Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi **e-ISSN**: 2549-4236, **p-ISSN**: 1411-8939
Lembaga Penellitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
Vol 23, No 3 (2023): Oktober, 2768-2775
DOI: 10.33087/jiubj.v23i3.3933

Analisis Teknis dan Ekonomi dalam Pemanfaatan Area Sekitar Anjungan Lepas Pantai di Laut Jawa untuk Memproduksi Listrik Hijau dengan Turbin Angin Lepas Pantai

Resistentio Vembre Franika*, Mohammad Kholid Ridwan, Abram Perdana
Fakultas Teknik, Program Studi Magister Teknik Sistem, Universitas Gadjah Mada
Fakulatas Teknik, Program Studi Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada
Renewable Energy Systems Ltd, Inggris raya
*Correspondence: resistentiougm@gmail.com

Abstrak. Produksi listrik hijau dengan turbin angin lepas pantai merupakan opsi potensial untuk meningkatkan penetrasi energi terbarukan di Indonesia. Kodisi geografis Indonesia yang memiliki 70 persen lautan menjadikan pemanfaatan turbin angin lepas pantai ini menarik untuk diteliti lebih lanjut. Dalam penelitian ini, area lautan yang akan dipakai merupakan anjungan Southeastai Papa yang dari segi keekonomian operasi sudah menurun sehingga dapat dialih fungsikan menjadi *sub-stasion* lepas pantai untuk gardu listrik sebelum dikirimkan ke *sub-stasion* di darat dengan jarak 40 km dan kedalaman laut 35 m. Studi diawali dengan analisis kondisi meteo data area sekitar anjungan lepas pantai yang menghasilkan data kecepatan angin rata-rata sebesar 5,5 m/s (untuk ketinggian 119 meter) dan frekuensi arah angin terbesar dari arah East Southeast (ESE). Selanjutnya, analisa ladang angin menunjukan arah ladang angin dengan turbin Vestas V162-7.2 MW terbaik adalah pada arah East Northeast (ENE) - West Southwest (WSW) dengan potensi pembangkitan energi sebesar 141.656,9 MWh/tahun dan wakeloss 10% untuk kapasitas pembangkit 100,8 MW. Untuk menentukan keekonomian dilakukan analisa dengan mengunakan LCOE dan NPV yang menghasilkan nilai produksi listrik hijau (LCOE) sebesar $0,192/kWh dan dalam menentukan kelayakan investasi dilakukan analisa NPV yang menghasilkan nilai jual listrik hijau dengan turbin angin lepas pantai sebesar $0,271/kWh.

Kata kunci : turbin angin lepas pantai, ladang angin, listrik hijau

Abstract. *Green electricity production with offshore wind turbines is a potential option to increase renewable energy penetration in Indonesia. Indonesia's geographical condition which has 70 percent of the ocean makes the offshore wind turbines interesting for further research. In this study, the area of the ocean that will be used is Papa's offshore platform, which from an operational economic point of view has decreased so that it can be converted into an offshore sub-station for an electricity substation before being sent to a sub-station on land with distance of 40 km and sea depth of 35 m. The study begins with an analysis of the meteo data conditions of the area around the offshore platform which produces an average wind speed of 5.5 m/s (for a height of 119 meters) and the greatest frequency of wind directions from the East Southeast (ESE) direction. Furthermore, the wind farm analysis shows that the best wind farm direction with the Vestas V162-7.2 MW turbine is in the East Northeast (ENE) - West Southwest (WSW) direction with an energy generation potential of 141,656.9 MWh/year and a wake loss of 10% for a generating capacity of 100 .8MW. To determine the economy, an analysis was carried out using LCOE and NPV which resulted in a green electricity production value (LCOE) of $0.192/kWh and in determining investment feasibility an NPV analysis was carried out which produced a selling value of green electricity with an offshore wind turbine of $0.271/kWh.*

