidat yang ideal untuk dipilih sebagai tempat yang dikaji lebih lanjut dalam studi kelayakan pengembangan PLTB pada penelitian ini. Kajian ini mencakup rancangan ladang angin dan potensi daya yang dapat dihasilkannya. Pemilihan lokasi ladang angin juga disajikan dalam makalah ini.

### PLTB

PLTB adalah pembangkit listrik tenaga bayu (angin) yang menggunakan turbin angin sebagai pembangkit listriknya. Turbin angin terdiri dari baling-baling yang berputar untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Turbin angin umumnya tidak dipasang dalam kondisi tunggal tapi dalam suatu rangkaian dengan banyak turbin pada lokasi yang sama yang disebut ladang angin (*wind farm*). Konsep ladang angin ini banyak digunakan untuk PLTB karena secara biaya efektif terutama di daerah yang mempunyai rata-rata kecepatan angin yang tinggi (di atas 4 m/s) [4] dan atau tingkat biaya pokok produksi listrik yang besar (di atas US\$ 7 sen per kWh) [2].

Konsep ladang angin dapat menurunkan biaya energi secara efektif karena jumlah turbin angin yang banyak dapat menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar dengan biaya perawatan yang relatif kecil dan tanpa biaya bahan bakar. Walaupun biaya modal untuk pembangunan PLTB lebih mahal dibanding pembangkit berbasis gas alam atau panas bumi, tapi dalam jangka panjang biaya daur hidup PLTB jauh lebih kecil [5].

### Perhitungan Turbin Angin

Untuk mendapatkan dimensi turbin angin yang sesuai, diperlukan perhitungan daya luaran yang diinginkan, yaitu [6]:

$$A = \frac{P_o}{\frac{1}{2} \times \eta \times \rho \times v^3}$$

dimana:  $A$  : luas bidang putar turbin ( $m^2$ )

$P_o$  : daya luaran (W)

$\eta$  : efisiensi turbin angin

$\rho$  : massa jenis udara =  $1,225 kg/m^3$

$v$  : kecepatan angin (m/s)

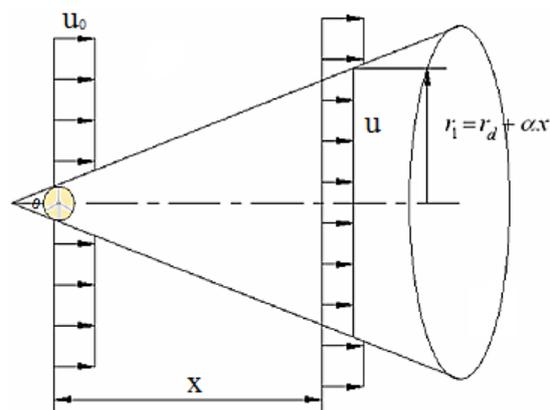
### Ladang Angin

Ladang angin adalah sekumpulan turbin angin yang ditempatkan pada satu lokasi yang sama untuk menghasilkan energi listrik dalam jumlah besar. Faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh ladang angin adalah: ukuran turbin angin, jarak antar turbin, tinggi turbin, dan bentang permukaan tempat turbin ditempatkan [7].

Perancangan PLTB dengan konsep ladang angin dipengaruhi oleh posisi peletakan turbin yang satu dengan yang lain. Oleh karena itu harus dipertimbangkan dua aspek penting agar perancangan dapat optimal yaitu *wake effect* dan jarak antar turbin [7].

### Wake Effect

*Wake effect* adalah kondisi dimana terjadi pengurangan kecepatan angin yang memutar baling-baling turbin kedua setelah angin tersebut berkontak dengan turbin pertama pada kolom yang sama. Penurunan kecepatan angin ini berdampak pada penurunan daya luaran turbin kedua [8].



Gambar 1. Ilustrasi Wake Effect [8].

