

# Estimasi Potensi Energi Angin Indonesia Menggunakan Model *Weather Research and Forecast - Four Dimension Data Assimilation (WRF-FDDA)* (Indonesia Wind Energy Potential Estimation Using Weather Research Forecasting – Four Dimension Data Assimilation Models (WRF-FDDA))

Nurry Widya Hesty<sup>1</sup>, Dian Galuh Cendrawati<sup>1</sup>, Aminuddin<sup>1</sup>, Bono Pranoto<sup>1</sup>, Silvy Rahmah Fithri<sup>1</sup>, Akhmad Fahim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Puslitbangtek Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi  
Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Jl. Ciledug Raya Kav. 102 Cipulir Kebayoran Lama 12230

<sup>2</sup>Program Studi Sains Kebumihan

Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

---

## Riwayat naskah

Diterima: 10-05-2021

Direvisi: 07-09-2021

Disetujui: 22-11-2021

Korespondensi:

N. Hesty

nurry.hesty@gmail.com

## ABSTRAK

Studi ini memberikan gambaran distribusi sumber daya energi angin *onshore* dan *offshore* Indonesia menggunakan model WRF-ARW dan teknik asimilasi data *Nudging Four-Dimensional Data Assimilation System (FDDA)* pada ketinggian 50 m di atas permukaan laut, yang merupakan rata-rata ketinggian hub turbin komersial. Hasil model diverifikasi terhadap data 111 stasiun BMKG dan data Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL-KESDM). Dari hasil model didapat lokasi *onshore* yang memiliki potensi energi angin cukup tinggi dengan kecepatan angin 6 - 8 m/s, rapat daya 400–500 watt/m<sup>2</sup>, dan AEP sebesar 4 – 5 GWh/tahun terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, dan NTT, sedangkan lokasi *offshore* yang memiliki kecepatan angin lebih dari 8 m/s, rapat daya 500–600 watt/m<sup>2</sup>, dan AEP 5 – 6 GWh/tahun terjadi di *offshore* Banten, *offshore* Sukabumi, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, *offshore* Kab. Jeneponto, dan *offshore* Kab. Kepulauan Tanimbar.

**Kata kunci:** WRF, nudging FDDA, potensi angin, WPD, AEP

## ABSTRACT

This study gives an overview of the wind energy resource distribution onshore and offshore Indonesia using WRF-ARW model and Nudging Four-Dimensional Data Assimilation System (FDDA) technique at 50 m a.g.l, which is typically the height of turbine hub. Model results were verified against data from 111 BMKG stations and data from the Center for Research and Development of Marine Geology (P3GL-KESDM). From the model results, it is found that onshore locations that have high wind energy potential with wind speeds of 6 - 8 m/s, power density of 400–500 watts/m<sup>2</sup>, and AEP 4 - 5 GWh/year occurred on the southern coast of Java Island, South Sulawesi, Maluku, and NTT, while offshore locations with wind speeds of more than 8 m/s, power density of 500–600 watt/m<sup>2</sup>, and AEP 5 - 6 GWh/year occurred in Banten, Sukabumi, Kupang, Wetar Island, Jeneponto Regency, and Tanimbar Islands Regency.

**Keywords:** WRF, nudging FDDA, wind potential energy, WPD, AEP

## 1. Pendahuluan

Upaya mengembangkan energi terbarukan di Indonesia masih menjadi tantangan besar karena sampai dengan tahun 2020, Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) baru terpasang sekitar 135 MW yaitu 75 MW di daerah Sidrap dan sebesar 60 MW di daerah Janeponto. Sementara itu, Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menargetkan kapasitas PLT-Angin pada tahun 2025 yakni 255 MW.

Perkembangan estimasi potensi energi angin Indonesia saat ini masih terkendala ketersediaan data kecepatan angin yang akurat di seluruh wilayah Indonesia sebagai langkah awal dalam identifikasi dan pemilihan lokasi proyek energi angin. Survei dan pengukuran langsung oleh instansi pemerintah dan beberapa pihak swasta telah dilakukan pada beberapa wilayah. Mayoritas dari data tersebut hanya dilakukan pengukuran selama beberapa bulan saja dan pada ketinggian maksimum 30 m di atas permukaan tanah. Sampai saat ini Indonesia belum memiliki stasiun pengukuran cuaca yang terletak di area *offshore*. Penyediaan data potensi energi angin *offshore* memiliki tingkat kesulitan dan biaya yang lebih tinggi untuk membangun struktur pondasi dalam laut, instalasi *power supply*, proses transfer data hingga pemeliharaan peralatan jika terdapat kerusakan.