Keywords *: offshore wind turbine, wind farm, green electricity.*

PENDAHULUAN

Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan suatu rencana yang disepakati oleh para pemimpin dunia (termasuk Indonesia), dalam aksi global untuk mengakhiri kemiskinan, mengurangi kesenjangan masyarakat dan melindungi lingkungan. Ekonomi, masyarakat dan lingkungan menjadi sebuah elemen penting, dengan memastikan berjalannya elemen-elemen tersebut tanpa mengancam ekosistem alam adalah kunci keberhasilan pembangunan berkelanjutan (Bugaje, 2006). Hari ini, emisi dari bahan bakar fosil yang terdiri dari komponen pencemar, seperti CO_2, CO, NO_x, SO_x, dan abu secara terus menerus mencemari lingkungan sehingga mengancam ekosistem alam (Roula & Dogan, 2018). Tujuan bersama dalam Perjanjian Paris untuk membatasi suhu bumi sebesar $1,5^0$C pada tahun 2030 diperlukan pengurangan emisi CO_2 sebesar 45% (Paris

Agreement, 2022). Meninjau kondisi tersebut, maka energi terbarukan dapat memeberikan peran penting dalam meningkatkan ekonomi hijau, meningkatkan ketahanan dan aksesibilitas energi, serta mengurangi pemanasan global (Kumar & Majid, 2020); (Alharthi & Taskin, 2021).

Dalam proses produksi listrik hijau dengan pemanfaatan energi angin lepas pantai merupakan opsi potensial untuk meningkatkan penetrasi energi terbarukan di Indoensia. Hal ini didukung dengan kondisi geografis Indonesia yang memiliki 70 persen adalah lautan yang menjadikan opsi pemilihan tempat lepas pantai akan menguntungkan dari segi pemanfaatan area yang ada. Salah satu area lepas pantai yang potensial dimanfaatkan untuk produksi listrik hijau adalah area sekitar anjungan lepas pantai Papa karena letaknya yang dekat sekitar 40 km dari ibukota Jakarta. Selain itu, pemanfaatan anjungan lepas pantai ini bisa mengunakan anjungan yang telah melewati masa keekonomian produksi. Selanjutnya dengan meninjau kondisi tersebut menjadikan pemanfaatan anjungan area sekitar anjungan lepas pantai ini menjadi tempat produksi listrik hijau layak diperhitungkan menjadi sebuah pilihan dengan memperhatikan keuntungan secara ekonomi dan potensinya. Tujuan penelitian yang ingin dicapai dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui berapa potensi energi angin yang tersedia di area sekitar Anjungan lepas pantai Papa, mengetahui berapa energi listrik hijau yang dapat dibangkitkan secara optimum oleh pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai kapasitas 100MW pada area sekitar anjungan Papa dan mengetahui nilai jual listrik hijau yang layak secara ekonomi dan teknis dalam alih fungsi anjungan lepas pantai untuk memproduksi listrik hijau berbasis turbin angin lepas pantai.

METODE

Dalam penelitian ini untuk mencapai penyelesaian masalah dan memperoleh hasil yang baik sesuai dengan tujuan penelitian digunakan sebuah metode penelitian. Untuk membantu memperoleh data-data yang diinginkan, digunakanlah software WindPro 3.5 dan *vessel monitoring sistem* (VMS) di anjungan lepas pantai. Tahapan prosesnya pertama dibuatlah skenario penempatan komponen dalam sistem pembangkitan listrik hijau lepas pantai dengan turbin angin. Kemudian, akan dlakukan analisa produksi energi tahunan di sisi pembangkitan, serta informasi teknis dan metode perhitungan biaya pemeliharaan peralatan investasi dan operasi. Bagian 3 secara khusus memperkenalkan produksi energi tahunan di sisi pembangkitan. Bagian 4 menyajikan metode evaluasi kinerja tekno-ekonomi untuk listrik hijau dengan informasi teknis dan metode perhitungan biaya pemeliharaan peralatan investasi dan operasi serta ditutup dengan penentuan nilai jual listrik hijau dengan menilai kelayakan investasi menggunakan NPV.

