



LAPORAN

Pengembangan Energi Angin Proyek 120 MW di Aceh, Aceh Besar 2024

Dokumen ini dibuat sebagai bagian dari Proyek 'Wind Energy Development in Indonesia: Investment Plan' oleh Southeast Asia Energy Transition Partnership (ETP)



ENERGY
TRANSITION
PARTNERSHIP

Powering Prosperity and Enabling Sustainability in South East Asia



UNOPS



Pondera

Kantor Pusat Belanda

Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 – pondera (088-7663372)
info@ponderaconsult.com

Mailbox 919
6800 AX Arnhem

Kantor Asia Tenggara

Jl. Mampang Prapatan XV no 18
Mampang
Jakarta Selatan 12790
Indonesia

Kantor Asia Timur Laut

Suite 1718, Officia Building 92
Saemun-ro, Jongno-gu
Provinsi Seoul
Republik Korea Selatan

Office Vietnam

7th Floor, Serepok Building
56 Nguyen Dinh Chieu Street, Da Kao Ward,
District 1 Ho Chi Minh City
Vietnam

Halaman judul

Jenis dokumen

Prospektus PLTB

Nama proyek

Aceh Besar, Aceh – 120 MW

Nomor versi

V5.0

Tanggal

31 Agustus 2024

Klien

UNOPS – ETP

Penulis

Pondera, Witteveen+Bos, BITA, dan Quadran

Diperiksa oleh

ETP

Sanggahan

Informasi yang diberikan dalam dokumen ini diberikan "sebagaimana adanya", tanpa jaminan dalam bentuk apa pun, baik tersurat maupun tersirat, termasuk, tanpa batasan, jaminan kelayakan untuk diperdagangkan, kesesuaian untuk tujuan tertentu, dan tidak adanya pelanggaran. UNOPS secara khusus tidak memberikan jaminan atau pernyataan apa pun mengenai keakuratan atau kelengkapan informasi tersebut. Dalam keadaan apa pun, UNOPS tidak akan bertanggung jawab atas segala kerugian, kerusakan, kewajiban, atau biaya yang dikeluarkan atau diderita yang diklaim sebagai akibat dari penggunaan informasi yang terdapat di sini, termasuk, tanpa batasan, segala kesalahan, kekeliruan, kelalaian, gangguan, atau penundaan sehubungan dengan hal tersebut. Dalam keadaan apa pun, termasuk namun tidak terbatas pada kelalaian, UNOPS atau afiliasinya tidak akan bertanggung jawab atas segala kerusakan langsung, tidak langsung, insidental, khusus, atau konsekuensial, meskipun UNOPS telah diberitahu tentang kemungkinan kerusakan tersebut. Dokumen ini juga dapat berisi saran, pendapat, dan pernyataan dari dan dari berbagai penyedia informasi. UNOPS tidak menyatakan atau mendukung keakuratan atau keandalan saran, pendapat, pernyataan, atau informasi lain yang diberikan oleh penyedia informasi mana pun. Ketergantungan pada saran, pendapat, pernyataan, atau informasi lain tersebut juga menjadi risiko pembaca sendiri. Baik UNOPS maupun afiliasinya, maupun agen, karyawan, penyedia informasi, atau penyedia konten masing-masing, tidak bertanggung jawab kepada pembaca atau siapa pun atas ketidakakuratan, kesalahan, kelalaian, gangguan, penghapusan, cacat, perubahan, atau penggunaan konten apa pun di sini, atau atas ketepatan waktu atau kelengkapannya.



ENERGY
TRANSITION
PARTNERSHIP



UNOPS



PONDERA





Daftar isi

1	Pendahuluan Prospektus PLTB	1
2	Analisis PLTB Aceh Besar, Aceh – 120 MW	2
2.1	Pengenalan lokasi PLTB	2
2.1.1	Lokasi geografis	2
2.1.2	Status dalam RUPTL PLN 2021-2030	3
2.1.3	Status pengembangan	6
2.2	Ketersediaan sumber daya angin dan penggunaan lahan	7
2.2.1	Pendekatan	7
2.2.2	Sumber daya dan karakteristik angin	8
2.2.3	Topografi	12
2.2.4	Penggunaan lahan	13
2.2.5	Persyaratan perizinan khusus	13
2.2.6	Area WTG final	15
2.3	Tata letak awal PLTB	16
2.4	Aksesibilitas PLTB	17
2.4.1	Keadaan transportasi Indonesia	17
2.4.2	Transportasi pelabuhan ke lokasi	18
2.4.3	Transportasi di dalam lokasi	23
2.5	Geologi dan kegempaan	26
2.5.1	Geologi	26
2.5.2	Kegempaan	28
2.6	Keanekaragaman hayati, kondisi sosio-ekonomi dan lingkungan	30
2.6.1	Kesan umum	30
2.6.2	Keanekaragaman hayati dan dampak lingkungan	30
2.6.3	Dampak sosial	32
2.7	Desain jaringan transmisi	37
2.7.1	Titik koneksi	37
2.7.2	Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi	38
2.8	Asesmen keluaran energi	39
2.8.1	Rugi-rugi energi	40
2.8.2	Keluaran energi termasuk ketidakpastian	44
2.8.3	Variasi keluaran daya	44
2.9	Asesmen kasus bisnis	45
2.9.1	Asumsi komponen	45
2.9.2	Asumsi biaya	49
2.9.3	Parameter keuangan	50
2.9.4	Hasil asesmen kasus bisnis	51
3	Kesimpulan dan Rekomendasi	52
4	Sanggahan	56



Daftar Gambar

Gambar 1. Peta Provinsi Aceh di mana wilayah dari PLTB Aceh Besar yang dibayangkan berada. ____	2
Gambar 2. Peta sistem kelistrikan Aceh di RUPTL (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). ____	4
Gambar 3. Proyeksi produksi listrik dan beban puncak di Aceh (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). ____	5
Gambar 4. Kapasitas pembangkit tambahan yang direncanakan untuk Aceh (IPP: <i>Independent Power Producer</i> ; Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). ____	5
Gambar 5. Area pencarian di Aceh dengan sebaran kecepatan angin. Kotak pembatas putus-putus berwarna ungu menunjukkan seluruh area pencarian. Bilah warna menunjukkan kecepatan angin rata-rata di atas 6 m/s pada ketinggian 100 m menurut klimatologi <i>Global Wind Atlas</i> (GWA). ____	8
Gambar 6. Tampilan yang diperbesar pada area pencarian di Aceh, dengan sebaran kecepatan angin. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG final yang memenuhi semua kriteria. Kecepatan angin rata-rata di atas ambang batas 6 m/s pada ketinggian 100 m ditampilkan berdasarkan GWA. ____	9
Gambar 7. Diagram mawar angin dengan arah angin dan kategori kecepatan angin berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF. ____	11
Gambar 8. Sebaran kecepatan angin sepanjang hari, divisualisasikan per bulan dalam setahun. Berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF. ____	11
Gambar 9. Topografi area WTG Aceh Besar, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut. ____	12
Gambar 10. Zona pengecualian di wilayah Aceh Besar berdasarkan penggunaan lahan, topografi, dan kawasan pemukiman. Sumber: perhitungan berdasarkan elevasi FABDEM, ESRI, dan OSM. ____	13
Gambar 11. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Aceh Besar (RTRW 2013-2033) ditumpuk dengan area WTG final di kabupaten tersebut ____	14
Gambar 12. Area WTG final berdasarkan kriteria pembatasan. Sumber: Google Satellite Images. ____	15
Gambar 13. Tata letak awal PLTB di area WTG final. ____	16
Gambar 14. Tata letak jalan khas di pedesaan Indonesia. Jalan berliku selebar ~ 6 hingga 7 m melayani lalu lintas lokal, regional, dan nasional. Kabel listrik udara dan telekomunikasi dengan tiang di kedua sisi jalan. Bangunan-bangunan berada dalam jarak yang dekat. Di dalam kota dan kota yang lebih besar, jalan pada umumnya sedikit lebih lebar, namun dengan lebih banyak kabel udara, tiang, dan papan reklame. ____	18
Gambar 15. Pelabuhan kontainer Malahayati. ____	19
Gambar 16. Rute dari Pelabuhan Malahayati ke titik akses lokasi PLTB. ____	20
Gambar 17. Jembatan dekat Pelabuhan Malahayati. ____	20
Gambar 18. Jembatan Krueng Cut di Banda Aceh. ____	21
Gambar 19. Jalan nasional di Banda Aceh yang dekat dengan lokasi proyek. Jalan melengkung lebar dan berkelok-kelok dengan lebar ~ 6 hingga 7 m yang melayani lalu lintas lokal, regional, dan nasional. Kabel listrik dan telekomunikasi udara dengan tiang di kedua sisi jalan. ____	21
Gambar 20. Belokan sempit di Banda Aceh. ____	22
Gambar 21. Jalan perumahan di lokasi proyek. ____	23
Gambar 22. Pemandangan lain dari jalan perumahan di lokasi proyek. ____	23
Gambar 23. Jalan akses internal di lokasi proyek. ____	24
Gambar 24. Topografi di lokasi proyek. ____	25
Gambar 25. Topografi pantai dan pegunungan yang berdekatan di lokasi proyek. ____	25
Gambar 26. Peta geologi wilayah Banda Aceh. Sumber: <i>The tectonic setting of northern Sumatra Aceh Province and geological map of Study area</i> (Bennet et al. 1981). ____	26



Gambar 27. Indeks kerentanan pergerakan tanah di Aceh.	27
Gambar 28. Lokasi umum sistem Sesar Besar Sumatra yang membentang di sepanjang pulau.	28
Gambar 29. Bahaya gempa bumi dan tingkat risiko di Aceh Besar.	29
Gambar 30. Lokasi turbin dan kawasan hutan di Provinsi Aceh.	30
Gambar 31. Pedesaan di wilayah proyek, bagian dari Kecamatan Lhoknga.	33
Gambar 32. Peta penggunaan lahan berdasarkan citra satelit (ESRI/Sentinel 2, 2023). Desa / bangunan dan tanaman terletak di tengah lembah yang dikelilingi langsung oleh hutan.	33
Gambar 33. Tepi pantai di desa pesisir Lampuuk (lihat lokasi relatif pada gambar sebelumnya).	34
Gambar 34. Laju pertumbuhan penduduk dan penduduk tahunan Aceh Besar pada tahun 2021-2022 (Sumber: Statistik Aceh Besar (bps.go.id)).	34
Gambar 35. Piramida penduduk di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2022 (Sumber: Badan Statistik Aceh Besar (bps.go.id)).	35
Gambar 36. Lokasi gardu induk PLN 150 kV Banda Aceh. Sumber: Google Maps.	38
Gambar 37. Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi di PLTB Aceh Besar yang dibayangkan.	38
Gambar 38. Representasi skematis dari posisi saluran transmisi udara antara rumah pembangkit dan gardu induk Banda Aceh.	39
Gambar 39. Hasil kecepatan angin rata-rata jangka panjang dari model ASPIRE pada ketinggian 140 m di lokasi-lokasi turbin. Lingkaran berbatas hitam mewakili turbin angin, sedangkan warna di dalam lingkaran menunjukkan kecepatan angin rata-rata jangka panjang masing-masing.	40
Gambar 40. Gambaran umum variasi bulanan dari keluaran daya rata-rata PLTB per jam dalam sehari berdasarkan nilai P50 dari Subbagian 2.8.2 dalam kombinasi dengan variasi bulanan dan per jam dalam kecepatan angin dari EMD-WRF (lihat juga Gambar 8)	45
Gambar 41. Lokasi tiang pengukuran meteorologis yang direkomendasikan.	53



Daftar tabel

Tabel 1. Dimensi Pelabuhan Malahayati. _____	19
Tabel 2. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran terbuka di Aceh Besar pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Provinsi Aceh). _____	35
Tabel 3. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Aceh Besar pada tahun 2019 (Sumber: Badan Pusat Statistik (bps.go.id)). _____	36
Tabel 4. Angka Partisipasi Murni di Aceh Besar pada tahun 2023 (Sumber: BPS Aceh Besar (bps.go.id)). _____	36
Tabel 5. Fasilitas pendidikan di Aceh Besar pada tahun 2019 (Sumber: Badan Pusat Statistik (bps.go.id)). _____	36
Tabel 6. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Aceh Besar (bps.go.id) dan BPS Provinsi Aceh). _____	37
Tabel 7. Rugi-rugi yang diperkirakan di tingkat PLTB _____	40
Tabel 8. Keluaran energi untuk semua 30 WTG di PLTB Aceh Besar _____	44
Tabel 10. Kuantitas turbin angin relevan untuk PLTB Aceh Besar yang dibayangkan. _____	46
Tabel 10. Daftar asumsi tentang komponen pekerjaan sipil. _____	47
Tabel 11. Daftar asumsi pada komponen pekerjaan listrik. _____	48
Tabel 12. Asumsi biaya per komponen biaya. _____	50
Tabel 14. Hasil asesmen kasus bisnis. _____	51



1 Pendahuluan Prospektus PLTB

Prospektus PLTB ini merupakan salah satu hasil keluaran dalam proyek berjudul *Wind Energy Development in Indonesia: Investment Plan*. Proyek ini diprakarsai oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (KESDM), dikelola oleh Southeast Asia Energy Transition Partnership (ETP), dan diselenggarakan oleh United Nations Office for Project Services (UNOPS). ETP adalah kemitraan multi-donor yang dibentuk oleh mitra pemerintah dan filantropi untuk mempercepat transisi energi berkelanjutan di Asia Tenggara sejalan dengan Persetujuan Paris dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. UNOPS adalah pengelola dana dan tuan rumah Sekretariat ETP.

Delapan lokasi PLTB potensial di Pulau Jawa dan Sumatra telah dinilai kelayakan tekno-ekonominya. Lokasi tersebut adalah Aceh Besar (Aceh), Dairi (Sumatra Utara), Gunung Kidul (DI Yogyakarta), Kediri (Jawa Timur), Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan (Sumatra Utara), Ponorogo (Jawa Timur), Probolinggo – Lumajang (Jawa Timur), dan Ciracap (Jawa Barat). Temuan-temuan dari penelitian ini dikonsolidasikan dalam prospektus PLTB per lokasi, di mana dokumen ini dibuat untuk PLTB Aceh Besar. Dalam setiap prospektus, hal-hal berikut disertakan:

Bagian 2.1: Pengenalan lokasi

- Lokasi geografis
- Penyebutan dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2021-2030 dan status pengembangan saat ini

Bagian 2.2: Ketersediaan sumber daya angin dan penggunaan lahan

- Karakteristik angin di area yang dibayangkan
- Topografi di area yang dibayangkan
- Penggunaan lahan di area yang dibayangkan, termasuk persyaratan perizinan
- Kesimpulan tentang batas-batas area PLTB yang dibayangkan

Bagian 2.3: Desain tata letak awal PLTB

Bagian 2.4: Aksesibilitas

- Transportasi ke PLTB, termasuk penyesuaian jalan dan pembangunan infrastruktur baru yang diperlukan
- Transportasi di dalam lokasi, termasuk penyesuaian jalan dan pembangunan infrastruktur baru yang diperlukan

Bagian 2.5: Kondisi geologi dan kegempaan

Bagian 2.6: Keanekaragaman hayati, kondisi sosio-ekonomi dan lingkungan

Bagian 2.7: Desain jaringan transmisi

- Pemilihan titik koneksi di jaringan PLN
- Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi

Bagian 2.8: Asesmen keluaran energi, berdasarkan ketersediaan sumber daya angin dan tata letak awal PLTB

Bagian 2.9: Asesmen kasus bisnis, berdasarkan biaya PLTB dan keluaran energi

Bagian 3: Kesimpulan keseluruhan tentang kelayakan tekno-ekonomi PLTB dan rekomendasi langkah selanjutnya dalam pengembangan PLTB

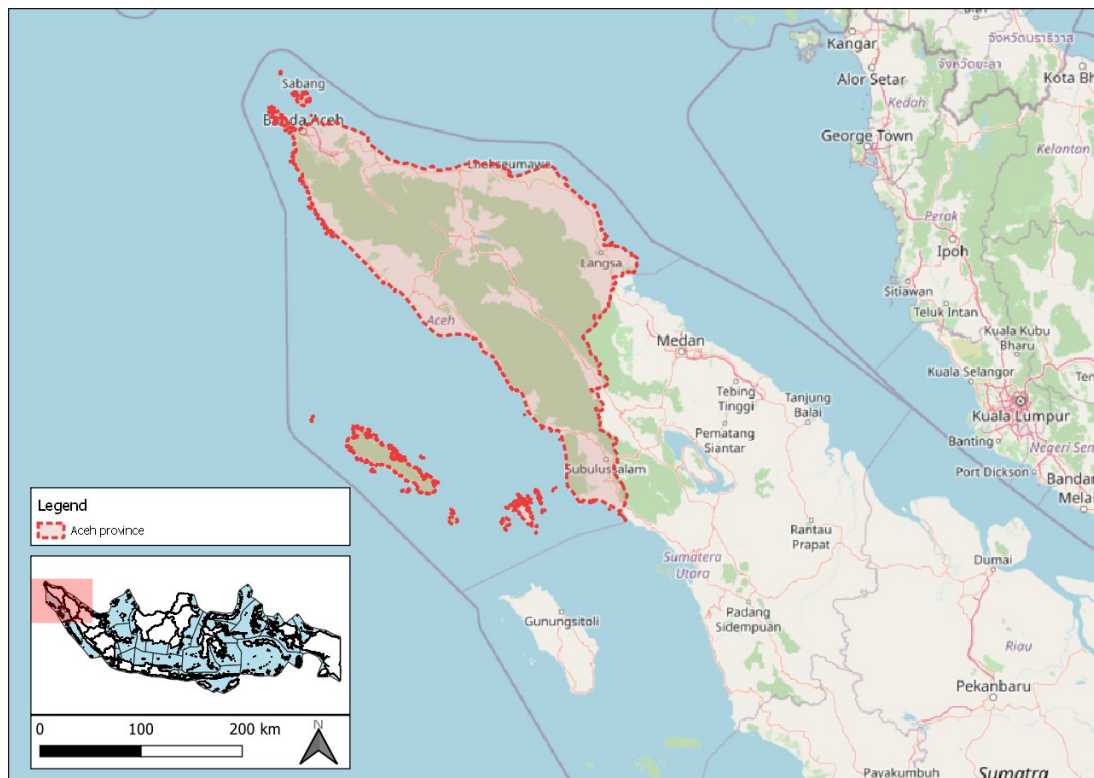


2 Analisis PLTB Aceh Besar, Aceh – 120 MW

2.1 Pengenalan lokasi PLTB

Bagian ini memperkenalkan lokasi PLTB, yaitu Aceh Besar, Aceh dalam tiga bagian: (1) lokasi geografis, (2) status dalam RUPTL, dan (3) status pengembangan.