Penggunaan data citra satelit untuk mengetahui kecepatan angin sebenarnya tersedia cukup banyak dan mudah diakses secara global. Namun di sisi lain data citra satelit ini memiliki kelemahan berupa resolusi spasial yang cukup besar sehingga kurang optimal jika digunakan untuk mengetahui potensi energi angin di suatu wilayah tertentu. Martosaputro dan Murti (2014) menggunakan data satelit 3TIER untuk mendapatkan data kecepatan angin dan menyatakan bahwa potensi tenaga angin yang tinggi terdapat di pantai selatan Pulau Jawa, Nusa Tenggara Timur, dan Maluku. Data reanalisis berguna untuk estimasi potensi sumber daya angin dalam kasus ketika data observasi tidak tersedia. Data reanalisis yang banyak digunakan dalam model iklim adalah dari *National Centers for Environmental Prediction - Final Analysis* (NCEP-FNL) (Carta dkk., 2013). Namun dalam penelitian Ameldam (2012) menyebutkan penggunaan data satelit

NCEP-FNL secara langsung untuk estimasi kecepatan angin suatu wilayah memberikan *error* yang besar. Beberapa penelitian untuk mengetahui potensi angin *offshore* menggunakan data dari NCEP-FNL diantaranya dilakukan oleh Evangelia dkk., 2014; Jin dkk., 2014; Talam dkk., 2020; dan Carvalho dkk., 2014. Pengecualian pada Hesty dan Hadi (2015) yang telah mengasimilasi CCMP dan NCEP-FNL untuk mengestimasi potensi energi angin di pantai selatan Jawa Barat.

Studi ini menggunakan teknik asimilasi data teknik *Nudging Four-Dimensional Data Assimilation System* (FDDA) dua sumber data global yaitu *Cross Calibrated Multi-Platform* (CCMP) dan NCEP-FNL selama periode 15 tahun (2001–2015) untuk menghasilkan data yang lebih akurat dengan resolusi yang lebih baik. Hasil model kemudian diverifikasi dengan data pengukuran 111 stasiun BMKG, data OGIMET, dan dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL-KESDM).

## 2. Metodologi

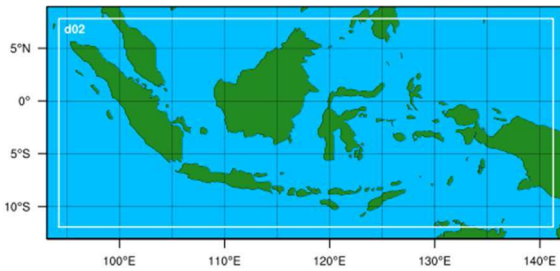
Model yang digunakan dalam penelitian adalah model *Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF* (WRF-ARW). WRF-ARW merupakan model cuaca numerik yang dikembangkan oleh *National Cooperation Atmospheric Research* (NCAR) pada divisi *Mesoscale and Microscale Meteorology* (MMM) dan menjadi generasi masa depan model prediksi atmosfer skala meso dan sistem asimilasi data.

### 2.1 Desain Eksperimen

Pada penelitian ini simulasi model WRF-ARW dilakukan selama periode 15 tahun (2001 – 2015) dengan konfigurasi menggunakan 2 domain bersarang seperti pada Gambar 1 dengan tujuan mendapatkan pola cuaca yang lebih detail sesuai dengan kondisi lokal seperti topografi dan garis pantai. Domain D1 memiliki resolusi 25x25 km, sedangkan domain terakhir *nested* D2 memiliki resolusi 5x5 km.

Data FNL dari NCEP resolusi 1°x1° digunakan sebagai inputan model WRF. Data tersebut tersedia dalam setiap 6 jam dan dapat diakses secara gratis di <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>

WPS Domain Configuration



Gambar 1. Domain induk dan anak model WRF model yang digunakan dalam simulasi.

Selain itu, digunakan data CCMP untuk teknik asimilasi data yang berguna untuk memperbaiki hasil model WRF. Data CCMP merupakan gabungan data observasi angin dari satelit *Remote Sensing Systems* (REMSS) dengan menggunakan *Variational Analysis Methode* (VAM) untuk menghasilkan data angin resolusi tinggi. Tipe data CCMP adalah *grid* dan memiliki resolusi 0.25 derajat atau sekitar 27 km. Data ini tersedia setiap 6 jam dimulai tahun 1987 hingga 2016. Data CCMP diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB agar sesuai dengan format masukan WRF-FDDA, yaitu LITTLE\_R. Data ini kemudian dimasukkan ke dalam sistem FDDA setiap hari untuk memperbaiki syarat awal dan syarat batas model.

Skala waktu relaksasi *nudging* dipilih berdasarkan pertimbangan empiris. Jika sangat kecil, maka solusi konvergen menuju pengamatan terlalu cepat, dan proses dinamika dalam model tidak memiliki cukup waktu untuk menyesuaikan diri. Sebaliknya, jika terlalu besar, kesalahan model dapat berkembang terlalu banyak dan *nudging* tidak memiliki cukup waktu untuk menjadi efektif. Setelah beberapa tes awal, berdasarkan nilai RMSE terkecil dan korelasi terbesar untuk penelitian ini, skala waktu relaksasi yang dipakai adalah 1 jam dan radius *nudging* adalah 25 km.