Luasan wake effect akan membesar bergantung pada jarak antara turbin kedua dari turbin pertama. Untuk menghitung *wake effect* pada jarak tertentu dari turbin pertama digunakan beberapa persamaan berikut [8]:

1. Jari-jari *wake*:

$$r_1 = r_d + (\alpha \times x)$$

dimana:  $r_1$  : jari-jari *wake* (m)

$r_d$  : jari-jari rotor hilir (m)

$\alpha$  : skalar perluasan *wake*

$x$  : jarak antar turbin dalam satu kolom yang sama (m)

2. Skalar perluasan *wake*:

$$\alpha = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

dimana:  $z$  : tinggi hub turbin (m)

$z_0$  : kekasaran permukaan tanah (m)

3. Jari-jari rotor hilir:

$$r_d = r_r \times \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}}$$

dimana:  $r_r$  : jari-jari penampang turbin (m)

$a$  : faktor induksi aksial

4. Faktor induksi aksial:

$$a = 0,5 \times (1 - \sqrt{1 - c_t})$$

dimana:  $c_t$  : koefisien daya dorong turbin (nilai antara 0-0,5)

5. Pengurangan kecepatan:

$$v_d = \frac{2 \times a}{1 + \alpha \times \sqrt{\left(\frac{x}{r_d}\right)^2}}$$

6. Pengurangan kecepatan total:

$$v_{d,tot} = \sqrt{\sum_N (v_d)^2}$$

dimana:  $N$  : jumlah turbin yang terdampak

7. Kecepatan angin yang memutar turbin:

$$v_{tot} = v_0(1 - v_{d,tot})$$

dimana:  $v_0$ : kecepatan angin awal (m/s)

### Jarak Antar Turbin

Jarak antar turbin dalam baris dan kolom merupakan faktor yang harus dioptimalkan mengingat adanya *wake effect*. Semakin jauh jarak antar turbin baik dalam baris maupun kolom, maka semakin kecil *wake effect* yang terjadi. Hal ini berarti semakin kecil pengurangan

kecepatan angin dan semakin besar daya luaran turbin [7].

Sebaliknya, jarak antar turbin yang jauh mengakibatkan jumlah turbin yang dapat dipasang di lokasi dengan luasan tertentu akan semakin sedikit. Oleh karena itu *wake effect* tidak dapat dihilangkan sama sekali, tapi perlu diminimalkan dengan pengaturan jarak yang optimal [7].

## BAHAN DAN METODE

Sebelum melakukan perancangan PLTB, ada dua tahapan penting yang harus dilakukan yaitu:

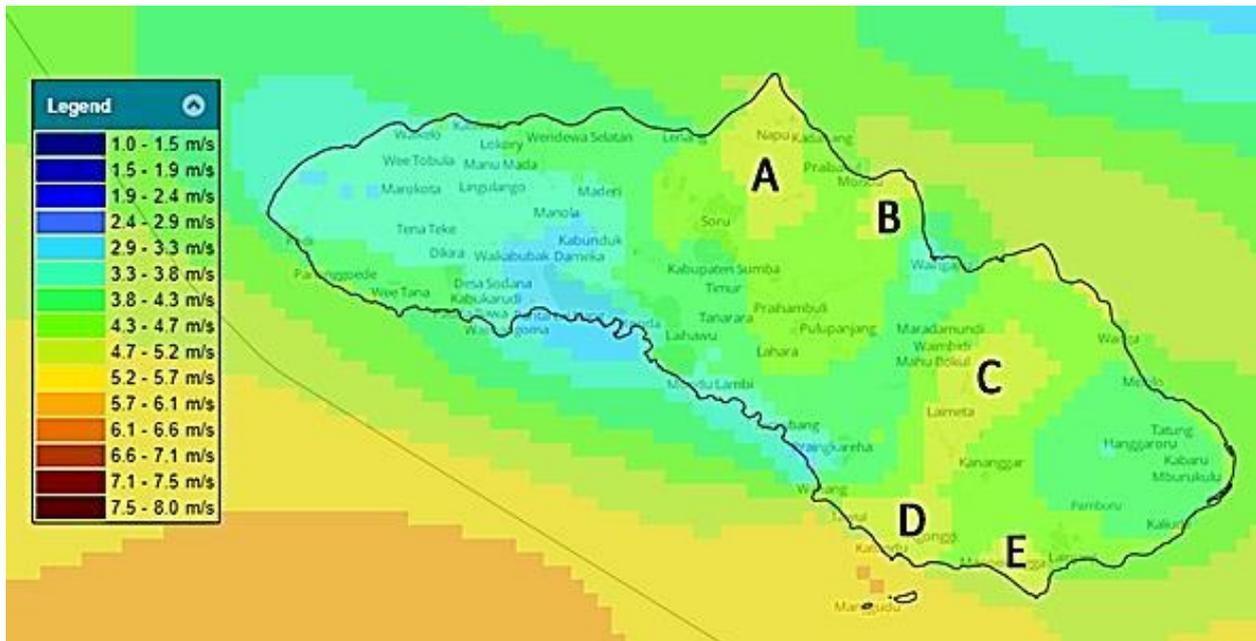
1. Penentuan lokasi perancangan.
2. Analisis kebutuhan listrik yang akan digunakan sebagai acuan perancangan.