2.1.1 Lokasi geografis



Gambar 1. Peta Provinsi Aceh di mana wilayah dari PLTB Aceh Besar yang dibayangkan berada.

Gambar 1. Peta Provinsi Aceh di mana wilayah dari PLTB Aceh Besar yang dibayangkan berada. Gambar 1 menunjukkan Aceh, provinsi di ujung barat laut Pulau Sumatra. Terletak di bagian barat Indonesia, Aceh bersebelahan dengan satu provinsi: Sumatra Utara. Aceh memiliki luas wilayah 58.486 km² dan jumlah penduduk sekitar 5,4 juta jiwa pada tahun 2022¹. Provinsi ini menempati peringkat ke-30 berdasarkan PDB (Produk Domestik Bruto/GDP) per kapita provinsi yang jumlahnya Rp 39,16 juta². Selain itu, pertumbuhan ekonomi kumulatif Aceh pada tahun 2023 adalah 4,23% (c-to-c)³. Sebagai konteks, pertumbuhan ekonomi Indonesia pada tahun tersebut adalah 5,05% (c-to-c)⁴.

¹ <https://aceh.bps.go.id/indicator/12/55/1/jumlah-penduduk.html>

² <https://www.statista.com/statistics/1423411/indonesia-per-capita-gdp-at-current-prices-of-provinces/>

³ <https://aceh.bps.go.id/pressrelease/2024/02/05/1085/pertumbuhan-ekonomi-triwulan-iv-2023-provinsi-aceh.html>

⁴ <https://www.bps.go.id/en/pressrelease/2024/02/05/2379/indonesias-gdp-growth-rate-in-q4-2023-was-5-04-percent-y-on-y-.html>



Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan tentang Aceh. Provinsi ini diberikan otonomi khusus karena alasan historis, salah satunya adalah satu-satunya provinsi di Indonesia yang menerapkan hukum Syariah. Aceh juga dikenal memiliki cadangan migas yang cukup besar. Dua penemuan gas alam lepas pantai 'raksasa' baru-baru ini yang diumumkan pada awal 2024 berada di Blok Andaman II dan Andaman Selatan, yang diperkirakan mengandung 5,5 dan 6 triliun kaki kubik (TCF) gas di tempat (*gas-in-place*)⁵. Aceh merupakan rumah bagi cagar alam seluas 1 juta ha, yang bernama Taman Nasional Gunung Leuser. Selain itu, beberapa produk pertanian utama Aceh termasuk kelapa sawit, kopi, kakao, karet, dan beras.

Ada satu kawasan industri di Aceh⁶, yaitu Kawasan Industri Aceh Ladong (66 ha⁷). Kawasan ini diharapkan menjadi salah satu Kawasan Industri Halal Nasional di Indonesia yang memasok makanan dan minuman halal ke Timur Tengah^{7,78}. Sementara itu, ada satu Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) di provinsi ini: KEK Arun Lhokseumawe (2.622 ha)⁶. Diresmikan pada tahun 2018, KEK ini dikembangkan dengan fokus pada beberapa sektor termasuk energi (gas), petrokimia, agroindustri, logistik, dan kertas kraft⁹.

Dalam Lampiran E dari RUPTL PLN 2021-2030, PLN mencantumkan strategi pemenuhan permintaan daya baru/tambahan dari empat konsumen listrik 'besar' di Aceh, yaitu:

1. KEK Arun Lhokseumawe (10 MVA pada tahun 2025; potensi pengembangan lebih lanjut sebesar 350 MW)
2. Kawasan Industri Ladong (10 MVA pada tahun 2025)
3. Sentra Kelautan Perikanan Terpadu Sabang (0,2 MVA pada tahun 2025)
4. Tambak Udang Aceh Timur (2 MVA pada tahun 2025)

Subbagian berikutnya akan menjelaskan proyeksi tingkat permintaan tenaga listrik di provinsi terkait, yang antara lain mempertimbangkan permintaan yang akan datang dari konsumen tersebut di atas.

Lokasi PLTB yang dipertimbangkan di Aceh terletak di Kabupaten Aceh Besar, di barat daya Ibukota Provinsi Banda Aceh.

2.1.2 Status dalam RUPTL PLN 2021-2030

Sistem kelistrikan Aceh disajikan pada Gambar 2. Peta sistem kelistrikan Aceh di RUPTL (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). Gambar 2. Sistem ini terdiri dari saluran transmisi *backbone* 150 kV yang terhubung dengan interkoneksi Sumatra Bagian Utara (*Sumbagut*), dan sistem terisolasi menggunakan saluran transmisi 20 kV. Saluran pertama menghubungkan sebagian besar wilayah darat Aceh (pulau utama), sedangkan yang terakhir melayani penyediaan listrik terutama di pulau-pulau kecil. RUPTL PLN 2021-2030 menyebutkan beban puncak di Aceh pada tahun 2020 tercatat sebesar 542 MW.

⁵ <https://www.cnbcindonesia.com/news/20240115175421-4-506054/bukan-mitos-segini-jumlah-temuan-gas-raksasa-di-aceh>

⁶ <https://regionalinvestment.bkpm.go.id/pir/kawasan-industri-kek/>

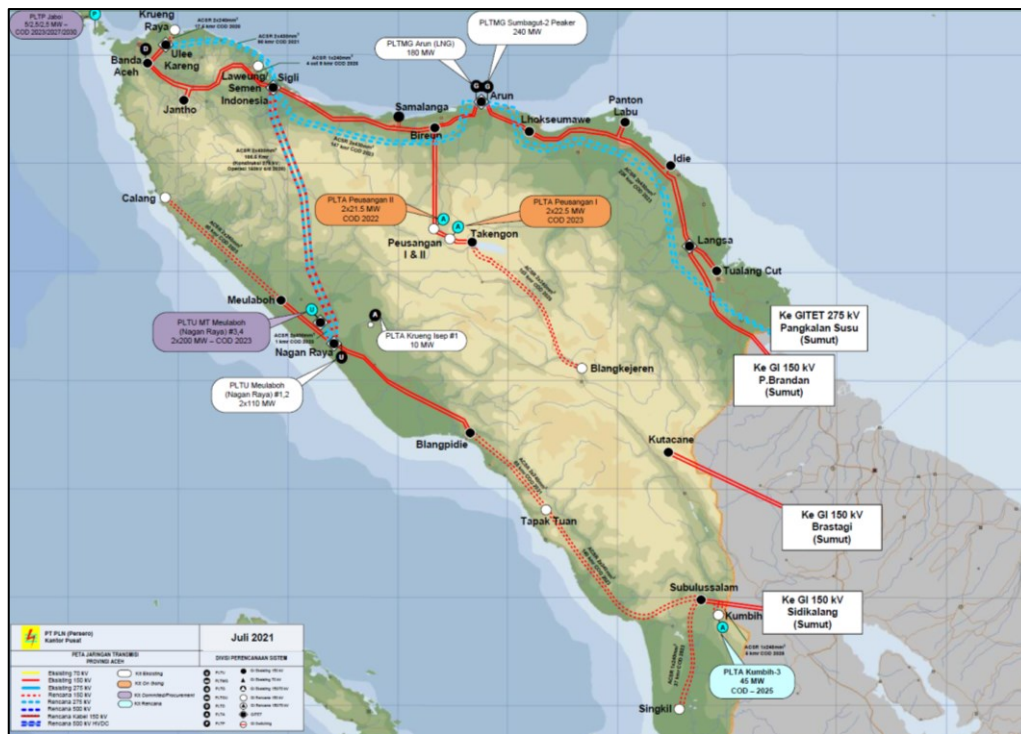
⁷ <https://investaceh.id/projects/detail/kawasan-industri-aceh-kia-ladong>

⁸ <https://kemenperin.go.id/artikel/22941/Kemenperin-Dorong-Masuknya-Investor-ke-Kawasan-Industri-Ladong>

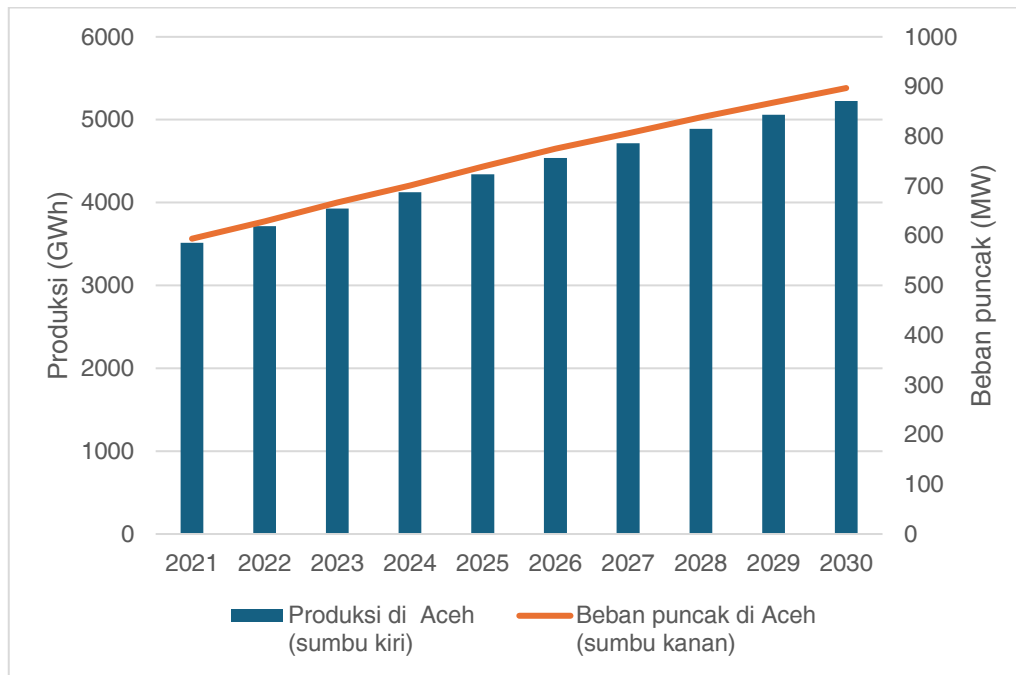
⁹ <https://regionalinvestment.bkpm.go.id/pir/kawasan-industri/?id=85>



Beban puncak yang diproyeksikan, serta proyeksi produksi listrik di provinsi tersebut, ditampilkan pada Gambar 3. Proyeksi produksi listrik dan beban puncak di Aceh (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa PLN memperkirakan permintaan listrik akan tumbuh stabil hingga tahun 2030. Proyeksi ini didasarkan pada asumsi bahwa tingkat pertumbuhan permintaan rata-rata adalah 4,7% per tahun.

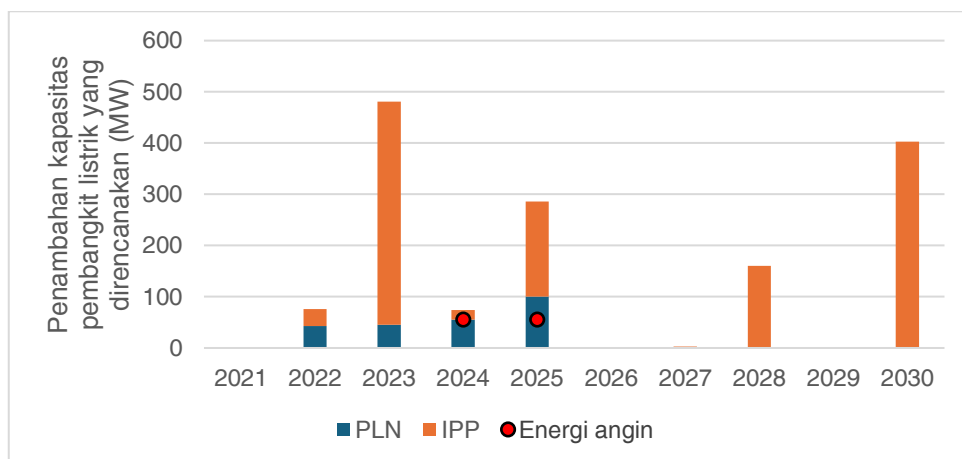


Gambar 2. Peta sistem kelistrikan Aceh di RUPTL (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030).



Gambar 3. Proyeksi produksi listrik dan beban puncak di Aceh (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030).

Ringkasan perencanaan pembangunan pembangkit listrik dapat dilihat pada Gambar 4. Kapasitas pembangkit tambahan yang direncanakan untuk Aceh (IPP: *Independent Power Producer*; Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). Gambar 4. Gambar ini mencakup pembangkit listrik energi konvensional dan terbarukan. Pembangkit listrik tambahan dikategorikan menjadi dua kelompok: PLN dan *Independent Power Producer* (IPP). Sepanjang tahun 2021-2030, pengembangan energi angin dialokasikan masing-masing 55 MW untuk tahun 2024 dan 2025, dengan total 110 MW. Perlu dicatat bahwa alokasi tersebut berlaku untuk seluruh sistem Sumatra (termasuk provinsi lainnya). Selain alokasi ini, RUPTL juga mengidentifikasi 148 MW potensi tenaga angin/bayu di Aceh.



Gambar 4. Kapasitas pembangkit tambahan yang direncanakan untuk Aceh (IPP: *Independent Power Producer*; Sumber: RUPTL PLN 2021-2030).



2.1.3 Status pengembangan

PLTB Aceh (55 MW) sudah masuk dalam tender Hijaunesia 2023 yang dilakukan oleh PLN. Sepengetahuan kami, setidaknya ada dua pengembang yang aktif di Aceh dan berpartisipasi dalam tender tersebut. Namun, pemenang tender belum diumumkan hingga saat penulisan studi ini. Proyek ini telah dimasukkan sebagai salah satu prioritas utama untuk proyek angin dari JETP *Comprehensive Investment and Policy Plan* (CIPP), dengan target COD pada tahun 2027 dan kapasitas sebesar 55 MW. Dapat disimpulkan bahwa masih ada ruang untuk pengembangan energi angin ke depannya mengingat potensi dan perencanaan pembangkit listrik tersebut.



2.2 Ketersediaan sumber daya angin dan penggunaan lahan

2.2.1 Pendekatan

Untuk menentukan lokasi di mana turbin angin dapat ditempatkan, salah satu faktor terpenting yang perlu dipertimbangkan adalah kecepatan angin. Faktor ini sangat menentukan batas-batas yang dibayangkan dari lokasi yang cocok untuk pembangunan generator turbin angin (yaitu area *Wind Turbine Generator*/WTG). Dalam proses selanjutnya, faktor-faktor tambahan dipertimbangkan, yang mengarah ke area WTG final. Bagian ini memberikan gambaran singkat tentang faktor-faktor yang telah menghasilkan area WTG final. Data yang digunakan untuk membentuk area WTG didasarkan pada informasi geografis sumber terbuka. Pemeriksaan lapangan tambahan telah menunjukkan bahwa data sumber terbuka memberikan tingkat detail yang cukup dalam fase proyek ini.

Pemilihan area WTG untuk lokasi ini dimulai dengan mengidentifikasi area dengan kecepatan angin rata-rata di atas 6 m/s pada ketinggian 100 m. Proses penyaringan awal ini menggunakan data kecepatan angin diikuti dengan dimasukkannya parameter lebih lanjut, termasuk penggunaan lahan (jalan, jalur kereta api, daerah pemukiman dan bangunan) dan topografi (lereng/kemiringan). Selain itu, risiko vulkanik dan seismik kemudian dipertimbangkan dalam Bagian 2.5. Ringkasnya, rangkaian kriteria pembatasan pertama yang diterapkan dalam pemilihan area WTG adalah sebagai berikut:

- Kecepatan angin (> 6 m/s)
- Kemiringan (< 15 derajat, dengan penyangga 100 m di sekitar punggung bukit curam)
- Jalan (dengan penyangga 150 m)
- Jalur kereta api (dengan penyangga 150 m)
- Kawasan pemukiman dan bangunan (dengan penyangga 250 m)

Langkah selanjutnya adalah mempertimbangkan "*go / no-go zones*." Sesuai dengan namanya, kategori zona ini menunjukkan apakah suatu kawasan tertentu dapat mengakomodasi pengembangan PLTB tanpa batasan/kondisi signifikan yang harus dipenuhi (*go zone*), dapat mengakomodasi pengembangan PLTB dengan batasan/ketentuan signifikan yang harus dipenuhi (*go zone* dengan batasan), atau tidak dapat mengakomodasi pengembangan PLTB (*no-go zone*). Zona ini ditentukan dengan mempertimbangkan penggunaan lahan, yaitu keberadaan cagar alam, kawasan lindung, dan bandara, serta jalur perairan dan badan air, berdasarkan *OpenStreetMap* (OSM). Selain itu, kebijakan yang ada (misalnya rencana tata ruang wilayah) dan peraturan (misalnya tentang perizinan) khusus untuk wilayah tersebut juga dipertimbangkan.