Simulasi model WRF-FDDA dilakukan menggunakan *supercomputer* milik Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TEK-EBTKE) dengan spesifikasi *supermicro 8 compute-node*, masing-masing memiliki 48 *number of processing* (np). Proses *running* dilakukan dengan bantuan *script bash shell* untuk melakukan *running* otomatis selama periode simulasi. Dalam *script bash shell* tersebut, dibuat suatu perintah untuk melakukan paralel

*running* dimana setiap *compute-node* mensimulasi masing-masing satu hari simulasi secara bersama-sama (dengan waktu *spin-up* 1 jam setiap harinya). Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *running* satu hari adalah 10 jam, sehingga total waktu yang dibutuhkan untuk simulasi 15 tahun sekitar 1 tahun.

Skema konfigurasi model WRF FDDA yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Model WRF

Parameter	Konfigurasi
Resolusi spasial (domain terakhir)	5 km
Interval waktu luaran ( <i>history interval</i> )	1 jam
Jumlah <i>grid</i> horizontal	1046 x 441
Jumlah <i>grid</i> vertikal	35
Jumlah <i>array</i> waktu	29208
Skema mikrofisika ( <i>mp_physics</i> )	WRF <i>Single Moment 3 class</i> (WSM3)
Skema awan cumulus ( <i>cu_physics</i> )	Kain-Fritsch
Skema radiasi gelombang pendek ( <i>ra_sw_physics</i> )	Dudhia
Skema radiasi gelombang Panjang ( <i>ra_lw_physics</i> )	<i>Rapid Radiative Transfer Model</i> (RRTM)
Skema permukaan ( <i>sf_sfclay_physics</i> )	MM5 <i>MRF Monin-Obukhov Similarity Theory</i>
Skema tutupan lahan ( <i>sf_surface_physics</i> )	NOAH <i>Land Surface Model</i>
Skema PBL ( <i>bl_pbl_physics</i> )	YSU

## 2.2 Verifikasi Model

Untuk menguji kemampuan model WRF-FDDA dalam mengestimasi angin, maka perlu dilakukan verifikasi dengan data observasi. Data observasi diperoleh dari stasiun observasi di 111 stasiun BMKG untuk periode 2000-2010 dilanjutkan dengan data OGIMET periode 2011-2015. Selain itu, digunakan data pengukuran dari P3GL-KESDM.

Metode verifikasi utama untuk parameter angin menurut penelitian Shimada (2009) adalah dengan *Root Mean Square Error* (RMSE) dan korelasi ( $r$ ). Formula perhitungan RMSE dan korelasi menurut Shimada (2009) dapat dilihat pada persamaan 1 dan 2.



Gambar 2. Peta lokasi stasiun observasi angin P3GL dan BMKG

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{model,i} - x_{model,bar})(x_{obs,i} - x_{obs,bar})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{model,i} - x_{model,bar})^2 \sum_{i=1}^N (x_{obs,i} - x_{obs,bar})^2}} \quad (1)$$

Nilai koefisien korelasi berkisar antara -1 hingga +1. Nilai +1 menunjukkan hubungan linear yang kuat yang berbanding lurus, sedangkan nilai negatif menunjukkan hasil model yang berbanding terbalik dengan observasi. Semakin mendekati +1, artinya kedua variabel menunjukkan pola yang semakin serupa. Nilai koefisien korelasi 0 menunjukkan tidak ada hubungan linear antara kedua variabel.

Selain itu dilakukan verifikasi RMSE. RMSE adalah suatu ukuran yang sering digunakan mengenai perbedaan antara nilai yang diprediksi oleh suatu model atau penaksir dan nilai yang benar-benar diamati dari dimodelkan atau diperkirakan. RMSE merupakan ukuran yang baik untuk akurasi. Semakin kecil nilai RMSE, maka semakin baik tingkat akurasi. Rumus nilai RMSE ditunjukkan oleh persamaan (2).

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{obs,i} - x_{model,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

### 2.3. Perhitungan Wind Power Density dan Annual Energy Production

Keluaran model selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi lokasi yang memiliki potensi energi angin berupa peta *color-code*

yang merepresentasikan data kecepatan angin (m/s) pada ketinggian standar *hub* turbin angin, rapat daya angin/*wind power density* (WPD) dalam watt/m<sup>2</sup>, dan produksi energi angin tahunan/*annual energy production* (AEP) dalam GWh/tahun. WPD berbanding lurus dengan kerapatan udara, dan kecepatan angin pangkat tiga yang alirannya tidak mengalami gangguan. WPD dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$WPD = 0.5 * 1.22 * \sum_{v=0}^n v^3 f(v) \quad (3)$$