### Penentuan Lokasi

Seperti telah dijelaskan pada pendahuluan bahwa perancangan PLTB dalam penelitian ini akan mengambil lokasi di Pulau Sumba, NTT dengan alasan lokasi tersebut mempunyai kecepatan angin rata-rata terbesar di wilayah NTT. Tetapi untuk menentukan lokasi spesifik yang akan dipilih sebagai dasar perancangan perlu dikaji lebih lanjut dengan pertimbangan kecepatan angin rata-rata, topografi, dan akses transportasi menuju lokasi.

Secara umum kecepatan angin rata-rata yang diperlukan minimal 4 m/s untuk turbin dengan tiga baling-baling. Lokasi yang dipilih diharapkan memiliki topografi yang baik yaitu yang memiliki sedikit gangguan agar aliran angin tidak terganggu sehingga tidak sulit menentukan orientasi turbin. Selain itu turbin angin dengan tinggi tower antara 50-80 m, umumnya mempunyai panjang baling-baling mencapai 80 m, sehingga diperlukan akses transportasi yang memadai agar tidak terjadi kesulitan membawa komponen turbin ke lokasi [9].

Dari pengecekan data potensi angin pada *Wind Energy Resources Indonesia* dari EMD International, Denmark diperoleh setidaknya lima lokasi di Pulau Sumba yang memiliki kecepatan angin rata-rata di atas 4 m/s yaitu: Distrik Napu, Distrik Mondu, Distrik Laimeta, Distrik Tawui, Ngonggi, dan Katundu, serta Distrik Manoekangga [10].



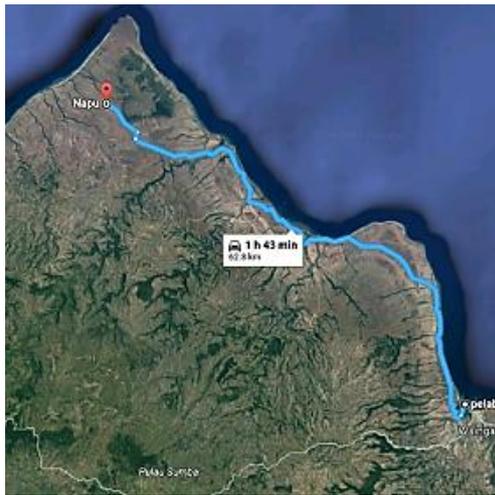
**Gambar 2.** Potensi Energi Angin di Pulau Sumba, NTT: a) Distrik Napu, b) Distrik Mondu, c) Distrik Laimeta, d) Distrik Tawui, Ngonggi, dan Katundu, e) Distrik Manoekangga [10].