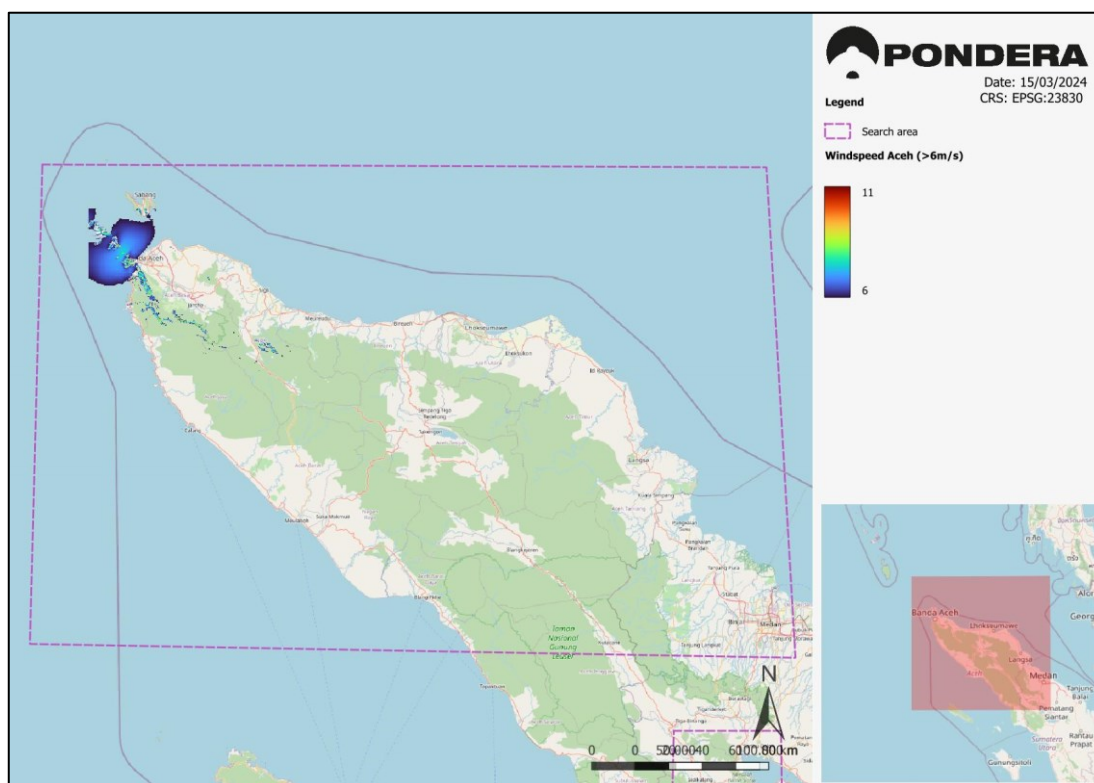
Jarak penyangga tertentu diterapkan pada setiap kasus untuk meminimalkan risiko yang memungkinkan gangguan, masalah keselamatan, dan konflik penggunaan lahan. Langkah ini menghasilkan area WTG final. Kriteria pembatasan kedua yang diperiksa meliputi:

- Cagar alam dan kawasan lindung (dengan penyangga 300 m)
- Bandara (dengan penyangga 3.000 m)
- Jalur perairan dan badan air (dengan penyangga 300 m)



2.2.2 Sumber daya dan karakteristik angin

Gambar 5. Area pencarian di Aceh dengan sebaran kecepatan angin. Kotak pembatas putus-putus berwarna ungu menunjukkan seluruh area pencarian. Bilah warna menunjukkan kecepatan angin rata-rata di atas 6 m/s pada ketinggian 100 m menurut klimatologi *Global Wind Atlas* (GWA). Gambar 5 menunjukkan lokasi pencarian awal (dibatasi oleh kotak putus-putus berwarna ungu), di wilayah barat laut Aceh. Dalam gambar tersebut, area dengan kecepatan angin rata-rata lebih dari 6 m/s ditandai oleh "piksel" dengan warna berbeda seperti yang dijelaskan dengan bilah warna. Dapat disimpulkan bahwa sumber daya angin yang menjanjikan terletak di dataran tinggi area tersebut.

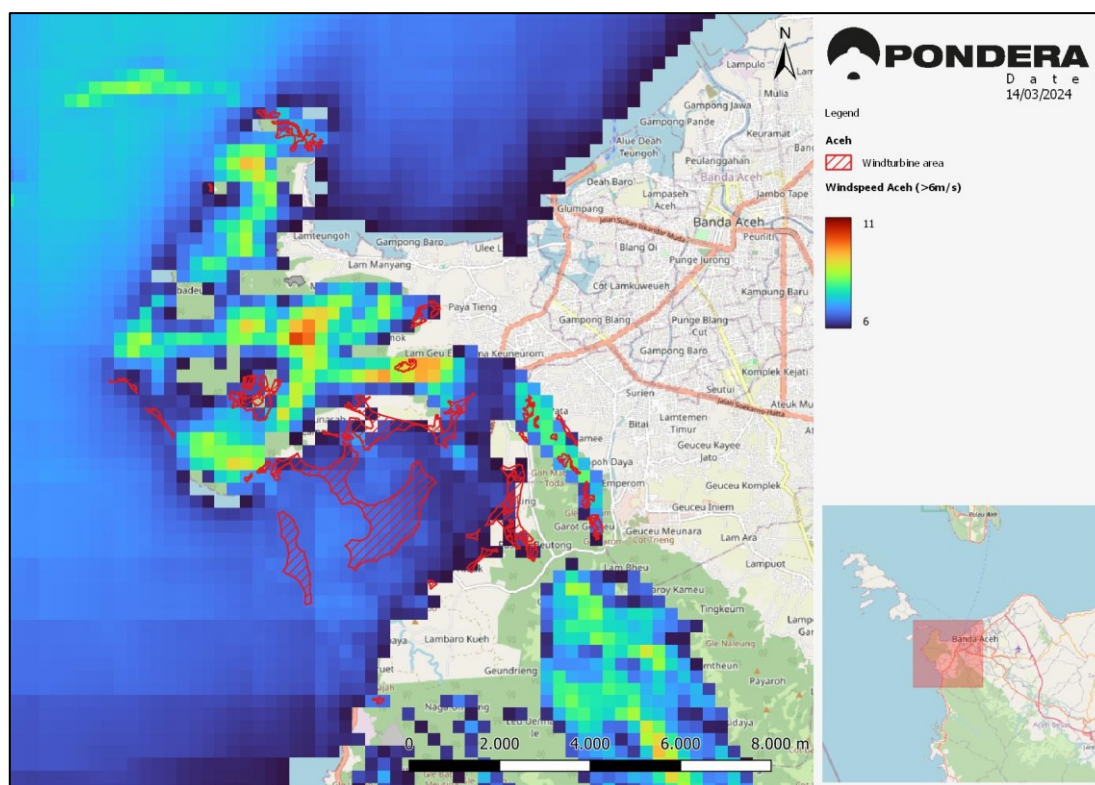


Gambar 5. Area pencarian di Aceh dengan sebaran kecepatan angin. Kotak pembatas putus-putus berwarna ungu menunjukkan seluruh area pencarian. Bilah warna menunjukkan kecepatan angin rata-rata di atas 6 m/s pada ketinggian 100 m menurut klimatologi *Global Wind Atlas* (GWA).

Mengingat sifat area yang tersebar dengan kecepatan angin yang menjanjikan, area pencarian selanjutnya dibatasi pada satu area yang lebih kecil dan kontinu untuk menjaga kelayakan proyek. Alasan di balik hal ini adalah untuk menghindari biaya yang tinggi dan kompleksitas pembangunan koneksi listrik (misalnya jalur distribusi) antara beberapa sub-lokasi turbin angin yang dipisahkan oleh jarak yang jauh.



Gambar 6. Tampilan yang diperbesar pada area pencarian di Aceh, dengan sebaran kecepatan angin. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG final yang memenuhi semua kriteria. Kecepatan angin rata-rata di atas ambang batas 6 m/s pada ketinggian 100 m ditampilkan berdasarkan GWA. Gambar 6 menunjukkan peta yang diperbesar dari area kontinu ini yang telah dipelajari lebih lanjut pada langkah-langkah selanjutnya. Gambar tersebut juga dilengkapi dengan area WTG final untuk memberikan gambaran tingkat kecepatan angin di lokasi tersebut.



Gambar 6. Tampilan yang diperbesar pada area pencarian di Aceh, dengan sebaran kecepatan angin. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG final yang memenuhi semua kriteria. Kecepatan angin rata-rata di atas ambang batas 6 m/s pada ketinggian 100 m ditampilkan berdasarkan GWA.

Selain itu, Gambar 7. Diagram mawar angin dengan arah angin dan kategori kecepatan angin berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF. Gambar 7 memvisualisasikan sebaran rata-rata arah angin jangka panjang untuk wilayah Aceh Besar. Seperti dapat diinterpretasikan dari gambar ini, iklim angin di daerah tersebut terutama terdiri dari angin yang berasal dari arah barat daya.

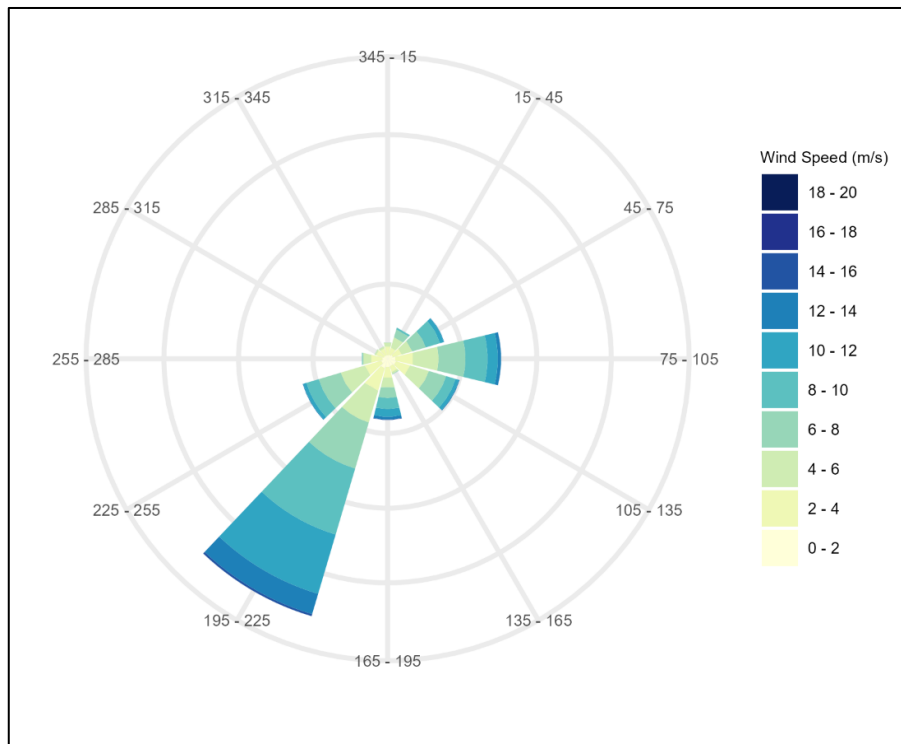
Pada Gambar 8. Sebaran kecepatan angin sepanjang hari, divisualisasikan per bulan dalam setahun. Berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF. Gambar 8 sebaran kecepatan angin sepanjang hari untuk setiap bulan per tahun divisualisasikan. Kecepatan angin tertinggi diamati di antara bulan Mei dan Oktober, ketika zona konveksi intertropis (ITCZ), ditempatkan di utara lokasi. Oleh karena itu, periode ini juga dapat dibedakan dari bulan-bulan lainnya berdasarkan arah angin barat daya yang berlaku. Kira-kira dari bulan November hingga bulan April (meskipun waktunya dapat bervariasi dari tahun ke tahun),



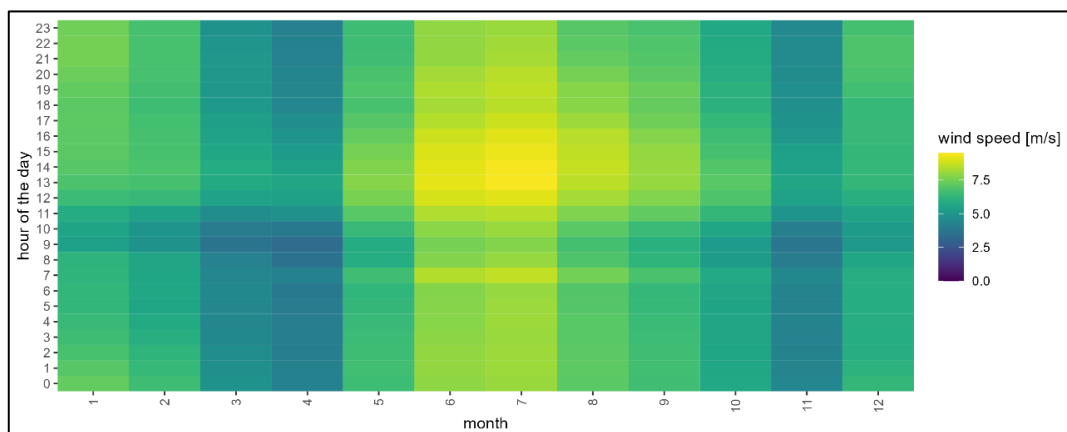
kecepatan angin terendah diamati ketika ITCZ melewati lokasi menuju ke arah selatan. Seperti yang diperkirakan, sebagian besar angin dari timur diamati selama bulan-bulan ini.



Selain kecepatan angin tahunan dan pola arah yang sangat bergantung pada posisi ITCZ, variasi antar tahunan disebabkan oleh fenomena El Niño dan La Niña. Selama tahun El Niño yang kuat, angin pasat menjadi lebih lemah, sementara selama tahun La Niña, angin tersebut menjadi lebih kuat, sehingga menghasilkan kecepatan angin yang lebih tinggi di daerah tersebut.



Gambar 7. Diagram mawar angin dengan arah angin dan kategori kecepatan angin berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF.

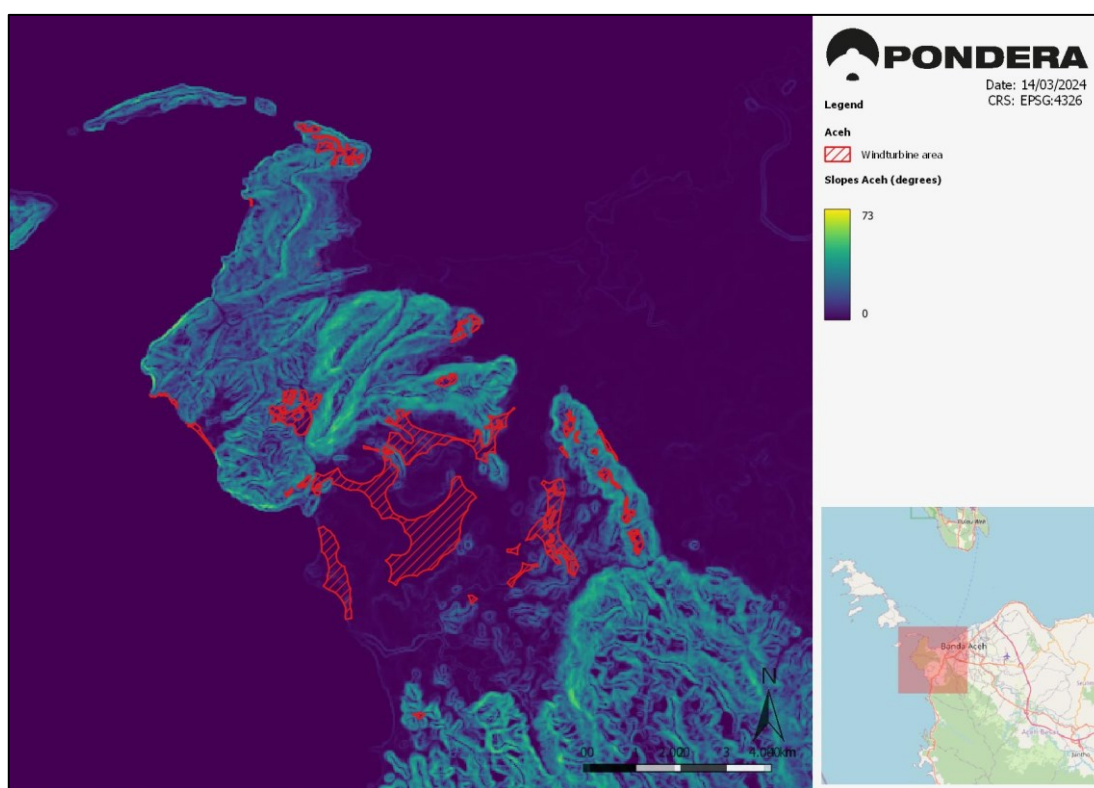


Gambar 8. Sebaran kecepatan angin sepanjang hari, divisualisasikan per bulan dalam setahun. Berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF.



2.2.3 Topografi

Gambar 9. Topografi area WTG Aceh Besar, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut. menunjukkan topografi area pencarian di wilayah Aceh Besar. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG final yang memenuhi semua kriteria. Kecuraman atau kemiringan dataran ditetapkan dalam derajat. Perhitungan kemiringan didasarkan pada *grid* elevasi FABDEM yang memiliki resolusi sekitar 30 m. Dalam studi ini, daerah dengan kemiringan lebih tinggi dari 15 derajat dikeluarkan dari analisis lebih lanjut untuk menghindari biaya transportasi dan konstruksi yang berlebihan yang biasanya timbul pada proyek PLTB di dataran curam. Namun demikian, perlu dicatat bahwa karena resolusi data tersebut, kriteria pengecualian ini tidak mempertimbangkan fluktuasi ketinggian skala kecil (yaitu kurang dari 30 m).

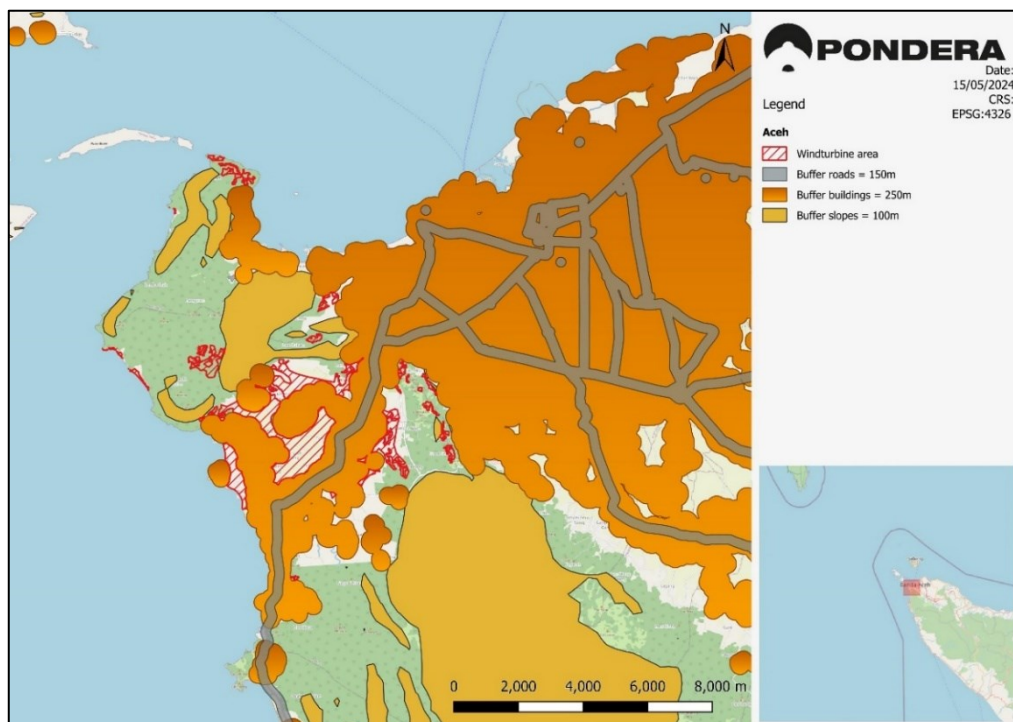


Gambar 9. Topografi area WTG Aceh Besar, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut.