Tahapan proses tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Skenario Produksi Listrik Hijau
   Anjungan lepas pantai akan dimanfaatkan menjadi *offshore sub-stasion* yang berfungsi sebagai stasiun pengumpul energi listrik dari turbin angin lepas pantai sebelum dikirim ke pelanggan di Jakarta dengan kabel bawah laut. Penempatan posisi ladang angin akan disesuaikan dengan kondisi bawah laut yang terbesar dari jalur pelayaran dan area pipa distribusi minyak.
2. Perhitungan Meteo Data
   Meteo data merupakan sebuah data meteorologi dari sebuah potensi kecepatan angin pada koordinat yang sudah ditentukan yang mana data tersebut menjadi acuan dasar dalam analisa daya output listrik hijau dari turbin angin lepas pantai. Proses dimulai dengan proyeksi koordinat lokasi yang selanjutnya dimasukan dalam dalam sistem *software* WIndPRO 3.5. *software* WindPRO Sendiri merupakan sebuah *software* untuk menghitung potensi energi angin dengan mengunakan modul WaSP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) sebagai basis kalkulasi (Argin et al, 2019).
3. Perhitungan Daya Output Ladang Angin
   Dalam menghitung daya output turbin angin tahunan, namun terlebih dahulu menentukan jenis turbin angin yang akan digunakan pada penelitian ini, ditentukan turbin angin jenis Vestas V162-7.2 MW. Daya output turbin angin bergantung pada kerapatan udara dan kecepatan angin. Untuk perhitungan energi tahunan dari windfarm, digunakan juga software WindPro 3.5. salah satu fungsi perangkat lunak ini digunakan untuk merancang dan menganalisis ladang angin lepas pantai dan darat. Pertama setelah pemodelan energi angin dilakukan, ditentukan terlebih dahulu jenis turbin angin

yang akan digunakan, pada penelitian ini ditentukan turbin angin Vestas V162-7.2 MW. Selanjutnya, ditentukan juga desain ladang angin yang mana dalam penelitian ini mengunakan model *grid* dasar. Kemudian dilakukan analisis ladang angin yang menghasilkan tampilan produksi listrik tahunan dan *wake loss* di ladang angin tersebut.

4. Perhitungan keekonomian Fasilitas Produksi Listrik hijau
   Dalam menentukan nilai keekonomian dari listrik hijau tersebut, didapatkan dengan mengikuti alur perhitungan biaya kapital (CAPEX) dan biaya operasional (OPEX) dari turbin angin, dan kabel ele. Adapun biaya turbin angin tersebut ditentukan dengan pendekatan proyek-proyek yang sudah dilakukan. Berdasarakan *guideline BVG Associates* dalam instalasi sebuah turbin angin lepas pantai terdapat beberapa komponen biaya yang mengikat selain biaya turbin angin sendiri, diantaranya biaya manajemen proyek (12% dari biaya turbin angin), biaya kabel penghubung dan pondasi (31.7%), dan Instalasi dan komisioning (18,85%) (Wind Farm costs, 2023). Berdasarakan data Thunder Said Energy harga turbin angin lepas pantai sebesar $ 1.500 per kilowatt (Thunder Said Energy, 2023).

Tabel 1
Biaya Turbin Angin Lepas Pantai

komponen	Sub-komponen	biaya (ribu $)/ MW
Turbin angin	Nacelle; Rotor; turbin menara	1.500
manajemen proyek	Survei lingkungan; survei geologi dan hidrologi; penilaian sumber daya dan metocean; Teknik dan kosultansi.	180
sistem pendukung	Pondasi turbin; Kabel array, sub-stasion.	475,5
Instalasi dan commissioning	Instalasi Turbin angin; Instalasi sub-stasion; Instalasi pondasi, logistik lepas pantai	282,75
Pengeluaran Operasi dan Pemeliharaan (OPEX)	Pelatihan, logistik, Inspeksi HSE, perawatan turbin angin.	1,5% dari CAPEX
Penonaktifan	turbin, pondasi, kabel *array, penonaktifan gardu induk*	13,9% dari CAPEX

Sumber: Wind Farm costs (2023); Thunder Said Energy (2023).