**Tabel 1.** Potensi Energi Angin di Pulau Sumba [10] [11]

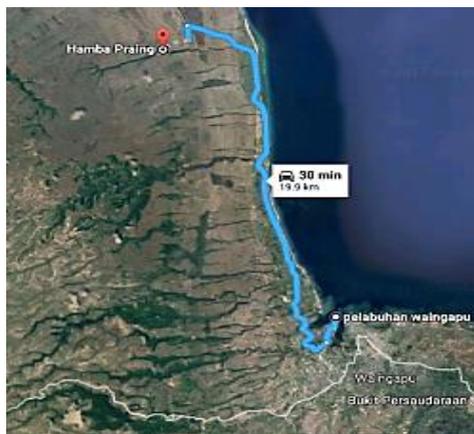
Lokasi	Kecepatan angin (m/s)	Luas wilayah (km <sup>2</sup> )	Kepadatan daya (Wh/m <sup>2</sup> )	Keterangan
Napu	4,95	477	109,27	Akses jalan raya memadai, jarak dari pelabuhan 62,8 km.
Mondu	4,95	108	109,27	Akses jalan raya memadai, jarak dari pelabuhan 19,9 km.
Laimeta	4,95	540	109,27	Daerah berbukit-bukit dan paling jauh dari pelabuhan, sehingga biaya transportasi mahal.
Tawui, Ngonggi dan Katundu	5,45	27	138,63	Daerah berbukit-bukit dan paling jauh dari pelabuhan, sehingga biaya transportasi mahal.
Manoekangga	4,95	126	109,27	Daerah berbukit-bukit dan paling jauh dari pelabuhan, sehingga biaya transportasi mahal.

Kemudian dengan melihat lebih detail data pada kelima daerah tersebut diperoleh data kecepatan angin rata-rata, luas area, dan kepadatan daya, seperti terlihat pada Tabel 1.

Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan di atas, maka lokasi yang paling sesuai untuk dipilih sebagai lokasi perancangan PLTB adalah Distrik Mondu.



(a)

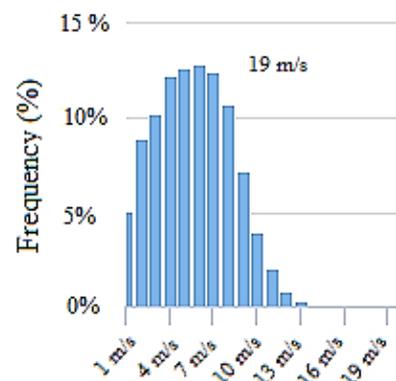


(b)

**Gambar 3.** Jarak dan Kondisi Jalan di: (a) Distrik Napu, (b) Distrik Mondu [11].

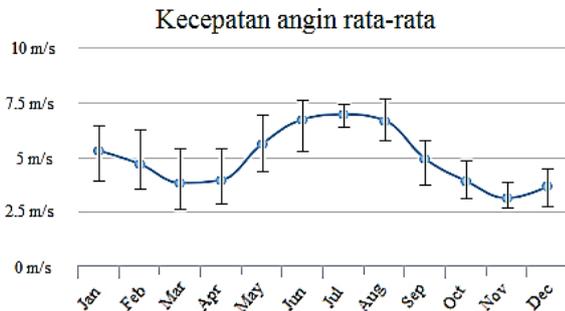
### Karakteristik Angin

Setelah menentukan lokasi yang dipilih, perlu mendalami lebih lanjut karakteristik angin di daerah Distrik Mondu. Pada gambar 4 terlihat bahwa data frekuensi kecepatan angin rata-rata dalam satu tahun menunjukkan bahwa terdapat sekitar 80% kecepatan angin 4 m/s ke atas, sehingga potensi turbin angin untuk menghasilkan listrik sepanjang tahun sangat besar [10].



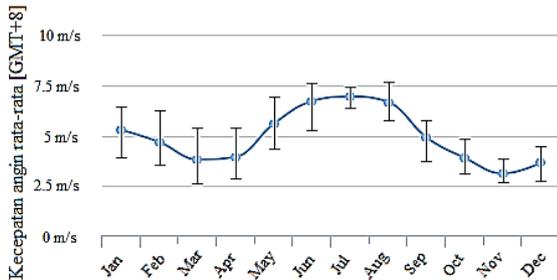
**Gambar 4.** Data Frekuensi Kecepatan Angin dalam Setahun di Distrik Mondu [10].

Pada Gambar 5 terlihat bahwa data kecepatan angin rata-rata bulanan menunjukkan bahwa kecepatan angin di Distrik Mondu konsisten pada kecepatan diatas 4 m/s. Hanya pada bulan November yang menunjukkan data di bawah 4 m/s [10].