2.2.4 Penggunaan lahan

Seperti disebutkan dalam Subbagian sebelumnya, PLTB tidak dapat direalisasikan di daerah yang terlalu dekat dengan bangunan, infrastruktur, cagar alam, dan badan air. Oleh karena itu, penyangga diterapkan pada objek-objek ini untuk menentukan area WTG yang sesuai. Menggabungkan kriteria pembatasan yang disebutkan di atas menghasilkan zona pengecualian penggunaan lahan (lihat Gambar 10). Zona pengecualian ini tidak dipertimbangkan pada tahap selanjutnya dalam studi ini. Akibatnya, analisis ini menghasilkan area WTG final yang ditandai dengan poligon dengan arsir berwarna merah pada Gambar 10.



Gambar 10. Zona pengecualian di wilayah Aceh Besar berdasarkan penggunaan lahan, topografi, dan kawasan pemukiman. Sumber: perhitungan berdasarkan elevasi FABDEM, ESRI, dan OSM.

2.2.5 Persyaratan perizinan khusus

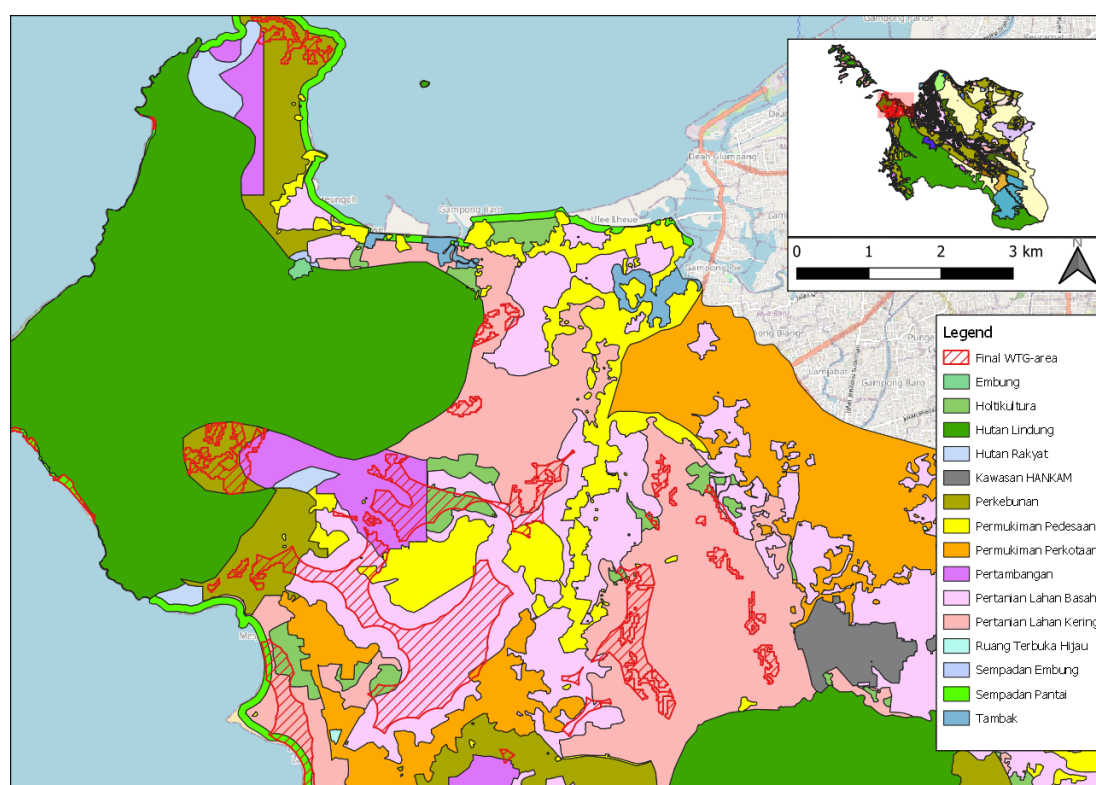
Dokumen rencana tata ruang wilayah yang menjadi acuan dalam analisis ini adalah Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Aceh Besar 2013-2033. Meskipun ada rencana untuk merevisi RTRW ini, versi saat ini masih berlaku pada saat penulisan laporan ini. Gambar 11 menetapkan area WTG final terhadap peta RTRW. Berdasarkan gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa wilayah WTG final bertumpang tindih dengan kategori rencana tata ruang berikut:

1. Kawasan Perkebunan
2. Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering
3. Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Basah
4. Kawasan Pertambangan
5. Kawasan Pemukiman Pedesaan
6. Kawasan Hutan Lindung
7. Kawasan Sempadan Pantai
8. Kawasan Hortikultura



Dari delapan kategori di atas, area WTG final sebagian besar bertumpang tindih dengan tiga kategori pertama di atas. Sementara itu, tumpang tindih dengan lima kategori lainnya relatif kecil, dan dengan demikian kategori-kategori tersebut dikeluarkan dari analisis lebih lanjut dalam studi ini.

Bagian dari area WTG final yang berada di dalam Kawasan Perkebunan dapat digunakan untuk pengembangan kepentingan umum, termasuk pengembangan PLTB (dan jenis kegiatan pembangkit listrik dan transmisi lainnya) jika kesepakatan bersama dapat dicapai dengan pemilik lahan¹⁰. Pemilik tanah dapat diasumsikan sebagai perusahaan (milik negara atau swasta) atau masyarakat setempat. Dalam kasus sebelumnya, perjanjian formal dengan pemilik Hak Guna Usaha Perkebunan diperkirakan diperlukan sebelum pengembangan PLTB dapat berlangsung. Sementara itu, kasus terakhir bisa berupa perjanjian jual beli atau sewa dengan pemilik tanah. Demikian pula, area WTG final di Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering dan Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Basah dapat digunakan untuk pengembangan PLTB jika perjanjian pembelian atau sewa diperoleh¹⁰.



Gambar 11. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Aceh Besar (RTRW 2013-2033) ditumpuk dengan area WTG final di kabupaten tersebut

¹⁰ Mengacu pada UU 22/2019, Perpres 59/2019, dan PP 1/2011.



2.2.6 Area WTG final

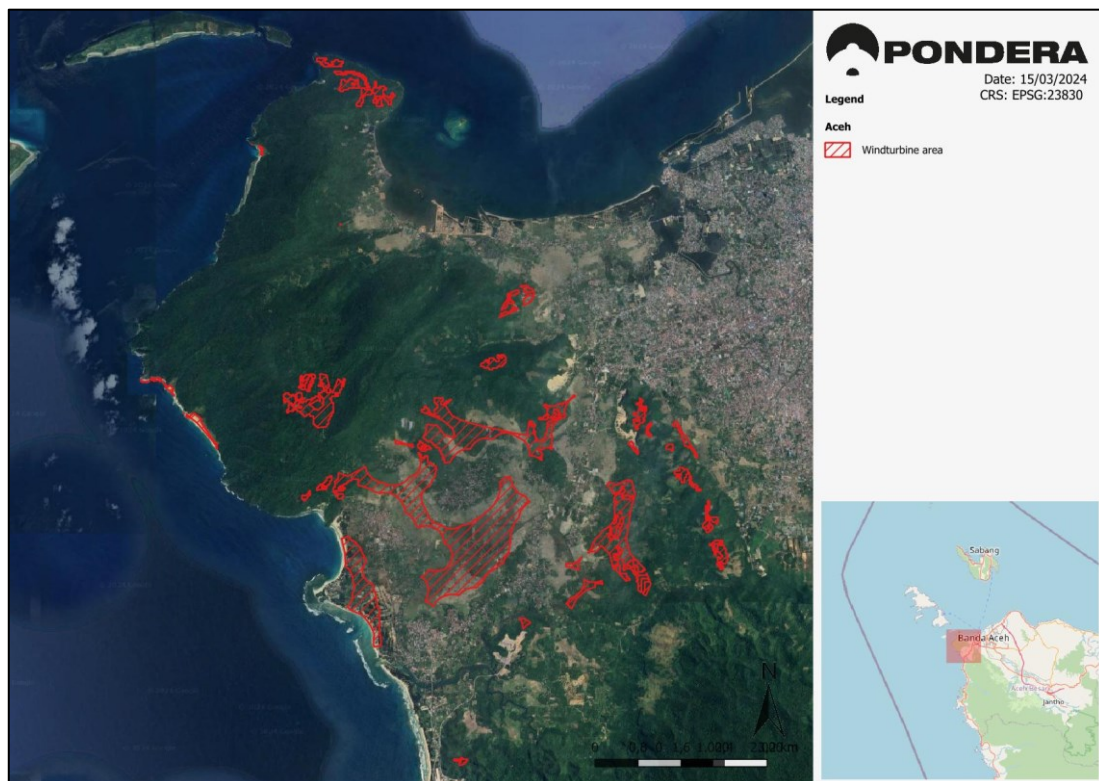
Gambaran umum area WTG final terhadap citra satelit di lokasi dapat ditemukan pada Gambar 12. Area WTG final berdasarkan kriteria pembatasan. Sumber: Google Satellite Images. Gambar 12. Area ini memenuhi semua kriteria seperti yang divisualisasikan pada gambar sebelumnya.

Keterbatasan

Seperti disebutkan sebelumnya, parameter yang telah membentuk area WTG final telah didasarkan pada informasi geografis sumber terbuka. Kunjungan lapangan ke beberapa bagian area dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang karakteristik area tersebut (seperti yang dijelaskan lebih lanjut dalam Bagian 0 hingga Bagian 2.6), dari mana kesimpulan umum kemudian ditarik untuk menganalisis lebih lanjut area WTG final.

Kunjungan lapangan telah menunjukkan bahwa secara umum:

1. Data kawasan pemukiman yang diperoleh dari basis data ESRI memberikan perkiraan yang lebih rendah terhadap bangunan di wilayah tersebut, dan oleh karena itu, dalam beberapa kasus, mungkin diperlukan zona pengecualian tambahan pada tahap proyek selanjutnya;
2. Dalam beberapa kasus, saluran air terlalu membatasi (mengingat besarnya aliran sungai), sehingga saluran tersebut dikeluarkan dari analisis (yaitu saluran air tersebut tidak dianggap sebagai batasan); dan
3. Data jalan utama yang berasal dari OSM juga mencakup jalan kecil; akibatnya, kumpulan data ini mungkin terlalu membatasi dalam beberapa kasus.



Gambar 12. Area WTG final berdasarkan kriteria pembatasan. Sumber: Google Satellite Images.



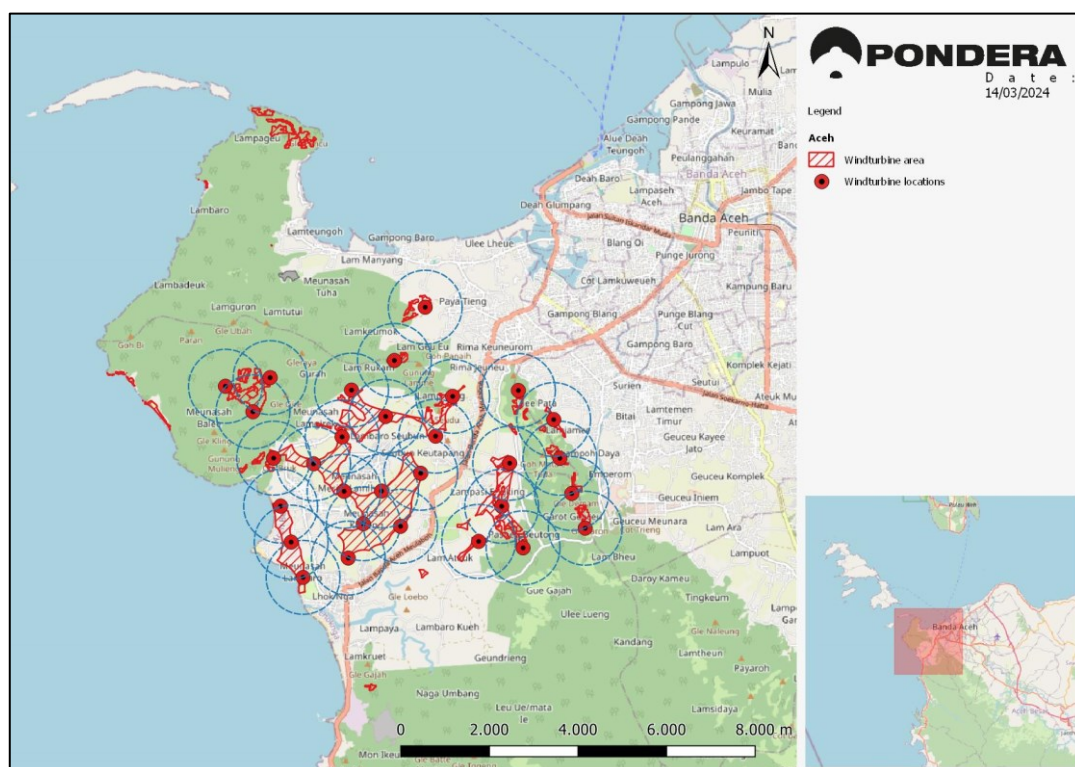
2.3 Tata letak awal PLTB

Tata letak PLTB didasarkan pada area WTG yang disediakan di Bagian 2.2. Tata letak awal PLTB dirancang berdasarkan penggabungan sebanyak mungkin posisi turbin angin. Hal ini mencegah pembangunan jalan dan kabel ke satu lokasi turbin angin, yang tidak efektif dari segi biaya.

Karena iklim angin Indonesia umumnya terdiri dari daerah dengan kecepatan angin lebih rendah hingga sedang, jenis turbin angin yang sesuai dengan kondisi angin ini harus dipilih. Untuk tata letak PLTB sementara, telah digunakan turbin angin referensi 4 MW dengan diameter rotor hampir 170 m dan ketinggian naf 140 m. Hal ini membuat tinggi ujung (*tip height*) total sekitar 220-225 m. Untuk mengurangi rugi-rugi olakan dan kemungkinan pengaruh turbulensi negatif, jarak standar lima kali diameter rotor digunakan dalam tata letak awal PLTB.

Selama penentuan posisi turbin, pemeriksaan visual tambahan dilakukan berdasarkan citra satelit, dengan mempertimbangkan: 1) saluran listrik, 2) bangunan, 3) ukuran area, dengan minimal tiga turbin di dekatnya, 4) aksesibilitas area relatif terhadap bagian lain dari area WTG, 5) minimalisasi kriteria pembatasan, 6) pemilihan area kecepatan angin tertinggi dan 7) pemenuhan tujuan kapasitas terpasang sebagaimana diatur dalam RUPTL PLN 2021-2030.

Gambar 13. Tata letak awal PLTB di area WTG final. Gambar 13 menampilkan gambaran lokasi turbin angin di area WTG final. Sebanyak 30 turbin angin ditempatkan ke daerah tersebut, dengan perkiraan total kapasitas terpasang sebesar 120 MW (berdasarkan turbin angin 4 MW). Penanda merah (titik merah dengan pusat hitam) menunjukkan lokasi yang tepat dari masing-masing turbin angin, sedangkan garis radial biru menjamin suatu jarak setidaknya 5 kali diameter rotor.



Gambar 13. Tata letak awal PLTB di area WTG final.



2.4 Aksesibilitas PLTB

Pada bagian ini, aksesibilitas PLTB dijelaskan melalui tiga subbagian: (1) keadaan transportasi Indonesia, (2) transportasi pelabuhan ke lokasi, dan (3) transportasi di dalam lokasi.

2.4.1 Keadaan transportasi Indonesia

Di luar kota besar, sistem jalan regional digunakan untuk hampir semua transportasi (lihat Gambar 14). Tata letak jalan khas di pedesaan Indonesia. Jalan berliku selebar ~ 6 hingga 7 m melayani lalu lintas lokal, regional, dan nasional. Kabel listrik udara dan telekomunikasi dengan tiang di kedua sisi jalan. Bangunan-bangunan berada dalam jarak yang dekat. Di dalam kota dan kota yang lebih besar, jalan pada umumnya sedikit lebih lebar, namun dengan lebih banyak kabel udara, tiang, dan papan reklame. (Gambar 14). Jalanan ini mengarah melalui pusat kota, kota kecil, dan desa yang mereka layani. Jalan lingkar di sekitar kota disediakan untuk beberapa kota besar seperti Jakarta, Bandung, Medan, Yogyakarta, dan Surabaya. Dalam banyak kasus, hanya satu jalan regional utama yang tersedia untuk pergi dari satu kota ke kota lain. Hal ini menghasilkan situasi di mana semua lalu lintas menggunakan jalan yang sama, yaitu pejalan kaki (termasuk kelompok anak sekolah, petani, dll.), sepeda motor, mobil, ambulans, angkutan umum, truk lokal yang lebih kecil, dan truk besar untuk transportasi jarak jauh. Meskipun beberapa ruas jalan raya telah tersedia di Pulau Sumatra dan masih banyak lagi yang sedang direncanakan atau sedang dibangun, sejauh ini hanya Pulau Jawa yang memiliki jalan raya yang menghubungkan bagian barat dan timur pulau tersebut. Jalan raya ini terletak di sisi utara Pulau Jawa yang lebih padat penduduknya dan memiliki dataran yang lebih datar.