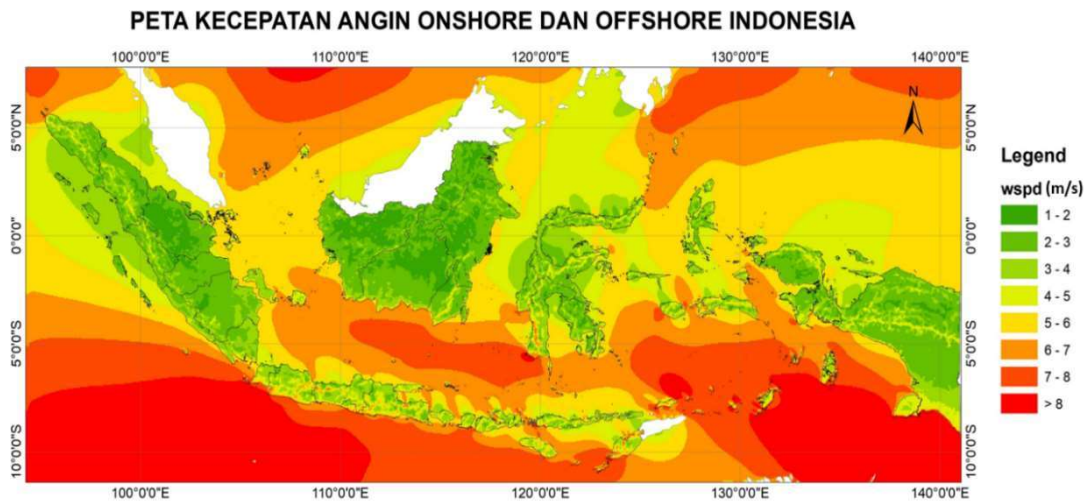
Dengan *v* adalah kecepatan angin, *f(v)* merupakan fungsi probabilitas kecepatan angin menurut distribusi Weibull dan *k* adalah parameter bentuk distribusi Weibull.

Sementara itu, AEP dihitung berdasarkan kapasitas turbin angin dalam satu tahun sesuai dengan potensi angin dan kondisi di lapangan yang direpresentasikan dari distribusi Weibull melalui persamaan sebagai berikut:

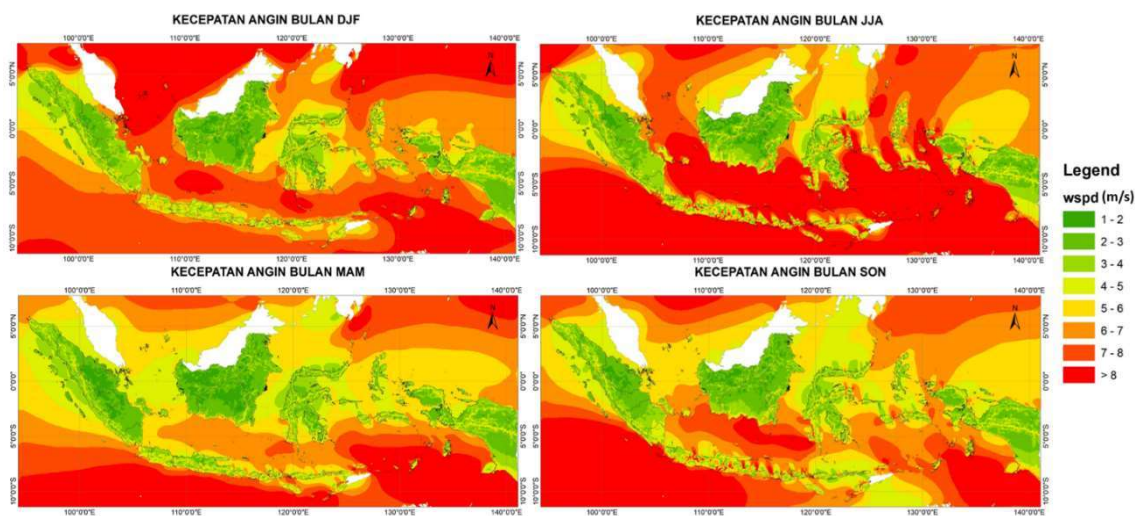
$$AEP = 8760 \times 10^{-3} \int_{V_{cut-off}}^{V_{cut-off}} P(v) f(v) dv \quad \dots (2-4)$$

*V<sub>cut in</sub>* adalah kecepatan angin yang dibutuhkan sebagai syarat *cut in* turbin, *V<sub>cut off</sub>* adalah kecepatan angin saat turbin melakukan *brake* (mematikan mesin), *P(v)* adalah daya keluaran turbin yang tercapai saat *v*.