**Gambar 5.** Data Kecepatan Angin Rata-Rata Bulanan di Distrik Mondu [10].

Pada Gambar 6 terlihat bahwa data kecepatan angin rata-rata harian (*diurnal wind speed*) juga menunjukkan kecepatan angin cukup konsisten 4 m/s ke atas setiap jamnya, dengan kecepatan tertinggi 6,54 m/s pada jam 13.00-15.00 WITA [10].



**Gambar 6.** Data Kecepatan Angin Rata-Rata Harian di Distrik Mondu [10].

Data-data di atas menunjukkan bahwa Distrik Mondu cukup memenuhi syarat sebagai lokasi untuk perancangan PLTB di Pulau Sumba, NTT.

### Kebutuhan Listrik

Berdasarkan data dari Rencana Usaha Penyediaan Listrik PLN 2017-2026, kebutuhan listrik di Pulau Sumba mencapai 10 MW. Karena sektor bisnis dan industri belum berkembang di wilayah ini, maka kebutuhan listrik utama berasal dari kebutuhan rumah tangga [12].

Kebutuhan listrik sebesar 10 MW tersebut cukup memadai untuk dipenuhi oleh PLTB yang menggunakan konsep ladang angin.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perancangan Turbin Angin

Untuk merancang turbin angin yang akan digunakan dilakukan beberapa tahapan perhitungan sebagai berikut.

- Spesifikasi turbin angin:
  - Jumlah sudu : 3 buah
  - Daya luaran turbin ( $P_o$ ) : 100 kW
  - Tinggi hub ( $z$ ) : 100 m
  - Efisiensi ( $\eta$ ) : 40%
  - Kekasaran permukaan ( $z_0$ ) : 0,008 m
  - Koefisien daya dorong ( $c_t$ ) : 0,18

- Jari-jari turbin angin ( $r$ ):

$$r = \sqrt{\frac{100 \times 1000 \text{ W}}{\frac{1}{2} \times \pi \times 0,4 \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (4,95 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3}}$$

$$r = 32,729 \text{ m}$$

- Skalar perluasan *wake* ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{100 \text{ m}}{0,008 \text{ m}}\right)}$$

$$\alpha = 0,053$$

- Faktor induksi aksial ( $a$ ):

$$a = 0,5 \times (1 - \sqrt{1 - 0,18})$$

$$a = 0,0472$$

- Jari-jari rotor hilir ( $r_d$ ):

$$r_d = 32,729 \text{ m} \times \sqrt{\frac{1 - 0,0472}{1 - 2 \times 0,0472}}$$

$$r_d = 33,572 \text{ m}$$

- Jari-jari *wake* dan pengurangan kecepatan:

Perhitungan jari-jari *wake* ( $r_1$ ), pengurangan kecepatan ( $v_d$ ), dan pengurangan kecepatan total ( $v_{d,tot}$ ) dilakukan dengan variasi jarak antar turbin ( $x$ ) dari 50 sampai dengan 1700 m.

**Tabel 2.** *Wake Effect* Antara 2 Turbin

$x$ (m)	$r_1$ (m)	$v_d$ (m/s)	$v_{d,tot}$ (m/s)	$v$ (m/s)
50	36,222	0,085	0,120	4,36
100	38,872	0,064	0,091	4,50
150	41,522	0,046	0,065	4,63
200	44,172	0,033	0,046	4,72
250	46,822	0,024	0,034	4,78
300	49,473	0,018	0,026	4,82
400	54,773	0,011	0,016	4,87
500	60,073	0,007	0,010	4,90
600	65,373	0,005	0,007	4,91
700	70,674	0,004	0,006	4,92
800	75,974	0,003	0,004	4,93
900	81,274	0,002	0,003	4,93
1000	86,574	0,002	0,003	4,94
1200	97,175	0,001	0,002	4,94
1400	107,776	0,001	0,001	4,94
1700	123,676	0,001	0,001	4,95