Sedangkan, biaya kabel bawah laut untuk transportasi listrik rata-rata adalah 2,5 juta $/km, dan biaya pemeliharaan menyumbang 0,5% dari total biaya investasi tahunan (Argin, et al, 2019). Dalam studi ini, model NPV dan LCOE dikembangkan untuk mengevaluasi kinerja ekonomi dalam skenario turbin angin lepas pantai, dan umur komponen ini diasumsikan 25 tahun dengan *discount rate* 6%.

$$LCOE\ (\$/MWh) = \frac{INV_o + \sum_{t=1}^{T} \frac{OM_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{AEP_t}{(1+r)^t}}$$

Dimana, OM_t adalah biaya operasional dan pemeliharaan tahunan, dan AEP_t merupakan produksi listrik tahunan ladang angin lepas pantai, r merupakan *discount rate* dan t adalah tahun serta INV_0 mewakili biaya awal investasi. Indikator NPV dievaluasi dengan selisih antara nilai arus kas masuk dan keluar saat ini dalam siklus hidup proyek dikurangi biaya investasi, dan kemudian dibagi dengan tingkat diskonto pembangkit listrik.

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{NetIncome(t)}{(1+r)^t} - INV_0$$

Dimana, *net Income* merupakan nilai pendapatan kotor dikurangi pengeluaran pada tahun t.

HASIL

Dalam penelitian ini ditujukan mendukung transisi energi dengan merencanakan produksi energi baru terbarukan yang memanfaatkan anjungan lepas pantai yang sudah tidak ekonomis lagi dalam produksinya. Program *life extension* anjungan lepas pantai diasumsikan telah dilakukan hingga masa pakai anjungan hingga 30 tahun kedepan. Studi kelayakan dalam rangka *life extension* platform lepas pantai sudah sering dilakukan dimana prosenya diawali dengan inspeksi awal meliputi stuktur atas dan substuktur guna untuk menegetahui kondisi eksisting platform, selanjutnya evaluasi dengan melakukan analisis struktur (inplace dan seismic), menghitung sisa umur kelelahan (fatigue) platform, serta menghitung cadangan kekuatan (pushover) struktur. Dari hasil analisa ini kemudian dapat

diketahui komponen-komponen struktural yang mengalami kritis, inilah yang akan ditindaklanjuti dalam studi life extension platform. Adapun langkah selanjutnya berupa mendesain elemen penguatan yang bersifat lokal, melakukan justifikasi beban, merencanakan kegiatan inspeksi lanjutan, melakukan pemeriksaan non-destruktif dari material baja struktural, melakukan uji dan antisipasi mekanik dan kimia, melakukan penilaian korosi, melakukan perbaikan material baja, dan melakukan pembersihan terhadap biota laut. Dengan begitu dapat direncanakan suatu langkah antisipasi, modifikasi maupun perbaikan yang tepat terkait rekualifikasi platform sebelum dioperasikan Kembali untuk perpanjangan masa layan tertentu (Tekniklepaspantai.itb.ac.id, 2023)

Tabel 2
Data Lingkungan Anjungan Papa dan Properti Turbin Angin

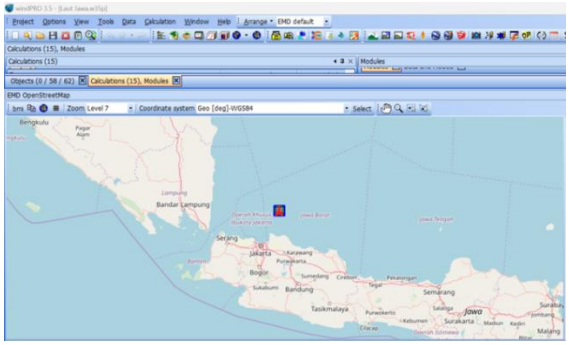
No	Data Lingkungan	
1	Koordinat Lokasi	E: 107,2 ^{0}E dan S: 5,46 ^{0}S
2	Kedalaman Laut	30 Meter
3	Jarak ke Jakarta	40 km
Data Properti Turbin Angin		
No	VESTAS V162-7.2 MW	
1	Diameter rotor	162 m
2	Daya Output Standar	7200 kW
3	*Cut in*	4 m/s
4	*Cut off*	25 m/s
5	*Swept Area*	20.612 m^2
6	Rekomendasi Tinggi hub	119 m
7	Kebisingan	105.5 dB (max)
8	Frekuensi	50/60 Hz