Biasanya, utilitas umum seperti jalur distribusi listrik dan jalur telekomunikasi mengikuti jalur yang sama dengan jalan lokal. Kabel udara yang berada tepat di sebelah jalan adalah cara praktik standar di seluruh Indonesia. Saluran listrik dan kabel telekomunikasi utama terletak di satu sisi jalan walau melayani kedua sisi jalan. Artinya, untuk semua rumah atau kelompok rumah yang berada di seberang jalan, semua kabel harus melintasi jalan, umumnya pada ketinggian sekitar 5 meter di atas permukaan jalan. Di kota-kota besar dan kecil, penyeberangan kabel udara ini biasanya ada di setiap 20 hingga 50 meter.



Gambar 14. Tata letak jalan khas di pedesaan Indonesia. Jalan berliku selebar ~ 6 hingga 7 m melayani lalu lintas lokal, regional, dan nasional. Kabel listrik udara dan telekomunikasi dengan tiang di kedua sisi jalan. Bangunan-bangunan berada dalam jarak yang dekat. Di dalam kota dan kota yang lebih besar, jalan pada umumnya sedikit lebih lebar, namun dengan lebih banyak kabel udara, tiang, dan papan reklame.

Sistem drainase perkotaan biasanya terkubur di bawah tanah di kedua sisi jalan dan tidak cocok untuk pengangkutan transportasi berat. Dalam banyak kasus, bangunan-bangunan berada dalam jarak dua hingga lima meter dari jalan, sering kali setinggi 1 hingga 3 lantai.

Hal ini berarti bahwa ruang di dalam dan sekitar jalan raya di Indonesia sangat terbatas. Selain tantangan spasial, terdapat juga tantangan signifikan yang timbul dari durasi transportasi. Pengangkutan komponen turbin angin adalah proses yang panjang. Satu turbin diangkut dalam komponen individu (misalnya segmen menara, sudu turbin angin) dengan sekitar sepuluh truk, tidak termasuk bahan bangunan untuk fondasi. Penutupan jalan dalam jangka panjang mungkin memiliki dampak yang signifikan pada fungsi kota karena rute alternatif sering kali tidak tersedia.

Mengangkut sudu turbin angin dengan panjang 80+ meter mungkin merupakan salah satu aspek paling penting dari pengembangan PLTB di Indonesia dan harus dipersiapkan secara menyeluruh.

2.4.2 Transportasi pelabuhan ke lokasi

Pelabuhan laut dalam terdekat dari PLTB yang dibayangkan terletak di Malahayati (pelabuhan kontainer) pada jarak 45 km dari lokasi PLTB. Pelabuhan ini adalah pelabuhan peti kemas utama dengan derek dermaga yang melayani wilayah barat laut Sumatra (Gambar 15. Pelabuhan kontainer Malahayati. Gambar 15). Ada beberapa pelabuhan kecil yang tersedia lebih dekat ke lokasi PLTB, tetapi mereka tidak tersedia untuk proyek karena mereka ditunjuk sebagai pelabuhan feri atau pelabuhan perikanan. Kedalaman air dan ruang di pelabuhan ini juga terbatas. Operator semen di selatan area proyek tidak bersedia mengizinkan pembongkaran sudu turbin di pelabuhan ini.



Gambar 15. Pelabuhan kontainer Malahayati.

Pelabuhan Malahayati telah melayani kapal kargo dengan dimensi 30.000 DWT. Di atas kertas, Malahayati dapat melayani kapal dengan berat hingga 50.000 DWT atau mendekati kapal kargo kelas Panamax. Pelabuhan Malahayati berisi tiga dermaga yang berbeda dengan dimensi berikut. Pelabuhan ini memiliki area penyimpanan 2,5 ha untuk sudu turbin dan bagian lainnya.

Tabel 1. Dimensi Pelabuhan Malahayati.

Dimensi Pelabuhan Malahayati	Dermaga 1	Dermaga 2	Dermaga 3	Total
Panjang [m]	140	100	140	380
Lebar [m]	16	16	26	16
Draf [m]	8-8,5 LWS	8-8,5 LWS	6-8 LWS	6-8 LWS
Total luas [m ²]	2.240	1.600	3.640	6.080
Area tersedia [m ²]	2.800	2.000	4.550	7.600

Jalan akses dari pelabuhan ke lokasi proyek bersifat datar (ketinggian berkisar antara +5 m dan +10 m di atas permukaan laut), tetapi jalan di dalam lokasi proyek cukup curam.



Gambar 16. Rute dari Pelabuhan Malahayati ke titik akses lokasi PLTB.

Rute akses dari pelabuhan ke lokasi PLTB memiliki total empat belas jembatan kecil dan besar. Dalam proyek sebelumnya, upaya dilakukan untuk mengevaluasi jembatan ini secara struktural. Namun, data tentang kapasitas pemuatan tidak tersedia untuk sebagian besar jembatan. Meskipun jembatan yang lebih baru (dibangun dengan dukungan internasional setelah tsunami) mungkin memiliki kekuatan yang cukup untuk menampung transportasi berat, hal ini mungkin tidak berlaku untuk jembatan yang lebih tua.



Gambar 17. Jembatan dekat Pelabuhan Malahayati.



Gambar 18. Jembatan Krueng Cut di Banda Aceh.



Gambar 19. Jalan nasional di Banda Aceh yang dekat dengan lokasi proyek. Jalan melengkung lebar dan berkelok-kelok dengan lebar ~ 6 hingga 7 m yang melayani lalu lintas lokal, regional, dan nasional. Kabel listrik dan telekomunikasi udara dengan tiang di kedua sisi jalan.

Sebagian besar jalan menuju lokasi proyek tidak akan menimbulkan hambatan besar bagi transportasi. Bahkan jalan melalui Banda Aceh hanya berisi beberapa tikungan sempit (lihat di bawah) dan persimpangan.



Gambar 20. Belokan sempit di Banda Aceh.



2.4.3 Transportasi di dalam lokasi

Meskipun transportasi melalui jalan utama mungkin tidak menimbulkan banyak masalah, jalan akses internal menembus desa-desa kecil dengan jalan-jalan yang sempit, belokan sempit dan kabel listrik dan telepon yang menjuntai, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 21. Jalan perumahan di lokasi proyek.



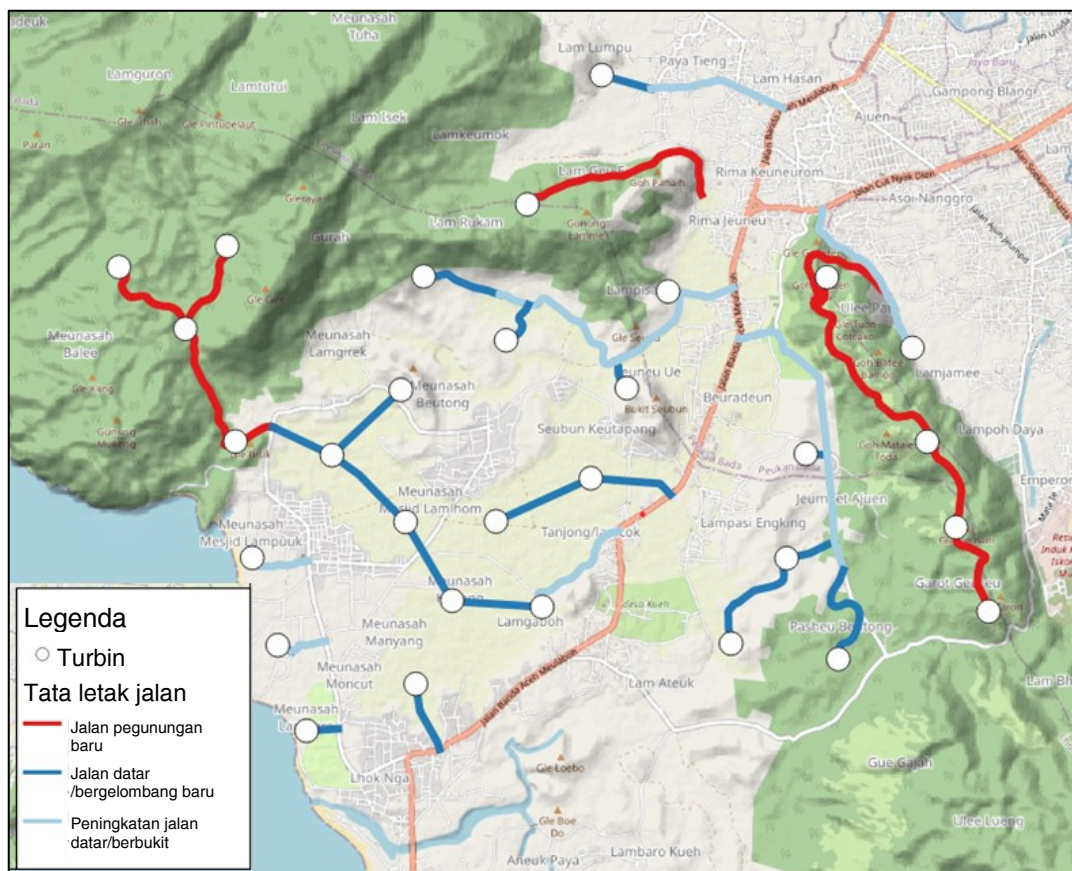
Gambar 22. Pemandangan lain dari jalan perumahan di lokasi proyek.



Tidak semua lokasi turbin dapat dijangkau melalui jalan yang ada. Beberapa jalan memerlukan peningkatan dan jalan baru harus dibangun. Diperkirakan diperlukan peningkatan dan konstruksi jalan sebagai berikut:

- Pembangunan jalan pegunungan: 11,34 km
- Pembangunan jalan datar/bergelombang: 11,95 km
- Peningkatan jalan datar/bergelombang: 10,91 km

Gambar 23. Jalan akses internal di lokasi proyek. Gambar 23 menunjukkan jalan seperti yang disebutkan di atas.



Gambar 23. Jalan akses internal di lokasi proyek.

Pembangunan jalan pegunungan baru di lokasi proyek akan membutuhkan upaya besar karena perbukitan sulit diakses dengan baik dan pegunungan tinggi dengan kemiringan yang curam. Dari perspektif dataran, topografi di dalam lokasi PLTB ini cocok untuk pengembangan PLTB karena sebagian besar jalan dan platform dapat dibangun di dataran yang rata. Namun, delapan lokasi turbin berada di atas pegunungan setinggi 200-250 meter dengan beberapa jalan (tidak beraspal) dan lereng yang curam.



Gambar 24. Topografi di lokasi proyek.



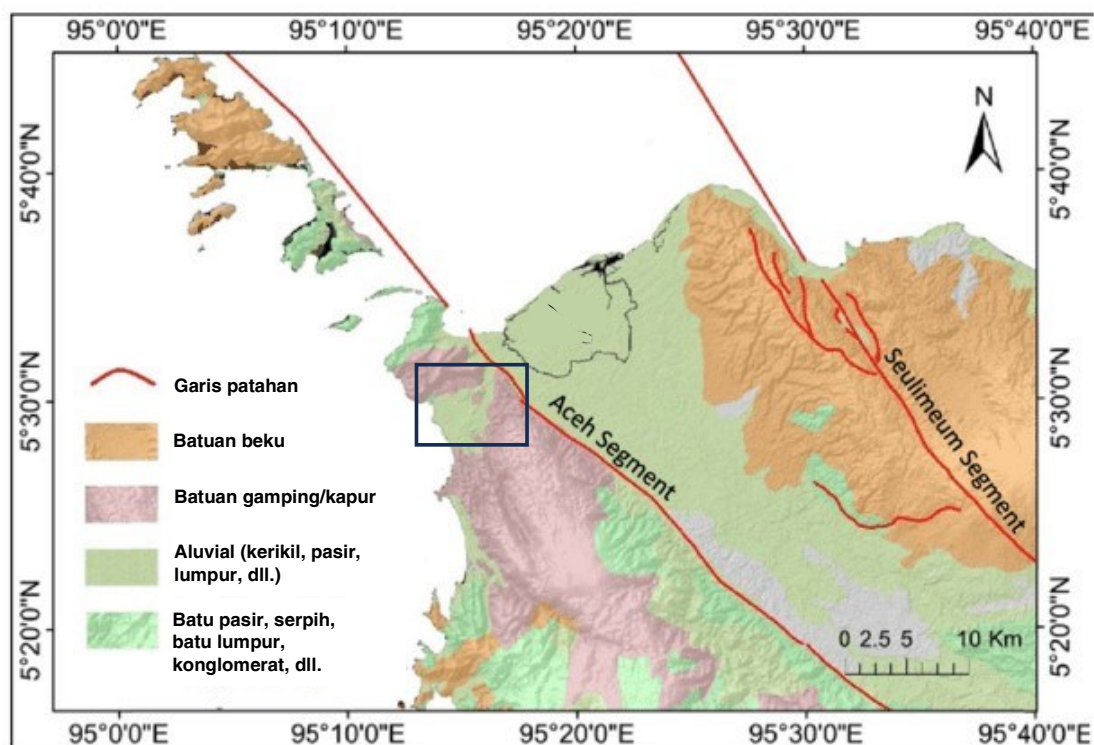
Gambar 25. Topografi pantai dan pegunungan yang berdekatan di lokasi proyek.



2.5 Geologi dan kegempaan

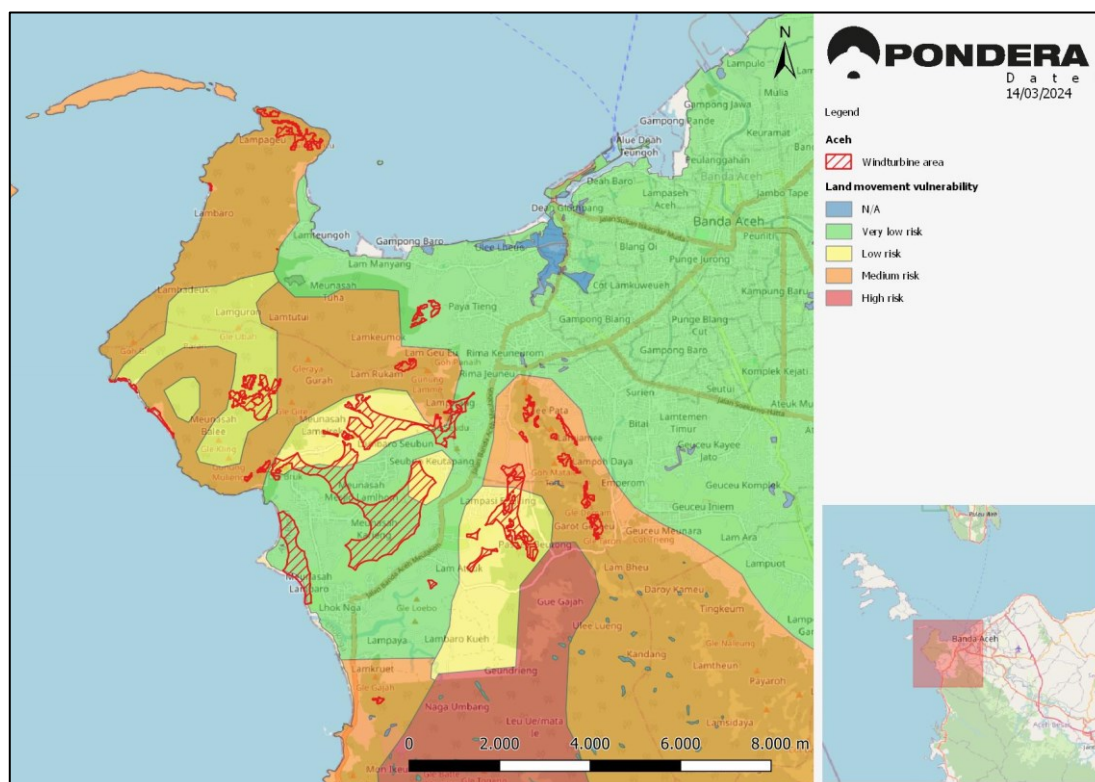
2.5.1 Geologi

Tanah di lokasi PLTB terdiri dari batu gamping (keras) di daerah pegunungannya dan endapan aluvial di lembahnya. Walaupun pegunungan memberikan fondasi yang kuat untuk turbin, tanah lunak di lembah dapat menimbulkan beberapa risiko pengendapan tanah yang tidak rata dan kemiringan turbin. Likuefaksi selama gempa bumi juga merupakan faktor risiko yang harus diselidiki. Batu kapur dalam proyek ini cukup keras dan konstruksi jalan mungkin memerlukan peledakan. Namun, kekerasan material juga memiliki manfaat yaitu akan memberikan fondasi yang kuat untuk jalan dan platform.



Gambar 26. Peta geologi wilayah Banda Aceh. Sumber: *The tectonic setting of northern Sumatra Aceh Province and geological map of Study area* (Bennet et al. 1981).

Indeks Kerentanan Gerakan Tanah memberikan gambaran tentang kerentanan gerakan tanah berdasarkan kecuraman lereng, jenis tanah, curah hujan, kegempaan, dll. Gambar 27. Indeks kerentanan pergerakan tanah di Aceh. Gambar 27 memvisualisasikan Indeks Kerentanan Gerakan Tanah dari tanah tersebut di dalam dan sekitar area WTG, yang berasal dari Portal Mitigasi Bencana Geologi KESDM.