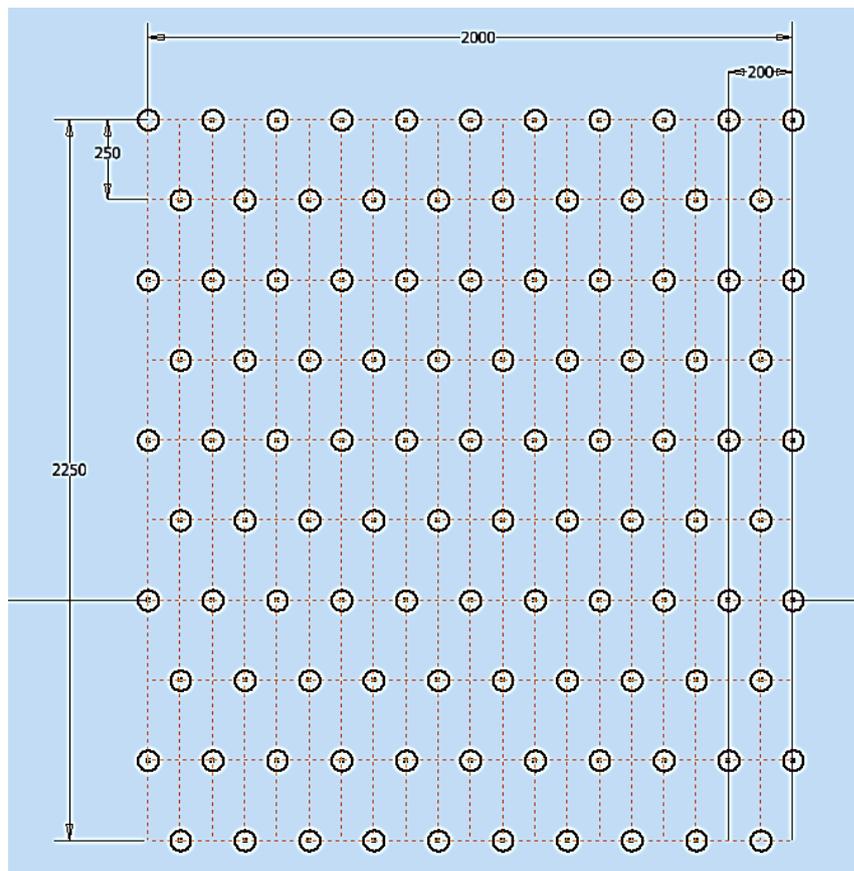
Dari tabel di atas terlihat bahwa *wake effect* tidak menimbulkan pengurangan kecepatan angin pada jarak 1700 m.

### Optimasi Ladang Turbin

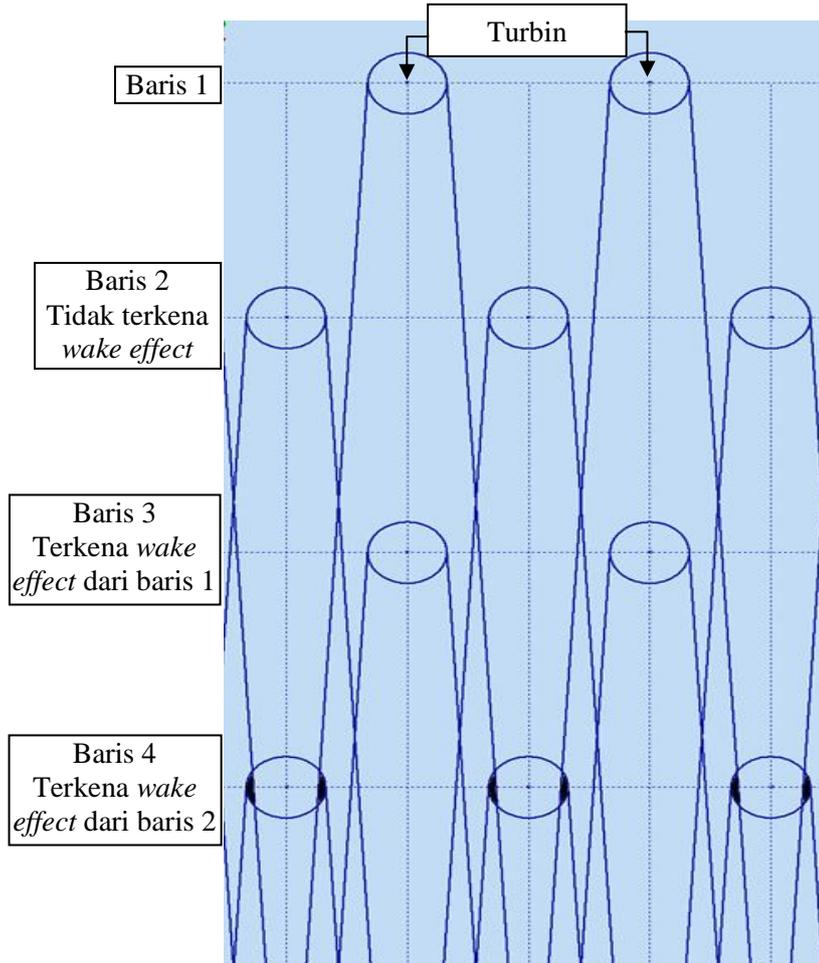
Walaupun hasil perhitungan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa *wake effect* akan hilang pada jarak antar turbin sejauh 1700 m, akan tetapi pada perancangan sesungguhnya jarak itu terlalu jauh sehingga membuat kebutuhan luas area untuk penempatan turbin angin menjadi sangat besar. Untuk itu perlu optimasi dalam pemilihan jarak yang akan diterapkan.