Sumber: data olahan

Pembangunan turbin angin lepas pantai di area anjungan Papa akan dianalisa secara ekonomi apakah dapat diterapkan atau tidak. Data-data yang diperoleh selama melakukan pengumpulan data berupa data lingkungan seperti data koordinat lokasi, kedalaman laut, dan jarak anjungan dengan Jakarta selain itu data properti turbin angin yang akan digunakan di area anjungan lepas pantai Papa.

Analisa Meteo Data

Analisa Meteo adalah sebuah pengolahan data di software WindPRO 3.5 untuk mengetahui potensi energi angin yang tersedia. Sebelumnya titik koordinat area anjungan Papa akan dimasukan ke dalam software yang akan menampilkan titik yang akan dianalisa lebih lanjut.



Sumber: data olahan

Gambar 1
Input data koordinat area Papa di WindPro 3.5.

Selanjutnya, data turbin Vestas V162-7.2 MW dan ketinggian hub 119 m yang merupakan rekomendasi untuk turbin angin tersebut dimasukan kemudian dari hasil pengolahan meteo data dengan software WindPRO 3.5 tersaji hasil pengolahan dimana kecepatan rata-rata adalah sebesar 5,5 m/s dan terlihat juga frekuensi arah angin terbesar adalah East Southeast (ESE) dengan frekuensi sebesar 25,2%. Kecepatan angin terbesar berada dari arah west northwest (WNW) dengan 6,38 m/s. Berdasarkan analisa produksi dari meteo data akan menghasilkan nilai produksi listrik tahunan untuk semua sektor arah angin apabila turbin vestas V162-7.2 MW dipasang di area tersebut adalah 11.684,3 MWh/tahun dengan spesifikasi energi 567 kWh/m^2.

Analisa Ladang Angin (Park Analysis)

Dalam penelitian ini, ladang angin yang digunakan adalah model basic grid dimana bentuknya seperti formasi persegi dengan megikuti aturan jarak antra turbin 7D vertikal dan 5D horizontal. Luas area yang diperlukan

dan turbin angin Vestas V162-7.2 MW sebesar 2,5kmx3,4km.



Sumber: data olahan

Gambar 2
Peta Penempatan Ladang Angin di Area Anjungan Lepas Pantai Papa

Ladang angin ini akan ditempatkan di arah tenggara anjungan Papa dengan jarak dari anjungan sekitar 2 km, pemilihan lokasi ini karena mempertimbangkan dari jalur pipa bawah laut dan jalur transpirtasi laut. dari gambar 4.6 dapat kita lihat garis biru putus-putus merupakan jalur transportasi laut dan garis tegas warga ungu merupakan jalur pipa bawah laut. Area tersebut memiliki luas 10kmx10km. sehingga cukup untuk area *covering* pembangunan dan pengembangan turbin angin lepas pantai. Dalam penentuan formasi ini mengikuti pendekatan kapasitas turbin angin yang akan dibangun yang selanjutnya dari formasi tersebut dianalisa dimana titik turbin angin dalam ladang angin tersebut yang memiliki *wakeloss* tertinggi yang nantinya dihilangkan untuk penyesuaian kebutuuhan kapasitasnya. Pada turbin angin Vestas V162-7,2 MW memiliki formasi 4X4 dengan jarak total untuk horizontal 810 m dan vertikal 1.134 m yang memiliki kapasitas pedekatan 115,2 MW.