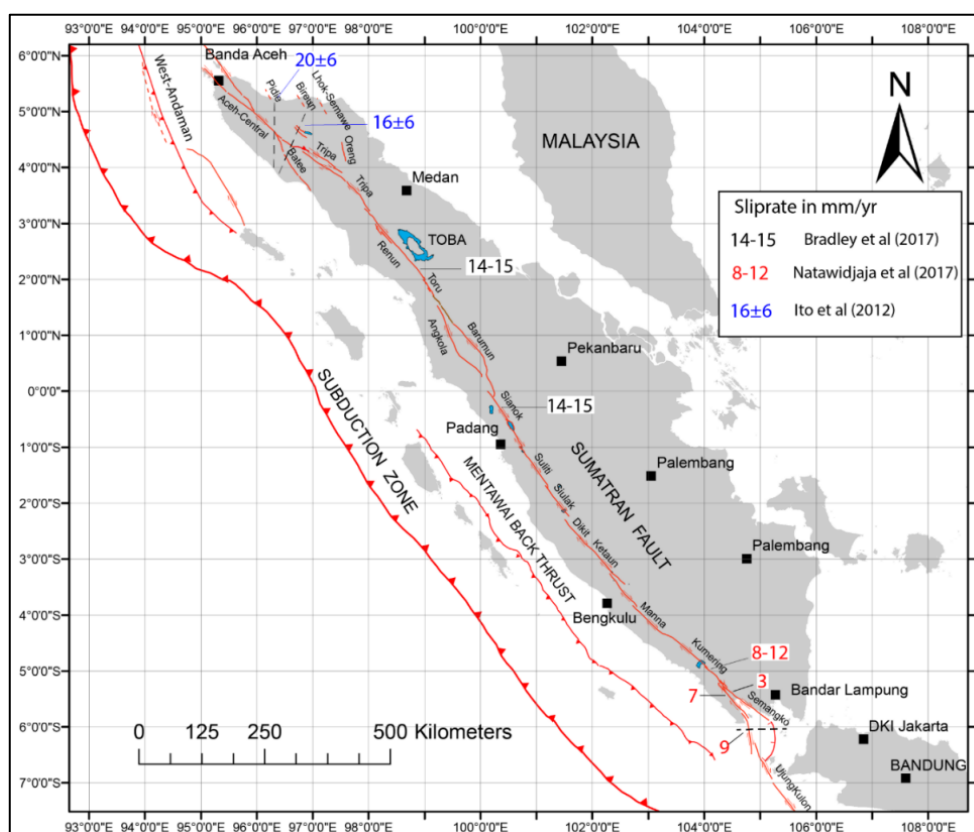
Gambar 27. Indeks kerentanan pergerakan tanah di Aceh.

Menurut Indeks Kerentanan Gerakan Tanah, daerah dengan lereng curam lebih rentan terhadap gerakan tanah / tanah longsor. Pada tahap kelayakan, stabilitas lereng perlu diselidiki lebih lanjut dengan penyelidikan geoteknik tanah, yang menentukan beberapa karakteristik tanah (misalnya kuat geser, kepadatan, permeabilitas dll.), dan analisis stabilitas tanah tersebut dalam kombinasi dengan studi LiDAR untuk pemetaan topografi yang lebih akurat.



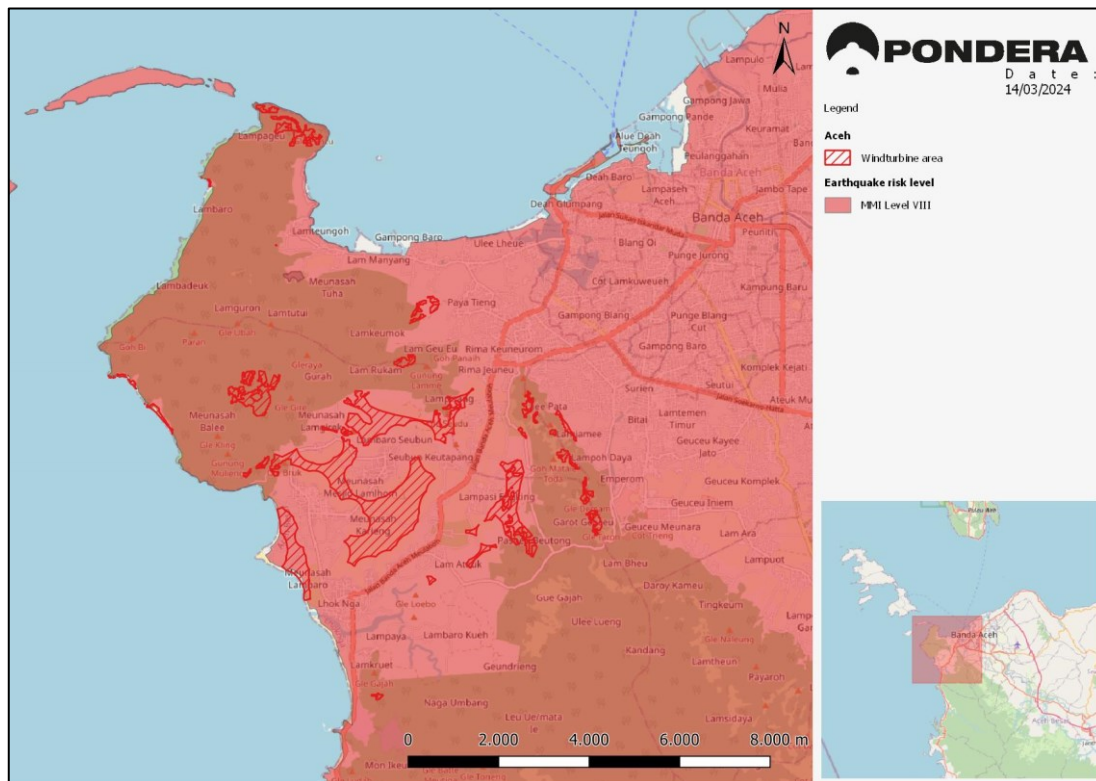
2.5.2 Kegempaan

Lokasi proyek tersebut dekat dengan garis patahan aktif. Jarak antara turbin angin dan garis patahan sekitar 2-6 km. Patahan ini adalah patahan aktif yang membawa risiko signifikan ke area proyek. Patahan ini terdapat di dalam laporan referensi Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), pusat penelitian gempa nasional Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Setiap struktur di daerah tersebut tunduk pada kode bangunan SNI-03-1726-2019. Percepatan tanah puncak (*Peak Ground Acceleration* atau PGA) di tingkat batuan dasar untuk proyek ini didasarkan pada referensi ini.



Gambar 28. Lokasi umum sistem Sesar Besar Sumatra yang membentang di sepanjang pulau.

SNI-03-1726-2019 menyarankan pembangunan struktur kuat yang memiliki peluang maksimum 2% untuk tidak berfungsi dengan baik selama perkiraan masa pakai 50 tahun. Peluang 2% ini berarti bahwa desain harus mampu menahan gempa bumi yang sangat langka dan kuat dengan periode ulang yang setara dengan 2.475 tahun. Berdasarkan periode ulang 2.475 tahun, percepatan batuan dasar adalah 0,60 g, tetapi percepatan sebenarnya juga ditentukan oleh jenis tanah dan topografi. Hal ini setara dengan gempa kelas VIII pada skala MMI. Gambar 29. Bahaya gempa bumi dan tingkat risiko di Aceh Besar. memberikan representasi visual dari tingkat risiko gempa bumi di dalam dan sekitar wilayah WTG.



Gambar 29. Bahaya gempa bumi dan tingkat risiko di Aceh Besar.

Skala MMI mengklasifikasikan gempa bumi berdasarkan dampak di permukaan daripada energi yang dilepaskan (seperti skala Richter). Intensitas VIII didefinisikan sebagai:

"Kerusakan ringan pada struktur yang dirancang khusus; kerusakan yang cukup besar pada bangunan besar biasa dengan keruntuhan sebagian. Kerusakan besar terjadi pada struktur yang dibangun dengan buruk. Jatuhnya cerobong asap, tumpukan pabrik, kolom, monumen, dinding. Furnitur berat terbalik. Pasir dan lumpur dikeluarkan dalam jumlah kecil. Perubahan air sumur. Pengendara terganggu."

Data ini hanya memberikan kesan umum tentang besarnya gempa bumi yang dapat diperkirakan. Selama studi kelayakan, percepatan tanah puncak maksimum yang diharapkan harus dihitung untuk penilaian bahaya yang lebih tepat akibat gempa bumi.



2.6 Keanekaragaman hayati, kondisi sosio-ekonomi dan lingkungan

2.6.1 Kesan umum

Sebagian besar area proyek ditutupi dengan hutan, baik primer maupun sekunder. Beberapa 'spesies yang menjadi perhatian' masih dapat ditemukan di hutan-hutan ini. Petani kecil juga memanfaatkan hutan ini, penebang (ilegal), pemburu dan beberapa pengusaha rekreasi yang telah mendirikan kabin untuk kunjungan lapangan. Hutan di ujung barat laut Provinsi Aceh ini memiliki status dilindungi yang ditujukan untuk konservasi tanah (mengurangi risiko tanah longsor). Namun, terlepas dari perlindungan ini, beberapa lereng telah dibersihkan untuk pertanian kecil dan bangunan rekreasi.



Gambar 30. Lokasi turbin dan kawasan hutan di Provinsi Aceh.

Ada perambahan yang signifikan di sepanjang tepi hutan: semakin banyak lahan hutan dikonversi menjadi pertanian dan daerah pemukiman.

Daerah tengah, dataran rendah dari wilayah PLTB yang diusulkan adalah gabungan dari desa-desa kecil, pertanian kecil, dan sawah. Dampak dari PLTB di daerah ini merupakan gabungan dari dampak keanekaragaman hayati (tabrakan burung) dan dampak lingkungan pada penduduk (kebisingan, kerlipan).

2.6.2 Keanekaragaman hayati dan dampak lingkungan

RTRW Kabupaten Aceh Besar, sebagaimana diatur dalam Qanun Aceh No. 4/2013, dan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 580/2018, menetapkan sebagian besar wilayah proyek sebagai Hutan Lindung. Kawasan Hutan Lindung umumnya diperuntukkan untuk melindungi keadaan hutan, guna menjaga dan melindungi fungsi ekologis seperti daerah aliran sungai, pencegahan banjir, pengendalian erosi, dan menjaga kesuburan tanah.



Status Hutan Lindung memungkinkan masyarakat lokal untuk memanfaatkan area tersebut untuk perkebunan dan pengumpulan kayu. Instalasi pembangkit listrik, transmisi, dan distribusi listrik, serta penerapan teknologi energi terbarukan diizinkan di daerah-daerah ini, ketika hal ini 'tidak dapat dihindari,' dalam kondisi tertentu¹¹. Meskipun peraturan-peraturan di Indonesia mengizinkan PLTB di hutan lindung, status dilindungi dan keberadaan spesies yang menjadi perhatian ini dapat mempersulit pendanaan internasional. Pendanaan internasional untuk pembangunan di dalam hutan lindung tidak diberikan dengan mudah. Pengaruh terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati harus dibatasi sebanyak mungkin dan setiap kerugian harus dikompensasi.

Singkatnya, dampak utamanya adalah:

Dampak keanekaragaman hayati:

- Fragmentasi habitat (terutama jalan dan jalur transmisi)
- Pembukaan area: perambahan, penebangan liar, pemakai tanah tanpa izin, perburuan, pertanian
- Tabrakan burung & kelelawar (turbin)
- Sengatan listrik

Dampak lingkungan:

- Risiko erosi dan tanah longsor (jalan, platform)
- Meningkatnya kekeruhan di aliran sungai dan sungai akibat erosi
- Dampak visual turbin
- Kerlipan & kebisingan frekuensi rendah

Flora dan fauna yang diamati:

Pada tahun 2022, survei keanekaragaman hayati dan studi meja dilakukan di area proyek, menunjukkan nilai dan risiko keanekaragaman hayati. Di bawah ini dijelaskan ringkasan singkat, menunjukkan nilai dan risiko berdasarkan kategori daftar merah global IUCN (*International Union for Conservation of Nature's Red List of Threatened Species*). Kategorisasi umumnya didasarkan pada tingkat penurunan populasi, rentang geografis, jika spesies memiliki ukuran populasi kecil, jika spesies hidup di daerah terbatas atau sangat kecil, dan jika analisis kuantitatif menunjukkan probabilitas tinggi spesies punah di alam liar¹². Diurutkan dari yang paling parah hingga yang paling tidak terancam, kategorinya adalah sebagai berikut: Punah (*Extinct* atau EX), Punah di Alam Liar (*Extinct in the Wild* atau EW), Kritis atau Sangat Terancam Punah (*Critically Endangered* atau CR), Terancam (*Endangered* atau EN), Rentan (*Vulnerable* atau VU), Hampir Terancam (*Near Threatened* atau NT), Risiko Rendah (*Least Concern* atau LC), Data Kurang (*Data Deficient* atau DD), dan Tidak Dievaluasi (*Not Evaluated* atau NE).

Harus dicatat bahwa spesies yang disajikan telah diamati di wilayah Kabupaten Aceh Besar yang lebih luas, yang termasuk lokasi proyek. Oleh karena itu, belum tentu bahwa spesies ini benar-benar dapat ditemukan di lokasi proyek.

¹¹ Mengacu pada Peraturan Pemerintah 23/2021 dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan 7/2021.

¹² <https://www.britannica.com/topic/IUCN-Red-List-of-Threatened-Species>



Potensi spesies yang menjadi perhatian di Kabupaten Aceh Besar adalah:

- 25 spesies burung pemangsa. Sebagian besar spesies dilindungi oleh hukum Indonesia. Dua dari spesies ini (*Black-Winged Kite* dan *Wallace's Hawk-Eagle*) ditetapkan oleh IUCN sebagai 'rentan';
- 5 spesies bangau, dengan 4 di antaranya menjadi 'spesies yang menjadi perhatian';
- 22 spesies lain (seperti Rangkong, Burung Daun, Bebek, Merpati), di mana 8 spesies memiliki status IUCN (kritis) terancam;
- 18 spesies burung walet dan burung layang-layang. Namun, spesies ini berlimpah dan tidak dianggap sebagai 'spesies yang menjadi perhatian';
- 17 spesies kelelawar, tidak satu pun dari mereka memiliki status perlindungan nasional, tetapi rubah terbang besar dianggap 'terancam' oleh IUCN.

Sementara mamalia ikonik seperti harimau Sumatra, orang utan dan gajah Sumatra mungkin tidak ada lagi di daerah ini, beberapa mamalia yang terancam punah telah diamati, seperti beruang madu, trenggiling Sunda, kera ekor panjang dan kukang Sumatra. Spesies terbang rentan terhadap tabrakan dengan sudu turbin angin, sedangkan mamalia lebih rentan terhadap fragmentasi habitat dan peningkatan aksesibilitas (memfasilitasi pemburu). Sengatan listrik di saluran listrik dan gardu induk juga merupakan masalah yang umum.

Dampak terhadap keanekaragaman hayati dan lingkungan dapat diminimalkan ketika poin-poin berikut diperhitungkan:

- Gunakan kembali sebanyak mungkin infrastruktur yang ada, seperti saluran kabel listrik yang sudah ada ke jaringan listrik dan jalan akses;
- Hindari pembangunan jalan dan/atau saluran kabel listrik sedemikian rupa sehingga hutan yang ada terbagi menjadi beberapa bagian, dan gunakan tata letak jalan dan jaringan listrik yang sama di antara turbin untuk menghindari fragmentasi habitat;
- Idealnya hanya satu titik akses yang harus dibuat untuk memasuki PLTB untuk membatasi pembukaan area untuk kegiatan lain seperti penebangan / perburuan liar; dan
- Membatasi jumlah hutan yang dibuka di sekitar setiap turbin angin (umumnya antara 50 hingga 100*100 m area). Ruang ini digunakan untuk *crane* dan penyimpanan. Ruang ini dapat diminimalkan dengan menggunakan *self-climbing crane* daripada *crane* tradisional. Dengan perencanaan yang matang, penyimpanan sementara sudu turbin angin di sebelah jalan, daripada di sebelah turbin angin, juga dapat mengurangi area yang diperlukan di sekitar turbin angin.

Sebagai bagian dari Analisis Dampak Lingkungan dan Sosial, studi dasar keanekaragaman hayati, penilaian risiko dan langkah-langkah mitigasi harus dilakukan selama fase kelayakan.

2.6.3 Dampak sosial

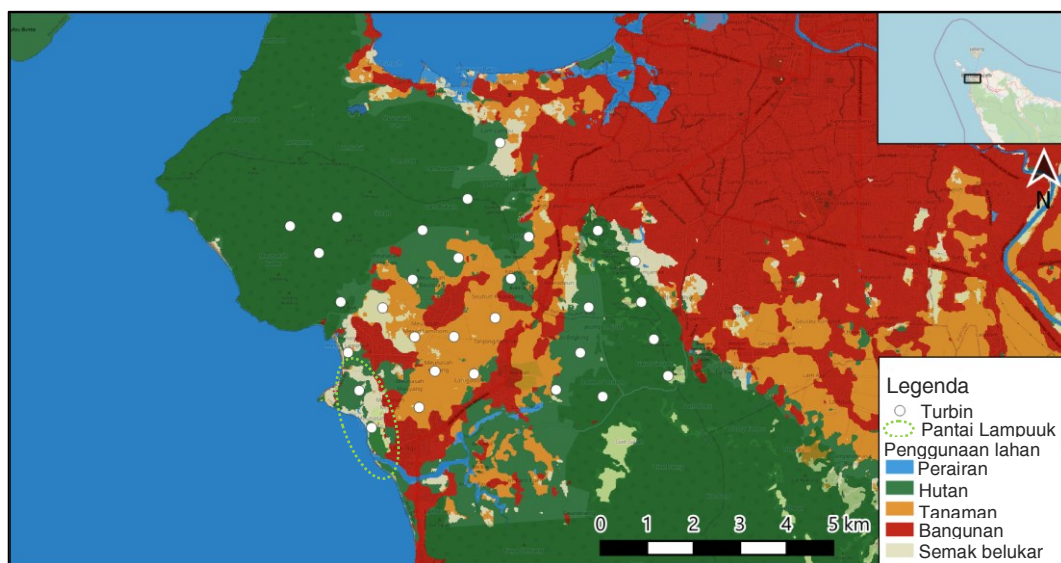
Lokasi proyek terletak di Kecamatan Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar. Bagian tengah dari lokasi proyek terdiri dari beberapa pedesaan yang dikelilingi oleh sawah. Populasi seluruh kecamatan ini adalah sekitar 15.000 jiwa. Jumlah penduduk di area proyek ini tidak diketahui. Pantai di distrik ini merupakan sumber pendapatan penting karena menarik banyak wisatawan (lokal dan regional).