Gambar 3. Peta Distribusi Kecepatan Angin Indonesia di ketinggian 50 m



Gambar 4. Peta Distribusi Kecepatan Angin Indonesia Bulan DJF, JJA, MAM, dan SON

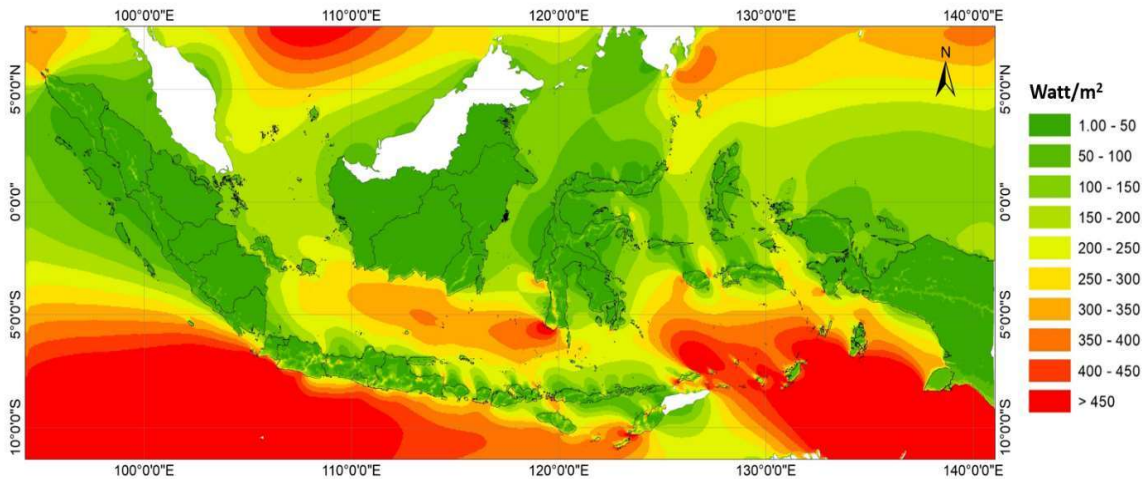
### 3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 3 merupakan hasil simulasi periode 15 tahun yang menampilkan distribusi kecepatan angin rata-rata di ketinggian 50 m. Kecepatan angin di ketinggian 50 m sangat diperlukan karena menjadi standar ketinggian *hub* turbin angin saat ini. Potensi wilayah *offshore* yang digunakan dalam studi ini dibatasi oleh batimetri kedalaman 100 meter dari Badan Informasi dan Geospasial (BIG). Namun perlu diperhatikan status turbin angin *offshore* komersial yang layak secara ekonomis saat ini adalah pada kedalaman 40 – 50 m (Arapogianni A, 2013). Kecepatan angin yang tinggi (6 - 8 m/s) di *onshore* terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, dan NTT. Sumber daya angin sangat tinggi terjadi di daerah pesisir

melebihi 5 m/s, yang merupakan syarat *cut in* angin dari turbin angin komersial pada umumnya (Akour et al., 2018; Li dan Chen, 2008). Sementara kecepatan angin di daerah *offshore* menunjukkan angka lebih dari 8 m/s terjadi di *offshore* Banten, *offshore* Sukabumi, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, dan *offshore* Kab. Jeneponto, dan *offshore* Kab. Kepulauan Tanimbar, yang artinya potensi daya listrik yang dihasilkan akan jauh lebih besar.

Distribusi kecepatan angin rata-rata setiap periode musim di ketinggian 80 m dapat dilihat pada Gambar 4. Kecepatan angin maksimum terjadi pada periode Juni, Juli, Agustus (JJA) saat terjadi monsun Australia sedangkan minimum terjadi pada periode Maret, April, dan Maret (MAM) saat peralihan monsun Asia ke monsun Australia.

**RAPAT DAYA ANGIN ONSHORE DAN OFFSHORE INDONESIA**



Gambar 5. Peta Distribusi *Wind Power Density* (WPD) Indonesia

**3.1 Peta Distribusi *Wind Power Density* (WPD)**

Gambar 5 memperlihatkan distribusi *mean wind power density* (WPD) atau rapat daya di ketinggian 50 m. WPD di lokasi Sukabumi, Pandeglang, Yogyakarta bagian selatan, Kupang, Sulawesi Selatan, Maluku, mencapai 400–500 Watt/m<sup>2</sup> termasuk dalam kelas *good* (klasifikasi nilai WPD menurut Ko 2015) seperti tersaji pada Tabel 1). *Offshore* Banten, *offshore* Sukabumi, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, dan *offshore* Kab Jeneponto, dan *offshore* Kab Kepulauan Tanimbar memiliki kelas WPD *excellent* (500 – 600 watt/m<sup>2</sup>).

Tabel 1. Klasifikasi *wind power density* (Ko, 2015)

Wind resource category	Wind class	Wind speed (m/s)	Wind power density (W/m <sup>2</sup> )
Poor	1	3.5 - 5.6	50 - 200
Marginal	2	5.6 - 6.4	200 - 300
Moderate	3	6.4 - 7.0	300 - 400
Good	4	7.0 - 7.5	400 - 500
Excellent	5	7.5 - 8.0	500 - 600
Excellent	6	8.0 - 8.8	600 - 800
Excellent	7	Above 8.8	Above 800

**3.2 Peta Distribusi *Annual Energy Production* (AEP)**

Peta distribusi AEP dihitung menggunakan turbin referensi Bonus 1 MW, dengan spesifikasi *rated power* 1000 KW, *rated wind speed* 15 m/s, *cut in* 3 m/s, dan *cut*

*out* 25 m/s diperlihatkan pada Gambar 6. Untuk satu nilai kecepatan angin rata-rata, WPD, dan satu jenis turbin angin, AEP yang mampu diproduksi tergantung pada distribusi kecepatan angin lokal antara *cut in* dan *cut out* turbin. Wilayah *onshore* Sukabumi, Pandeglang, Yogyakarta bagian selatan, Kupang, Alor, dan Maluku dengan turbin Bonus 1 MW menghasilkan 4 – 5 GWh/tahun.