Berdasarkan penelitian Kazacoks (n.d), terdapat pengaruh arah datangnya angin pada efisiensi daya produksi dari suatu ladang angin. Oleh karena itu, dalam penelitian ini formasi ladang angin akan diolah dengan mengubah-ubah arah formasi ladang angin mengikuti arah-mata angin hingga mendapatkan nilai produksi terbesar dengan *wakeloss* terkecil. Dari arah formasi ladang angin dengan hasil produksi terbaik tersebut, selanjutnya kapasitas tersebut akan dikurangi turbin anginnya pada titik tertentu yang memiliki nilai *wakeloss* terbesar hingga kapasitas total ladang angin sesuai perencanaan yaitu kapasitas 100 MW. Selanjutnya kapasitas 100 MW turbin angin ini dianalisa kembali untuk mengetahui berapa nilai produksi listrik tahunan setelah dikurangi nilai *wakeloss.*

Analisa Produksi Ladang Turbin Angin Vestas V162-7.2 MW

Berdasarkan Tabel 3 didapatkan jika orientasi arah ladang angin terbaik untuk ladang angin dengan turbin angin Vestas V162-7.2 MW berada pada arah East Northeast - West Southwest (ENE-WSW) dengan wakeloss hanya 10 persen (18.701,8 MWh/tahun) yang menghasilkan energi tahunan sebesar 168.247,7 MWh/tahun untuk kapasitas total turbin (115,2 MW). Sehingga dipilihkan desain formasi pada arah ini menjadi desain ladang angin yang selanjutnya akan dioptimisasi menjadi kapasitas 100 MW dengan pengurangan turbin angin pada formasi grid yang memiliki *wakeloss* tertinggi.

Tabel 3
Hasil Analisa Produksi Tahunan Berdasarkan Variasi Orientasi Arah Ladang Angin Turbin Vestas V162-7.2 MW

Arah Ladang Angin	Output energi Farm (MWh/tahun)	prersen *wakeloss*
S-N	163.470,7	12,56
SSE-NNW	167.184,7	10,57
SE-NW	165.340,1	11,56
ESE-WNW	163.545,0	12,52
E-W	163.714,1	12,43
ENE-WSW	168.247,7	10,00
NE-SW	163.758,5	12,40
NNE-SSW	161.142,9	13,80

Sumber: data olahan

Analisa Produksi Ladang Turbin Angin Vestas V162-7.2MW (100.8 MW)

Dalam mengurangi jumlah turbin, terdapat data yang bisa kita jadikan acuan, yaitu data produksi masing-masing turbin. Dari sini dipilihlah turbin dengan *wakeloss* tertinggi untuk dihilangkan dalam formasi grid. Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa jika turbin nomor 8 dan 11 memiliki nilai *wakeloss* tertinggi masing-masing sebesar 13% dan 14,8%.

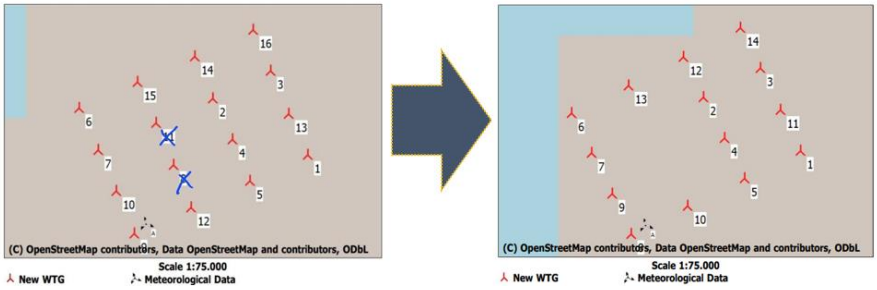
Kemudian kedua turbin ini dihilangkan dalam formasi grid.

Calculated Annual Energy for each of 16 new WTGs with total 115,2 MW rated power

Links	WTG type Valid	Manufact.	Type-generator	Power, rated	Rotor diameter	Hub height	Power curve Creator	Name	Annual Energy Result	Result-10,0%	Wake loss	Free mean wind speed
				[kW]	[m]	[m]			[MWh/y]	[MWh/y]	[%]	[m/s]
1 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.636,5	9.573	9,0	5,51
2 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.090,0	9.081	13,6	5,51
3 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.838,2	9.754	7,2	5,51
4 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.182,2	9.164	12,9	5,51
5 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.620,0	9.558	9,1	5,51
6 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.267,6	9.241	12,1	5,51
7 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.250,0	9.225	12,3	5,51
8 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.170,6	9.154	13,0	5,51
9 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	11.297,6	10.168	3,3	5,51
10 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.563,7	9.507	9,6	5,51
11 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	9.956,7	8.961	14,8	5,51
12 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.774,3	9.697	7,8	5,51
13 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.641,4	9.577	8,9	5,51
14 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.446,8	9.402	10,6	5,51
15 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	10.175,6	9.158	12,9	5,51
16 A	Yes	VESTAS	V162-7.2-7.200	7.200	162,0	119,0	EMD	Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022	11.336,5	10.203	3,0	5,51