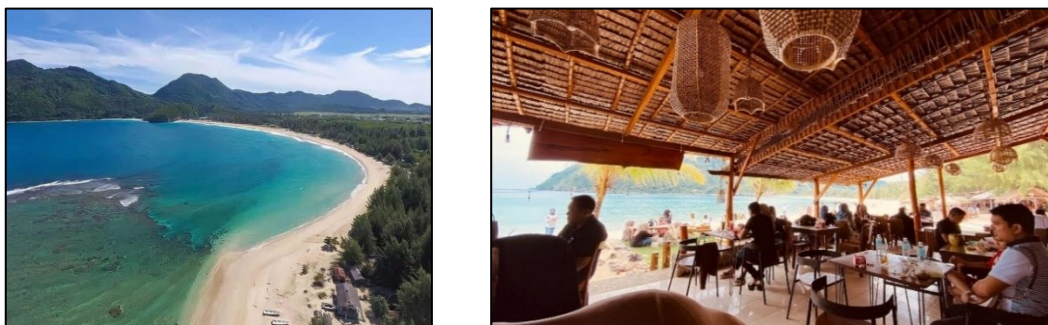
Kecamatan ini terdiri dari gabungan petani kecil, pemilik toko, dan pengusaha yang mengoperasikan warung kecil (di pantai) dan restoran. Ada juga pekerja dari berbagai tingkat pekerjaan yang pulang pergi ke kota terdekat, Banda Aceh.



Gambar 31. Pedesaan di wilayah proyek, bagian dari Kecamatan Lhoknga.



Gambar 32. Peta penggunaan lahan berdasarkan citra satelit (ESRI/Sentinel 2, 2023). Desa / bangunan dan tanaman terletak di tengah lembah yang dikelilingi langsung oleh hutan.



Gambar 33. Tepi pantai di desa pesisir Lampuuk (lihat lokasi relatif pada gambar sebelumnya).

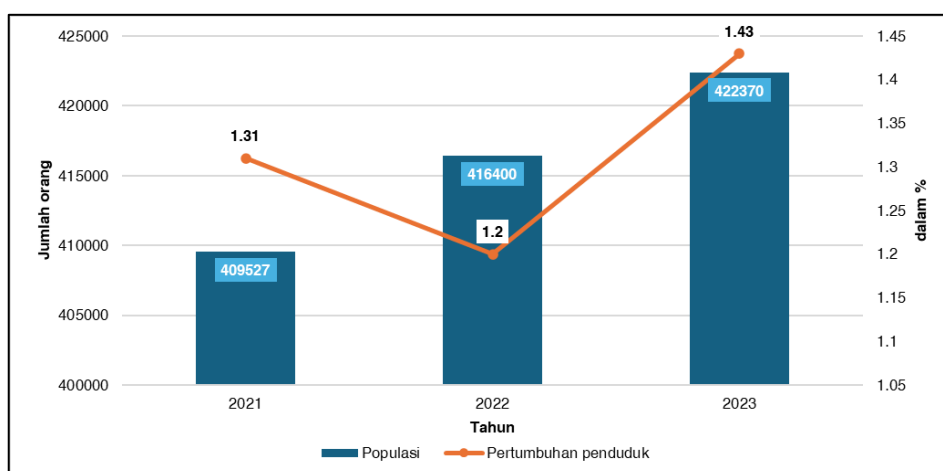
Sulit untuk memperkirakan dampak sosial (dan ekonomi) dari turbin di daerah ini karena tidak ada gambaran yang jelas tentang bagaimana turbin akan mempengaruhi pemandangan dan apakah pengunjung pantai akan terganggu oleh kehadiran turbin (atau bahkan tertarik oleh turbin tersebut). Letak turbin yang dekat dengan desa-desa juga dapat menimbulkan dampak (visual), tetapi terlepas dari kehadiran visual tersebut, dampak sosial yang ditimbulkan diperkirakan terbatas. Dampak ini dapat dibagi menjadi beberapa aspek:

- Kehilangan lahan pertanian yang akan digunakan untuk jalan atau platform baru;
- Konstruksi sementara di jalan, platform dan turbin (penurunan aksesibilitas dan kebisingan);
- Transportasi sementara bahan bangunan dan turbin (penurunan aksesibilitas dan kebisingan); dan
- Dampak visual jangka panjang dari turbin di daerah tersebut;

Paragraf berikutnya memberikan gambaran umum tentang statistik populasi dan pekerjaan di kabupaten tersebut.

Populasi

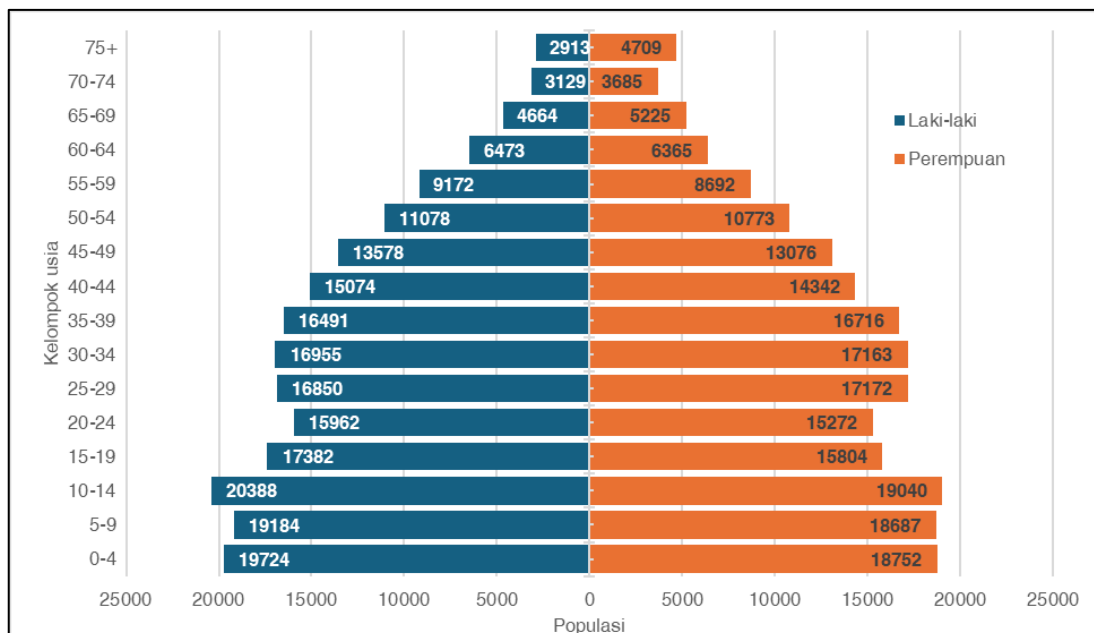
Grafik populasi dan tingkat pertumbuhan penduduk tahunan ditunjukkan pada Gambar 34. Terlihat bahwa laju pertumbuhan penduduk tahunan di Kabupaten Aceh Besar berfluktuasi pada tahun 2021-2023. Jumlah total penduduk terus meningkat dalam periode yang sama.



Gambar 34. Laju pertumbuhan penduduk dan penduduk tahunan Aceh Besar pada tahun 2021-2022 (Sumber: Statistik Aceh Besar (bps.go.id)).



Piramida penduduk kabupaten ditampilkan pada Gambar 35. Perlu dicatat bahwa rasio gender adalah 1,02 pada tahun 2022.



Gambar 35. Piramida penduduk di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2022 (Sumber: [Badan Statistik Aceh Besar \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Pekerjaan, pendidikan, dan perkembangan

Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja (TPAK) adalah perkiraan proporsi penduduk usia kerja yang terlibat aktif dalam angkatan kerja. Tingkat Pengangguran Terbuka (TPT) adalah proporsi populasi usia kerja yang tidak aktif terlibat dalam angkatan kerja. TPAK di Aceh Besar pada tahun 2023 sebesar 66,86%, meningkat dari tahun sebelumnya. Tingkat Pengangguran Terbuka (TPT) pada tahun yang sama adalah 8,17%, berkurang dari tahun sebelumnya, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran terbuka di Aceh Besar pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Provinsi Aceh](https://bpsprovinsiaceh.go.id)).

Metrik (dalam %)	Tahun		
	2021	2022	2023
Partisipasi tenaga kerja	61,67	65,31	66,86
Tingkat pengangguran	7,70	8,28	8,17

Jumlah pekerja menurut pendidikan tertinggi disajikan pada Tabel 3. Pada tahun 2019, angkatan kerja didominasi oleh pekerja yang pendidikan tertingginya adalah sekolah menengah atas. Pada tahun 2019, penduduk yang tidak pernah bersekolah sebanyak 521 orang, belum tamat SD sebanyak 5.658 orang, yang tamat SD sebanyak 21.479 orang, yang melanjutkan ke SMP sebanyak 24.632 orang, yang melanjutkan ke SMA sebanyak 60.126 orang, yang melanjutkan ke SMK sebanyak 7.821, dan melanjutkan ke perguruan tinggi sebanyak 8.074.



Tabel 3. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Aceh Besar pada tahun 2019 (Sumber: [Badan Pusat Statistik \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Pekerja menurut pendidikan tertinggi (jumlah orang)	Laki-laki	Perempuan	Total
Tidak pernah/Belum masuk sekolah	262	259	521
Belum lulus sekolah dasar	3.454	2.204	5.658
Sekolah Dasar	15.388	6.091	21.479
Sekolah Menengah Pertama	17.099	7.533	24.632
Sekolah Menengah Atas	45.249	14.877	60.126
Sekolah Menengah Kejuruan	6.428	1.393	7.821
Universitas	2.946	5.128	8.074
Total	17.437	12.272	29.709

Angka Partisipasi Murni dalam data demografis mewakili rasio antara jumlah pendaftaran untuk kelompok usia yang sesuai dengan usia sekolah resmi di tingkat dasar atau menengah, dengan total populasi pada kelompok usia yang sama pada tahun tertentu. Di kabupaten ini, angka tersebut meningkat di berbagai tingkat pendidikan pada tahun 2022-2023. Angka ini ditunjukkan pada Tabel 4. Angka Partisipasi Murni di Aceh Besar pada tahun 2023 (Sumber: BPS Aceh Besar (bps.go.id)). **Error! Not a valid bookmark self-reference..**

Tabel 4. Angka Partisipasi Murni di Aceh Besar pada tahun 2023 (Sumber: [BPS Aceh Besar \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Angka Partisipasi Murni	Tahun	
	2022	2023
Tingkat pendidikan		
Sekolah dasar (SD)	99,13	99,61
Sekolah menengah pertama (SMP)	85,11	88,50
Sekolah menengah atas (SMA)	72,07	78,18

Jumlah fasilitas pendidikan di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2019 ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Fasilitas pendidikan di Aceh Besar pada tahun 2019 (Sumber: [Badan Pusat Statistik \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

	Jumlah sekolah dasar	Jumlah sekolah dasar Islam	Jumlah sekolah menengah pertama Islam	Jumlah sekolah menengah atas Islam	Jumlah sekolah menengah atas	Jumlah sekolah kejuruan
Unit sekolah	211	50	32	25	44	10

Indeks Pembangunan Manusia (HDI) mengukur pencapaian pembangunan manusia berdasarkan sejumlah komponen dasar kualitas hidup, yang didasarkan pada tiga dimensi:

- Hidup panjang dan sehat (melalui angka harapan hidup saat lahir);
- Pengetahuan (melalui indikator angka melek huruf dan rata-rata lama sekolah), dan



- Kehidupan yang layak (melalui indikator daya beli masyarakat untuk sejumlah kebutuhan pokok).

Indeks Pembangunan Manusia di Kabupaten Aceh Besar dari tahun 2017 hingga 2019 mengalami sedikit peningkatan dari 72 menjadi 73,55, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Aceh Besar \(bps.go.id\)](https://bps.go.id) dan [BPS Provinsi Aceh](https://bps.go.id)).

Metrik	Tahun		
	2021	2022	2023
Indeks Pembangunan Manusia	75,03	75,44	75,98
Indeks Pemberdayaan Gender	48,11	47,65	47,20
Indeks Pembangunan Gender	94,93	95,22	95,29

Indeks Pemberdayaan Gender (GEI) mengukur ketidaksetaraan gender dalam tiga dimensi mendasar:

- Partisipasi dan pengambilan keputusan dalam hal ekonomi;
- Partisipasi dan pengambilan keputusan dalam hal politik; dan
- Kekuasaan atas sumber daya ekonomi.

GEI di kabupaten tersebut dari tahun 2021 hingga 2023 menunjukkan penurunan secara keseluruhan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Indeks Pembangunan Gender (GDI) adalah ukuran ketidaksetaraan gender berdasarkan pencapaian dalam tiga dimensi mendasar:

- Kesehatan (melalui angka harapan hidup wanita dan pria saat lahir);
- Pendidikan (melalui perkiraan lama bersekolah bagi anak-anak perempuan dan laki-laki, dan rata-rata lama bersekolah untuk orang dewasa perempuan dan laki-laki usia 25 tahun dan lebih tua); dan
- Penguasaan atas sumber daya ekonomi (via perkiraan pendapatan perempuan dan laki-laki).

GDI di kabupaten tersebut dari tahun 2021 hingga 2023 menunjukkan tren yang secara umum meningkat, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

2.7 Desain jaringan transmisi

2.7.1 Titik koneksi

Berdasarkan lokasi tata letak awal PLTB yang dibayangkan, titik koneksi terdekat ke jaringan PLN yang ada telah ditentukan. Gardu induk PLN 150 kV Banda Aceh yang terletak di selatan kota Banda Aceh dipilih untuk studi ini. Foto udara dari gardu induk ini terdapat pada Gambar 36. Lokasi gardu induk PLN 150 kV Banda Aceh. Sumber: Google Maps. Gambar 36. Karena studi saat ini tidak termasuk studi interkoneksi jaringan listrik, diasumsikan bahwa PLTB dapat dihubungkan ke jaringan yang ada, tidak mempengaruhi fungsi jaringan secara negatif, dan oleh karena itu sistem baterai tidak diperlukan. Selain itu, diasumsikan bahwa *busbar* tersedia di gardu induk untuk menghubungkan PLTB dengan gardu induk.



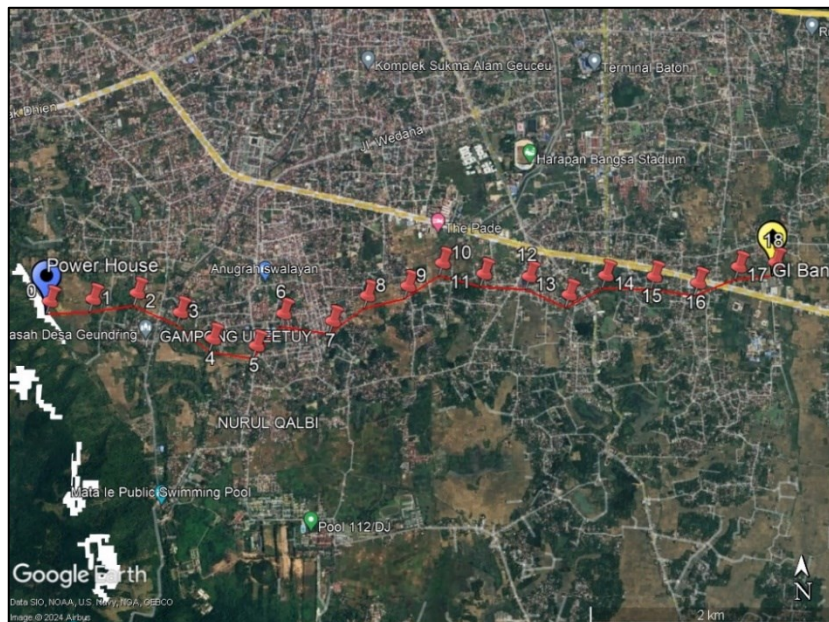
2.7.2 Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi

The diagram illustrates the power system for the Aceh wind farm. It shows a 150 kV transmission line from Banda Aceh Substation to the Aceh wind farm. The line is labeled 'ACSR 2 x 240 mm² 6.63 km'. The wind farm is connected to the 150 kV line via a 'Powerhouse' and a 'Cable 1 x 3c x 240mm² 20kV, 1.63km'. The wind farm consists of three groups of turbines, each connected to a 20 kV busbar. The turbines are labeled WTG 1, WTG 2, WTG 10, WTG 11, WTG 12, WTG 20, WTG 21, WTG 22, and WTG 30. The diagram also shows a '3x substation with transformer 150/20 kV 60 MVA YNyn0, Z= 12.5%' and an 'Aceh wind farm 20 kV'.

Saluran transmisi udara antara rumah pembangkit dan gardu induk PLN diasumsikan sebagai garis lurus antara kedua lokasi, meliputi 6 km seperti yang divisualisasikan pada Gambar 38. Representasi skematis dari posisi saluran transmisi udara antara rumah pembangkit dan gardu induk Banda



Aceh. Gambar 38. Sebanyak 19 menara transmisi direncanakan dengan jarak perantara antar menara sebesar 340-450 m.



Gambar 38. Representasi skematis dari posisi saluran transmisi udara antara rumah pembangkit dan gardu induk Banda Aceh.

2.8 Asesmen keluaran energi

Keluaran energi disajikan sebagai rata-rata tahunan dan oleh karena itu disebut Produksi Energi Tahunan (*Annual Energy Production/AEP*). AEP bruto dimodelkan dengan menggabungkan iklim angin jangka panjang yang dihitung dan spesifikasi turbin angin dari kurva dayanya.

Untuk asesmen keluaran energi PLTB Aceh Besar, kecepatan angin jangka panjang ditentukan berdasarkan Simulasi Eddy Besar (*Large-Eddy Simulations/LES*) dengan model ASPIRE dari Whiffle. Kekuatan utama dari model LES ini adalah kemampuannya untuk memberikan representasi rinci dari pola aliran yang kompleks. Hal ini penting karena WTG yang dipertimbangkan sebagian ditempatkan di dataran yang kompleks. LES telah dilakukan dan diverifikasi oleh tiang pengukuran (*mast*) untuk lokasi terdekat. Domain simulasi hanya tumpang tindih secara sebagian dengan lokasi PLTB Aceh Besar. Oleh karena itu, tiang pengukuran virtual dari LES digunakan sebagai masukan untuk perhitungan windPRO.