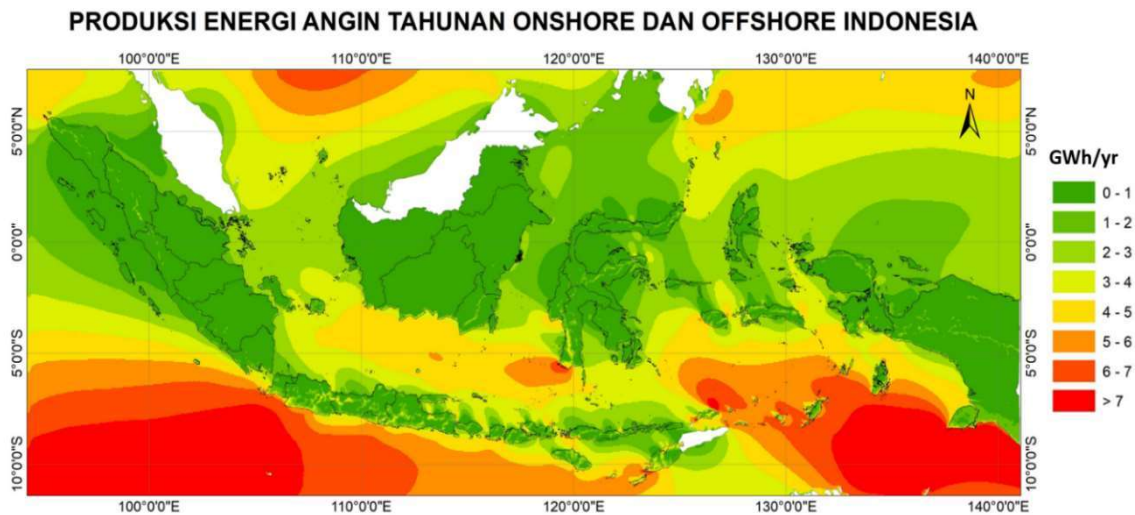
Area dengan AEP 5 - 6 GWh/tahun terdapat di wilayah *offshore* Pandeglang, *offshore* Kabupaten Sukabumi, *offshore* Kabupaten Jeneponto, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, dan *offshore* Kabupaten Kepulauan Tanimbar.

**3.3 Verifikasi Model WRF-FDDA**

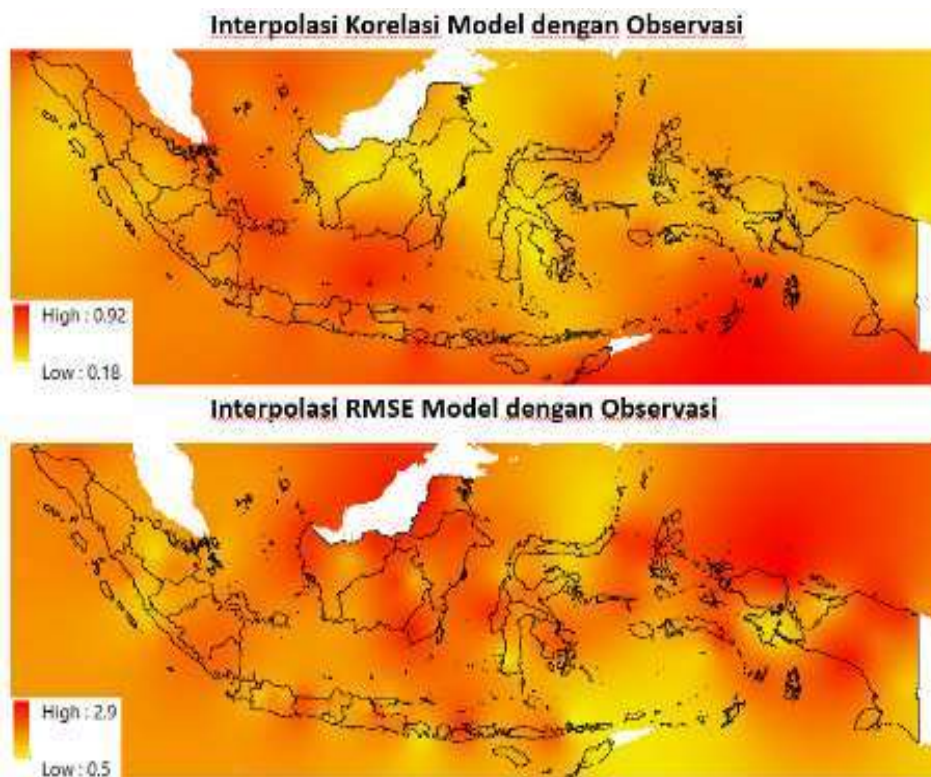
Data keluaran model WRF-FDDA memiliki resolusi spasial 5 Km, dan resolusi temporal per jam dari 1 Januari 2001 hingga 31 Desember 2015. Data hasil model WRF diverifikasi terhadap data stasiun BMKG, setelah sebelumnya disamakan resolusi temporal menjadi per 3 jam untuk dihitung korelasi dan RMSE.