Sumber: data olahan

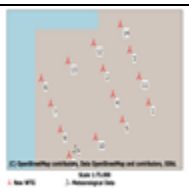
Gambar 3
Hasil Analisa Produksi Energi Tahunan Masing-masing Turbin Angin



Sumber: data olahan

Gambar 4
Formasi Grid Baru Setelah dihilangkan 2 Turbin Angin

Tabel 4
Hasil analisa Ladang Turbin Angin Vestas V162-7.2 MW (100,8 MW)

Orientasi Arah Ladang Angin	Gambar Wind Farm	Total Energi (MWh/tahun)	Wake loss (MWh/tahun)	Output energi Farm (MWh/tahun)	prersen wakeloss
ENE-WSW (Kapasitas 100,8 MW)		163.580,8	13.274,0	150.306,8	8,11

Sumber: data olahan

Setelah dipilih ladang angin dengan Turbin Vestas V162-7,2 MW, maka berdasarkan analisa diatas maka nilai *wakeloss* akan turun menjadi 13.274 MWh/tahun (8,11%) dengan produksi energi tahunan sebesar 150.306,8 MWh/tahun. Dengan rugi-rugi elektrik di transformer dan kabel penghubung antar turbin sebesar 2,84% (Leithead et al, n.d). dan availability turbin angin vestas 97% (Vestas Full Maintenance Concepts, 2023) didapatkan energi tahunan sebesar 141.656,9 MWh/tahun.

Analisis Investasi Ladang Angin Lepas Pantai

1. Analisis Biaya Peralatan
   a. Biaya Turbin Angin Lepas Pantai. Semua skenario dalam penelitian ini mengunakan turbin angin lepas pantai dengan perhitungan biaya untuk kapasitas 100,8 MW didapatkan biaya investasi awal sebesar $245.775.600,00 biaya perawatan setiap tahun $3.686.634,00/tahun dan biaya

decommissioning sebesar $48.062.808,40 diakhir tahun investasi.

b. Biaya Kabel Bawah Laut. Jika jarak antara anjungan Papa dengan *Onshore sub-stasion* (muara karang Jakarta) sepanjang 40 km dan biaya investasi rata-rata kabel HVAC adalah sama dengan 2.500.000 $/km, dan biaya pemeliharaan menyumbang 0,5% dari total biaya investasi tahunan (Argin et al, 2019)

c. Maka didapatkan biaya investasi awal kabel bawah laut sebesar $100.000.000 dan biaya operasi serta perawatannya sebesar $500.000 setiap tahunnya.

2. Perhitungan LCOE. Berdasarkan hasil perhitungan sesuai persamaan 1, Dapat dilihat jika LCOE (biaya energi) dari sebuah skenario turbin angin lepas pantai untuk memproduksi listrik hijau hingga pelanggan di darat adalah $ 0,192/kWh. Secara hasil didapatkan hasil jauh lebih tinggi dari penelitian terdahulu (Giampieri A, et al, 2023), dimana nilai LCOE untuk proyek turbin angin lepas pantai yang dibangun tahun 2025 di Ingris dengan nilai rata-rata sebesar $0,08/kWh (Giampieri et al, 2023).
3. Perhitungan Harga Jual Listrik Hijau. Dengan analisa NPV jika acuan harga jual sama dengan biaya produksi energi (LCOE) maka dari persamaan 2 akan menghasilkan nilai NPV minus (< 0) sehingga investasi ini tidak layak. Untuk menjadikan nilai ini layak perlu ditambahkan margin keuntungan hingga didapatkan nilai NPV positif. dimana margin keuntungan yang dibutuhkan untuk ditambahkan dalam biaya energi (LCOE) agar nilai NPV bisa benilai positif (layak investasi) adalah 41% dengan demikian harga jual listrik yang dalam kategori menguntungkan untuk investasi dalam proyek ini adalah $0,271/kWh.