Berdasarkan spesifikasi turbin yang akan digunakan yaitu turbin angin dengan tiga baling-baling dan daya luaran 100 kW, maka jarak optimal antar turbin angin dalam satu baris adalah 200 m. Sedangkan untuk menentukan jarak antar turbin angin perlu disimulasikan dengan memperhitungkan *wake effect* yang ditimbulkan.

Dari hasil simulasi terhadap berbagai skenario penempatan, maka diperoleh jarak turbin antar kolom sejauh 250 m, dengan penempatan turbin angin antara kolom ganjil dan kolom genap secara berselang-seling (lihat Gambar 7).



**Gambar 7.** Skenario Optimal Penempatan Turbin Angin dalam Baris dan Kolom.



**Gambar 8.** Ilustrasi *Wake Effect*.

Dari susunan yang dipilih tersebut dapat dilihat secara detail kondisi *wake effect* yang terjadi sebagai berikut (lihat gambar 8):

- Baris kedua tidak mengalami *wake effect* dari turbin pada baris pertama.
- Turbin baris ketiga mengalami *wake effect* dari turbin baris pertama dengan jarak antar turbin 500 m sehingga kecepatan angin yang diterima sebesar 4,90 m/s.
- Turbin baris keempat mengalami *wake effect* dari turbin baris kedua dengan jarak antar turbin 500 m sehingga kecepatan angin yang diterima sebesar 4,90 m/s, dan begitu seterusnya.

Pengaruh *wake effect* yang terjadi pada hasil simulasi di atas tidak berbeda jauh dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh Azmi, dkk menggunakan CFD, dimana tidak terjadi penurunan angin yang signifikan pada jarak 500 m antara dua turbin angin (di bawah 1%). [13]

Akibat adanya *wake effect* seperti tersebut di atas, maka daya luaran ( $P_o$ ) turbin angin yang mengalami *wake effect* menjadi:

$$P_o = \frac{0,4 \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \pi \times (32,729 \text{ m})^2 \times \left(4,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3}{2}$$

$$P_o = 96950 \text{ W} = 96,95 \text{ kW}$$

Untuk mencapai daya luaran total sebesar 10 MW sesuai kebutuhan listrik yang telah ditentukan, maka diperlukan total sebanyak 105 buah turbin angin. Sesuai dengan skenario posisi antar turbin yang digunakan, maka 20 turbin angin pada baris pertama dan kedua tidak terkena *wake effect*, sedangkan 85 turbin angin yang lain terkena *wake effect*, sehingga total daya luaran yang dihasilkan adalah:

$$P_o = (20 \times 100 \text{ kW}) + (85 \times 96,95 \text{ kW})$$

$$P_o = 10240,75 \text{ kW} = 10,24 \text{ MW}$$

Jadi daya luaran dari skenario turbin angin yang digunakan sudah mencukupi untuk kebutuhan daya listrik Pulau Sumba sebesar 10 MW.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Nusa Tenggara Timur saat ini masih mengalami kekurangan pasokan listrik, dengan rasio elektrifikasi hanya mencapai 58,64%. Dan sebagian besar kebutuhan listrik masih disuplai oleh PLTD yang sangat mahal biaya energinya. Oleh karena itu diperlukan pembangkit listrik dari sumber energi lokal terutama dari sumber energi terbarukan yang lebih murah dan ramah lingkungan.