Dari hasil perhitungan, RMSE berada pada kisaran 0,398 m/s – 2,91 m/s, sedangkan Korelasi berada pada kisaran 0,18 – 0,89. RMSE terendah ada di stasiun pengukuran Juanda Surabaya, sedangkan RMSE tertinggi ada di stasiun Rendani Manokwari. Setelah diperoleh nilai korelasi dan RMSE di 111 titik stasiun observasi, selanjutnya dilakukan interpolasi spasial untuk menghasilkan nilai korelasi dan RMSE secara spasial di seluruh wilayah Indonesia. Metode interpolasi yang digunakan adalah metode *kriging*.





Gambar 6. Peta Distribusi *Annual Energy production (AEP)* Indonesia



Gambar 7. Peta Distribusi Korelasi (Atas) dan RMSE (Bawah) antara Model dengan Stasiun Observasi.

Secara umum, *kriging* merupakan suatu metode untuk menganalisis data geostatistik untuk menginterpolasi suatu nilai berdasarkan data sampel yang tersedia. Data sampel pada ilmu kebumihan biasanya diambil di tempat-tempat yang tidak beraturan. Dengan kata lain, metode ini digunakan untuk mengestimasi besarnya nilai karakteristik  $Z$  pada titik tidak tersampel berdasarkan informasi dari karakteristik titik-titik tersampel yang berada di sekitarnya dengan mempertimbangkan korelasi spasial yang ada dalam data tersebut.

Gambar 7 menunjukkan nilai-nilai korelasi dan RMSE hasil model WRF dengan data stasiun pengukuran (dilambangkan dengan bendera hijau pada Gambar 2) yang sudah diinterpolasi seluruh Indonesia. Untuk korelasi, warna merah menunjukkan tempat-tempat dengan nilai korelasi tinggi, sedangkan warna kuning menunjukkan nilai korelasi rendah. Makin tinggi nilai korelasi artinya hasil model makin baik pada tempat tersebut. Untuk RMSE, warna merah menunjukkan tempat-tempat dengan nilai RMSE tinggi, sedangkan warna kuning menunjukkan nilai RMSE

rendah. Makin rendah nilai RMSE artinya hasil model makin baik pada tempat tersebut.

Dari hasil korelasi dan RMSE, kita dapat melihat bahwa daerah dengan hasil model terbaik adalah daerah Indonesia bagian tenggara, yaitu NTT, Maluku Selatan, dan pulau-pulau disekitar laut Banda, laut Timor, dan laut Arafuru. Daerah lainnya dengan hasil model cukup baik adalah Kepulauan Riau, Pulau Belitung, Pulau Jawa, Bali, NTB, Pulau Karimun Jawa, Pulau Bawean, Aceh Utara dan Sulawesi Utara.

Dikarenakan Indonesia belum memiliki satison meteorologi *offshore*, maka verifikasi model dengan data pengukuran kecepatan angin *offshore* menggunakan data pengukuran kecepatan angin yang dilakukan P3GL-KESDM. Pengukuran angin dilakukan P3GL menggunakan alat *Weather Station* merk *Davis* pada ketinggian 10 meter di atas

muka laut rata-rata (MSL). Pengukuran parameter angin meliputi arah dan kecepatan. Kecepatan angin yang direkam adalah kecepatan angin rata-rata dan yang tertinggi dalam interval waktu 10 – 15 menit. Selama periode model tahun 2000 – 2015, P3GL tercatat telah melakukan pengukuran di 11 lokasi seperti yang ditunjukkan lambang bendera berwarna merah pada Gambar 2.

Hasil korelasi dan RMSE antara model dan pengukuran dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan verifikasi, model pada ketinggian 10 m overestimasi terhadap data pengukuran dengan RMSE berada pada kisaran 1,26 m/s – 2,45 m/s. Meskipun hasil model cenderung *over-forecast*, tetapi model cukup baik dalam menggambarkan kejadian angin ekstrem. Hal ini mengindikasikan bahwa model sudah mampu memperhitungkan efek topografi wilayah *offshore* yang kompleks.