SIMPULAN

Hasil penelitian ini mengungkapkan bahwa analisis teknik dan ekonomi dalam pemanfaatan anjungan lepas pantai di laut jawa menjadi produsen hidrogen listrik hijau dengan turbin angin lepas pantai diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Area anjungan lepas pantai Papa yang akan direncanakan dipasang turbin angin lepas pantai memiliki potensi kecepatan angin rata-rata adalah sebesar 5,5 m/s dan frekuensi arah angin terbesar adalah East Southeast (ESE) dengan frekuensi sebesar 25,2%.
2. Ladang angin dengan turbin angin Vestas V162-7,2 MW kapsitas100,8 MW yang dipasang di sisi tenggara anjungan Papa dengan orinetasi arah East Northeast – West Southwest (ENE-WSW) memiliki wakeloss sebesar 10% dan didapatkan nilai produksi tahunan optimum sebesar 141.656,9 MWh/tahun dengan memperhitungkan nilai *availability* turbin angin dan rugi-rugi jaringan ladang angin.
3. Dengan Perhitungan biaya investasi dan biaya operasional serta perawatan tahunan pada sistem pembangkitan listrik hijau didapatkan biaya produksi listrik (LCOE) sebesar $ 0,192/kWh dan dengan analisa NPV menghasilkan nilai jual listrik yang layak investasi adalah sebesar $ 0,271/kWh.

DAFTAR PUSTAKA

Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., & Cali, U. 2019. Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33–46.

C.R. KumarJ, M.A. Majid, 2020, Renewable energy for sustainable development in India: current status, future prospects, challenges, employment, and investment opportunities, *Energ Sustain Soc*, 10(2)

Giampieri, A., Ling-Chin, J., & Roskilly, A. P. 2023. Techno-economic assessment of offshore wind-to-hydrogen scenarios: A UK case study. *International Journal of Hydrogen Energy*.

I.M. Bugaje, 2006, Renewable energy for sustainable development in Africa: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 10, 603–612.

Leithead, W. E., Kazacoks, R., Amos, L. J., Amos, L., & Leithead, W., n.d.. Effect of wind flow direction on the loads at wind farm Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbines View project The Smart Rotor Wind Turbine View project Effect of wind flow direction on the loads at wind farm Effect of wind flow direction on the loads at wind farm.

M. Alharthi, E. Dogan, D. Taskin, 2021, Analysis of CO2 emissions and energy consumption by sources in MENA countries: evidence from quantile regressions, Environ. *Sci. Pollut. Res*, 28

Paris agreement, 2022, Available online: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-p aris-agreement/the-paris-agreement

Roula Inglesi-Lotz, Eyup Dogan, 2018, the role of renewable versus non-renewable energy to the level of CO2 emissions a panel analysis of sub-Saharan Africa's Big 10 electricity generators, Renew. Energy 123, 36–43.

Research into the Wind Industry. Thunder Said Energy. 2023. Retrieved March 25, 2023, from https://thundersaidenergy.com/downloads/category/wind/.

Tekniklepaspantai.itb.ac.id. 2023. Retrieved April 23, 2023, from https://tekniklepaspantai.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/441/2022/03/15511026-Rido-Nursyahid-M.pdf.

Vestas Full Maintenance Concepts, (n.d), 97% availability guaranteed. Vestas full maintenance concepts, 97% availability guaranteed, Spares in Motion. Retrieved March 16, 2023, from https://www.sparesinmotion.com/wind-turbine-services/wind-turbine-maintenance/vestas-full-maintenance-concepts-97 availability.

Wind Farm costs. 2023, Wind farm costs – Guide to an offshore wind farm. Retrieved February 23, 2023, from https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind farm-costs.