Pulau Sumba, NTT merupakan salah satu pulau dengan potensi energi angin yang sangat besar. Tingkat kecepatan angin rata-rata di atas 4 m/s dan cukup konsisten sepanjang tahun. Dari hasil pencarian data potensi energi angin dan dengan mempertimbangkan aspek topografi dan akses transportasi, maka dipilih Distrik Mondu sebagai lokasi perancangan PLTB dalam penelitian ini.

PLTB yang dirancang menggunakan konsep ladang angin untuk mencukupi kebutuhan listrik 10 MW di Pulau Sumba. Dari hasil perhitungan dan optimasi yang dilakukan diperoleh kebutuhan 105 turbin angin berdaya 10kW yang dipasang dalam 10 baris dan 11 kolom dengan konsep berselang-seling. Total daya luaran yang dihasilkan dengan memperhitungkan *wake effect* yang terjadi sebesar 10,24 MW. Sehingga sudah dapat mencukupi kebutuhan listrik yang ditetapkan.

### Saran

Perlu dilakukan studi kelayakan lebih lanjut dengan memperhitungkan biaya energi secara keseluruhan agar dapat diketahui secara lebih komprehensif kelayakan secara ekonomi atas perancangan PLTB yang sudah dilakukan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diucapkan kepada Sdr. Imam Maulana Abrar dan Sdr. Yee Yanglasyjiavue yang telah membantu dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS NTT, "Nusa Tenggara Timur dalam Angka 2020", Indonesia: *BPS Provinsi NTT*, April, 2020.
- [2] Ditjen Ketenagalistrikan, "Statistik Ketenagalistrikan 2018", Jakarta, Indonesia: *Ditjen Ketenagalistrikan-Kementerian ESDM*, Agustus, 2019.
- [3] Ditjen EBTKE, "Statistik EBTKE 2016", Jakarta, Indonesia: *Ditjen EBTKE-Kementerian ESDM*, Desember, 2016.
- [4] Samorani, M., "The Wind Farm Layout Optimization Problem", *Handbook of Wind Power Systems*, Springer Science & Business Media, 2014, pp. 21-38.
- [5] Roberts, J.O., dan G. Mosley, "Feasibility Study of Economics and Performance of Wind Turbine Generators at the Newport Indiana Chemical Depot Site", November 2013. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [6] Burton, T., N. Jenkins, D. Sharpe, dan E. Bossanyi, "Wind Energy Handbook 2<sup>nd</sup> edition", Michigan, USA: *John Wiley & Sons.*, 2011.
- [7] R. Shakoor, M.Y. Hassan, A. Raheem, dan N. Rasheed, "The Modelling of Wind Farm Layout Optimization for the Reduction of Wake Losses", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 17, pp. 1-9, 2015.
- [8] R. Shakoor, M.Y. Hassan, A. Raheem, dan Y.K. Wu, "Wake Effect Modelling: A Review of Wind Farm Layout Optimization using Jensen's Model", *Renewable and Sustainable Reviews*, vol. 58, pp. 1048-1059, 2016.
- [9] P.J. Schubel dan R.J. Crossley, "Wind Turbine Blade Design", *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3425-3449, 2012.
- [10] EMD International, 2017, "Wind Energy Resources of Indonesia", [Online]. Available: <http://indonesia.windprospecting.com>, diakses 8 Januari 2020.
- [11] Google, 2020, "Google Maps", [Online]. Available: <http://maps.google.co.id> diakses 10 Januari 2020.
- [12] PLN, "Rencana Usaha Penyediaan Listrik (RUPTL) PLN 2017-2026", Jakarta, Indonesia: PT. PLN (Persero), 2017.

- [13] A.A. Azmi, S. Kamal, Ismail, dan S. Tampubolon, "Simulasi CFD Wake Effect Ladang Angin Susunan Non-Steggered Menggunakan Metode 6DOF Dynamic Mesh", *Prosiding Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI XI) 2017*, pp.65-72. 2017.