Tabel 2. Lokasi pengukuran P3GL dan hasil korelasi dan RMSE

No	Lokasi	Periode	Korelasi	RMSE
1	Selat Toyopakeh, Klungkung, Bali	10 Agustus -03 September 2015	0.526864	1.263725
2	Selat Molo, Manggarai Barat, NTT	22 Oktober - 25 Oktober 2011	0.463313	1.832751
3	Selat Larantuka, Flores Timur, NTT	1 Januari 2007 - 31 Desember 2011	0.458291	1.678291
4	Selat Boleng, Lembata, NTT	21 Maret - 27 Maret 2012	0.537612	2.064782
5	Selat Mansuar, Papua	10 April - 25 April 2013	0.559638	1.302804
6	Natuna, Kepulauan Riau	21 Mei - 2 Juni 2014	0.487216	2.289365
7	Selat Sugi, Kepulauan Riau	6 Juni - 17 Juni 2014	0.512994	2.451745
8	Lirung, Kep. Talaud, Sulawesi Utara	8 Oktober - 19 Oktober 2014	0.301835	2.109482
9	Teluk Papela, Rote Timur	19 September - 1 Oktober 2012	0.421472	1.822736
10	Pulau Nongsa Natuna	13 Mei - 28 Mei 2014	0.667935	2.398587
11	Pulau Subi Natuna	26 April - 9 Mei 2012	0.628492	1.930847

#### 4. Kesimpulan

Identifikasi awal berdasarkan peta hasil simulasi kecepatan angin maksimum Indonesia terjadi di periode JJA. Lokasi *onshore* yang memiliki potensi energi angin cukup tinggi dengan kecepatan angin 6 – 8 m/s, rapat daya 400 – 500 watt/m<sup>2</sup>, dan AEP 4 – 5 GWh/tahun terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, dan NTT. Sedangkan lokasi *offshore* yang memiliki kecepatan angin lebih dari 8 m/s, rapat daya 500 – 600 watt/m<sup>2</sup>, dan AEP 5 – 6 GWh/tahun terjadi di *offshore* Banten, *offshore Sukabumi*, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, dan *offshore* Kab. Jeneponto, dan *offshore* Kab.

Kepulauan Tanimbar. Penelitian dan studi kelayakan lebih lanjut diperlukan untuk menunjang identifikasi awal ini. Selain itu dibutuhkan simulasi dengan resolusi yang lebih tinggi pada daerah-daerah potensial agar dapat menghasilkan rekomendasi kebijakan yang lebih meyakinkan.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada P3TKEBTKE-KESDM dan Puslitbang Geologi dan Kelautan (P3GL-KESDM) yang telah bekerjasama dalam penyediaan model dan data verifikasi model.



## Rujukan

- Akour, S.N., Al-Heymari, M., Ahmed, T., Khalil, K.A., 2018. *Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions*. Renewable Energy 116, 215-223.
- Ameldam, P., 2012. *Pengujian Data NCEP-FNL Dan CCMP Untuk Potensi Energi Angin (Studi Kasus Di Jawa Barat)*, Skripsi ITB.
- Arapogianni A, dkk., 2013. *Deep Water; The next step for offshore wind energy*. European Wind Energy Association (EWEA).
- Carta, J.A., Velázquez, S., Cabrera, P., 2013. *A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site*. Renewable Sustainable Energy Reviews 27, 362-400.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Santos, C.S., 2014. *Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: comparison with observed data in the Iberian Peninsula*. Applied energy 134, 57-64.
- Evangelia-Maria Giannakopoulou, Regis Nhili, 2014. *"WRF Model Methodology for Offshore Wind Energy Applications"*, *Advances in Meteorology*, vol. 2014, ArticleID 319819, 14 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/319819>
- Hesty, N.W., Hadi, T.W., 2015. *Reanalysis weather research and forecast-four dimension data assimilation (WRF-FDDA) untuk meningkatkan akurasi estimasi potensi energi angin di daerah lepas pantai (studi kasus: pantai selatan Jawa Barat)*. Jurnal Sains Dirgantara 13.
- Jin SL, Feng SL, Wang B., 2014 *Assessment of offshore wind resource in China using CFSR data*. Adv Mater Res 1070–1072:303–308.
- Ko, D.H., Jeong, S.T., Kang, K.S., 2015. *Assessment of Offshore Wind Power Potential in the Western Seas of Korea*. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers. pp. 266~273, <http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2015.27.4.266>
- Li, H., Chen, Z., 2008. *Overview of different wind generator systems and their comparisons*. IET Renewable Power Generation 2, 123-138.
- Martosaputro, S., Murti, N., 2014. *Blowing the wind energy in Indonesia*. Energy Procedia 47, 273-282.
- Shimada S., Oshawa T., Yatsu K., 2009: *A study on the ability of the mesoscale model MM5 for offshore wind resource assessment in Japanese coastal waters*, European Wind Conference (EWEC) 2009, September 16-19 2009 Stockholm, Sweden.
- Talam E. Kibona, 2020. *Application of WRF Mesoscale Model for Prediction of Wind Energy Resources in Tanzania*, *Scientific African*, 10.1016/j.sciaf.2020.e00302,(e00302)