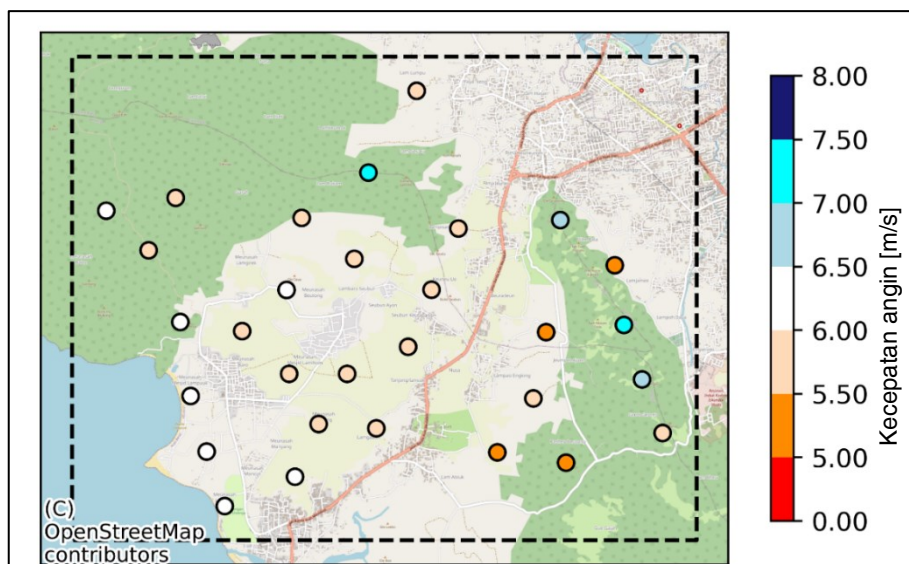
Resolusi horizontal LES adalah 100 m dan resolusi dalam arah vertikal adalah 40 m. Klimatologi didasarkan pada tahun representatif (2021).

Gambar 39. Hasil kecepatan angin rata-rata jangka panjang dari model ASPIRE pada ketinggian 140 m di lokasi-lokasi turbin. Lingkaran berbatas hitam mewakili turbin angin, sedangkan warna di dalam lingkaran menunjukkan kecepatan angin rata-rata jangka panjang masing-masing. Gambar 39 menunjukkan klimatologi yang dihasilkan di lokasi WTG. Kecepatan angin jangka panjang yang dimodelkan, yang dirata-ratakan dari semua 30 WTG pada ketinggian 140 m yang direncanakan yaitu 140 m, adalah 6,0 m/s. Lokasi turbin angin dengan kecepatan angin lebih rendah dari 6 m/s ditandai



dengan warna merah dan oranye. Harus dicatat bahwa kecepatan angin rata-rata di *Global Wind Atlas* (GWA), jauh lebih rendah (2,6 m/s). Namun demikian, verifikasi model numerik melalui pengukuran sangat penting, dan dalam hal ini, model LES yang lebih rumit digunakan untuk analisis lebih lanjut.

AEP kemudian dihitung berdasarkan kurva daya WTG referensi 4 MW dengan diameter rotor hampir 170 m dan ketinggian naf 140 m.



Gambar 39. Hasil kecepatan angin rata-rata jangka panjang dari model ASPIRE pada ketinggian 140 m di lokasi-lokasi turbin. Lingkaran berbatas hitam mewakili turbin angin, sedangkan warna di dalam lingkaran menunjukkan kecepatan angin rata-rata jangka panjang masing-masing.

2.8.1 Rugi-rugi energi

AEP neto dihitung dengan mengurangi rugi-rugi produksi energi dari AEP bruto. Hal ini merupakan rugi-rugi karena sejumlah penyebab, seperti tidak tersedianya turbin angin dan rugi-rugi terkait kinerja atau rugi-rugi kelistrikan. Rugi-rugi ini ditentukan baik oleh perhitungan atau oleh penilaian ahli dan dimasukkan sebagai nilai persentase AEP tidak termasuk rugi-rugi olakan.

Dalam laporan ini, AEP neto ditampilkan sebagai AEP P50. Nilai P50 adalah tingkat keyakinan statistik yang menunjukkan nilai AEP yang dapat dilampaui dengan probabilitas 50%. Dengan kata lain, P50 AEP adalah produksi energi tahunan rata-rata yang diperkirakan selama masa pakai PLTB. Tabel 7Tabel 7 menyajikan perkiraan rugi-rugi di tingkat PLTB.

Tabel 7. Rugi-rugi yang diperkirakan di tingkat PLTB

Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
Interaksi	Rugi-rugi olakan [%]	8,6%	Rugi-rugi olakan adalah pengaruh agregat pada produksi energi oleh PLTB, yang dihasilkan dari perubahan kecepatan angin yang disebabkan oleh dampak <i>downwind</i> dari turbin angin satu sama lain. Rugi-rugi olakan dimodelkan menggunakan model standar NO Jensen



Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
			(RISØ/EMD) (versi PARK2 – 2018) di windPRO, menghasilkan rugi-rugi olakan keseluruhan sebesar 8,6%.
	Rugi-rugi halangan [%]	0,0%	PLTB tidak hanya berinteraksi dengan kecepatan angin hilir (yaitu rugi-rugi olakan), tetapi juga berinteraksi dengan penurunan kecepatan angin hulu. Pengurangan kecepatan angin hulu ini disebut efek penyumbatan. Model <i>Self Similar</i> oleh Forsting (2016) ¹³ dengan parameterisasi linier digunakan untuk menghitung halangan. Halangan 0% diperkirakan untuk tata letak terkait.
Ketersediaan	Ketidaktersediaan [%]	4,0%	Rugi-rugi produksi ini berkaitan dengan periode turbin angin yang tidak beroperasi karena pemeliharaan, kerusakan dan reorientasi nasel. Rugi-rugi sebesar 4,0% diperhitungkan untuk PLTB dengan lebih dari 5 WTG.
	<i>Balance of Plant</i> [%]	0,1%	Rugi-rugi <i>Balance of Plant</i> terjadi karena tidak tersedianya transformator stasiun atau jalan akses dan karenanya menghambat operasi normal PLTB.
	Waktu henti jaringan listrik [%]	0,5%	Rugi-rugi waktu henti jaringan disebabkan oleh tidak tersedianya jaringan dari operator jaringan listrik.
Performa	Rugi-rugi kurva daya [%]	2,0%	Rugi-rugi kurva daya adalah hasil dari operasi turbin angin yang kurang optimal. Hal ini terjadi ketika turbin angin beroperasi di luar kondisi desain kurva daya. Rugi-rugi kinerja konservatif sebesar 2,0% diasumsikan karena tidak ada kurva daya spesifik lokasi yang tersedia.
	Histerisis angin kencang [%]	0,5%	Pada kecepatan angin <i>cut-out</i> , turbin angin dimatikan sebagai tindakan keamanan. Model perhitungan mengasumsikan bahwa turbin angin beroperasi penuh sampai kecepatan angin <i>cut-out</i> dan dimatikan dari titik itu. Pada kenyataannya, jika kecepatan angin berfluktuasi di sekitar kecepatan angin <i>cut-out</i> , turbin angin akan mati sampai kecepatan angin di bawah kecepatan angin <i>re-cut</i> . Rugi-rugi sebesar 0,5% diasumsikan.
	Ketidaksejajaran geleng [%]	0,0%	Rugi-rugi ketidaksejajaran geleng disebabkan oleh ketidakmampuan WTG untuk menyelaraskan diri sepenuhnya dengan arah angin aktual dan karenanya kehilangan potensi produksi. Alasannya bisa jadi sistem operasi lama yang tidak mampu mengukur arah angin saat ini secara akurat. Hal ini diasumsikan tidak akan terjadi.

¹³ Meyer Forsting, AR, Troldborg, N., & Gaunaa, M. (2016). The flow upstream of a row of aligned wind turbine rotors and its effect on power production. *Wind Energy*, 20(1), 63–77.



Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
Kelistrikan	Rugi-rugi kelistrikan [%]	2,0%	Rugi-rugi kelistrikan pada kabel daya terjadi karena resistensi kabel, yang meningkatkan suhu kabel dan mengakibatkan hilangnya daya ini. Nilai konservatif diasumsikan sebesar 2,0%.
	Rugi-rugi transformator [%]	1,0%	Transformator WTG mengonsumsi energi saat level tegangan meningkat. Karena rugi-rugi transformator tidak tergabung dalam kurva P-V, rugi-rugi sebesar 1,0% diasumsikan.
	Konsumsi listrik WTG [%]	0,1%	Turbin angin membutuhkan listrik untuk mendukung kegiatan operasional seperti sistem perangkat lunak. Rugi-rugi energi sebesar 0,1% diasumsikan.
Lingkungan	Pematan karena lapisan es, petir dll. [%]	0,3%	Pematan merupakan tindakan keamanan yang diperlukan selama periode dingin ketika es menumpuk di sudu atau selama badai petir. Tidak ada lapisan es yang diperkirakan di lokasi ini. Rugi-rugi akibat petir sebesar 0,3% diasumsikan.
	Degradasi sudu [%]	1,3%	Seiring waktu, efisiensi aerodinamis sudu turbin angin menurun karena degradasi. Untuk turbin angin darat, ini terutama disebabkan oleh bahan organik, partikel debu, dan partikel lainnya yang terakumulasi pada sudu. Efek ini menumpuk dari waktu ke waktu. Rugi-rugi degradasi tahunan sebesar 0,1% diasumsikan. Selama masa pakai 25 tahun, diperkirakan rugi-rugi sebesar 1,3%.
	Suhu tinggi dan rendah [%]	2,0%	Penurunan suhu terjadi ketika turbin angin beroperasi di luar kisaran suhu operasi. Rugi-rugi diperkirakan 2,0%.
	Pertumbuhan & penebangan pohon [%]	0,0%	Pungguk bukit di Utara dan Timur dari lokasi turbin angin ditutupi oleh hutan dan perubahan ketinggian pohon atau penebangan pohon dapat menyebabkan kekasaran dan perubahan kecepatan angin yang berbeda. Namun, karena tidak ada penebangan pohon substansial yang diharapkan, dalam hal ini tidak ada rugi-rugi tambahan yang diperhitungkan.
Pembatasan	Pembatasan jaringan [%]	0,0%	Rugi-rugi akibat pembatasan jaringan tidak dipertimbangkan untuk PLTB ini.
	Pembatasan kebisingan [%]	0,0%	Turbin angin beroperasi dalam mode daya yang mengurangi kebisingan untuk meminimalkan tingkat kebisingan di rumah-rumah terdekat. Karena lokasi ini terletak di daerah terpencil, tidak ada rugi-rugi yang diharapkan.
	Pembatasan kedipan bayangan [%]	0,0%	Kedipan bayangan adalah efek ketika sudu rotor secara berkala menimbulkan bayangan ke area tertentu. Pembatasan kedipan bayangan diperkenalkan dengan



Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
			tujuan mengurangi efek signifikan pada perumahan. Karena lokasi ini terletak di daerah terpencil, tidak ada rugi-rugi yang diperkirakan.
	Mitigasi burung/kelelawar [%]	0,0%	Analisis lengkap tentang habitat potensial burung dan/atau kelelawar yang dilindungi akan dilakukan dalam studi kelayakan. Pada saat ini, rugi-rugi ini diasumsikan 0,0%.
	Manajemen sektor angin [%]	0,0%	Untuk menjamin masa pakai WTG yang diharapkan, apa yang disebut dengan studi Asesmen Lokasi dilakukan oleh produsen WTG. Ketika Asesmen Lokasi ini menunjukkan beban yang melebihi pada komponen WTG, berdasarkan kondisi iklim tertentu, ada kebutuhan untuk mengubah mode operasi normal WTG ke program alternatif. Hal ini sering termasuk penerapan mode daya yang dikurangi yang sering mengakibatkan rugi-rugi produksi. Pada saat ini diasumsikan 0,0%.
Sub-total rugi-rugi non-interaksi [%]		13,0%	Akumulasi semua rugi-rugi yang disebutkan di atas, tidak termasuk rugi-rugi olakan. Berdasarkan $1 - (1 - \text{rugi-rugi A}) * (1 - \text{rugi-rugi B}) * (1 - \text{rugi-rugi C}) * \dots$ dll.
Total rugi-rugi [%]		20,5%	Akumulasi semua rugi-rugi yang disebutkan di atas, termasuk rugi-rugi olakan. Berdasarkan $1 - (1 - \text{rugi-rugi A}) * (1 - \text{rugi-rugi B}) * (1 - \text{rugi-rugi C}) * \dots$ dll.



2.8.2 Keluaran energi termasuk ketidakpastian

Memasukkan ketidakpastian model mengarah pada peningkatan keandalan penilaian sumber daya angin. Biasanya, P90 AEP digunakan untuk mengekspresikan dampak ketidakpastian. P90 adalah tingkat kepercayaan statistik yang menunjukkan nilai AEP yang dapat dilampaui dengan probabilitas 90%. Ketika distribusi probabilitas normal diasumsikan, nilai Pxx ditemukan melalui rumus berikut: $P90 = P50 * (1 - 1,28 * \sigma)$. Ketidakpastian [dalam %] ditetapkan sebagai σ .

Di sini kami mengasumsikan ketidakpastian konservatif sebesar 20% karena perhitungan murni didasarkan pada model numerik dan tidak ada pengukuran yang dilakukan di tempat pada tahap ini. Nilai P90 yang dihasilkan diberikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Keluaran energi untuk semua 30 WTG di PLTB Aceh Besar

Parameter [Unit]	Jumlah
Jumlah WTG baru	30
Nilai Daya per WTG [MW]	4,0
Total Nilai Daya [MW]	120,0
Diameter rotor [m]	~170
Tinggi naf [m]	140
Kepadatan udara [kg/m ³]	1,151
Kecepatan angin [m/s]	6,0
Hasil bruto [MWh/th]	398.549
Hasil bruto termasuk efek olakan [MWh/th]	365.114
P50 [MWh/th] ¹⁴	317.543
P90 (25 th) [MWh/th]	236.154
P50 [jam/th]	2.646
P90 (25 th) [jam/th]	1.968

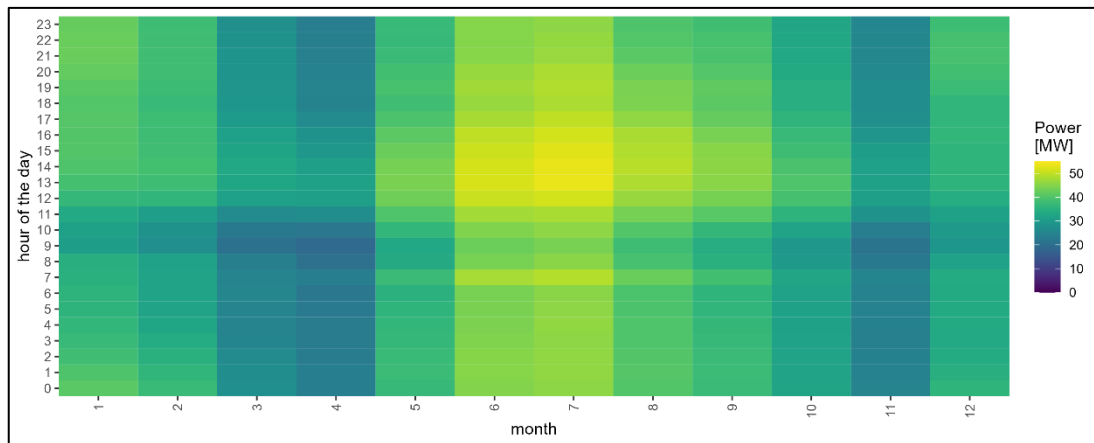
2.8.3 Variasi keluaran daya

Dalam Subbagian 2.8.2, kami telah memberikan perkiraan produksi tahunan P50, setara dengan 317.543 MWh per tahun. Sebelumnya, selama penilaian sumber daya angin pertama di Subbagian 2.2.2 kami telah menunjukkan bahwa untuk lokasi ini terdapat variasi yang besar dalam kecepatan angin sepanjang tahun, dengan kecepatan angin tertinggi selama bulan-bulan musim panas. Variabilitas ini memiliki efek langsung terhadap total keluaran daya PLTB pada saat-saat tertentu dalam setahun.

¹⁴ Perhatikan bahwa nilai P50 didasarkan pada perhitungan LES dengan kecepatan angin rata-rata lebih tinggi dari *Global Wind Atlas*. Kedua model didasarkan pada data model ERA5 yang mendasarinya. Ketidakpastian dalam AEP akan berkurang setelah pengukuran di lokasi dilakukan. Sampai pengukuran dilakukan, hasil penelitian ini harus diinterpretasikan dengan hati-hati.



Gambar 40 menunjukkan keluaran daya PLTB rata-rata untuk setiap bulan, dibagi lagi menjadi jam selama sehari penuh. Data masukan untuk angka ini berasal dari pemodelan ASPIRE yang dikombinasikan dengan variabilitas rata-rata EMD-WRF dalam kecepatan angin sepanjang tahun.



Gambar 40. Gambaran umum variasi bulanan dari keluaran daya rata-rata PLTB per jam dalam sehari berdasarkan nilai P50 dari Subbagian 2.8.2 dalam kombinasi dengan variasi bulanan dan per jam dalam kecepatan angin dari EMD-WRF (lihat juga Gambar 8)

2.9 Asesmen kasus bisnis

2.9.1 Asumsi komponen

Untuk menentukan kasus bisnis untuk PLTB, diperlukan untuk menguantifikasi parameter biaya masukan dan mendefinisikan asumsi yang digunakan. Hal ini dikategorikan ke dalam:

- Pekerjaan persiapan
- Turbin angin
- Pekerjaan sipil
- Pekerjaan kelistrikan
- Pengeluaran operasional

Dalam subparagraf berikut, masing-masing kategori di atas dijelaskan lebih lanjut.

Pekerjaan persiapan

Pekerjaan persiapan berikut harus dilaksanakan sebelum dimulainya sebagian besar pekerjaan desain dan pastinya sebelum dimulainya konstruksi. Biaya untuk pekerjaan persiapan ini termasuk dalam kasus bisnis:

- Studi pra-kelayakan
- Studi kelayakan penuh
- Penilaian dampak jaringan listrik
- Pengajuan izin



- Survei
 - Topografi
 - Evaluasi pelabuhan
 - Kondisi jalan
 - Geologi
 - Geoteknik
 - Lingkungan
 - Sosial
- Pengukuran angin (3 tiang pengukuran meteorologis selama 1 tahun)
- Pembebasan lahan, dengan asumsi Rp 200.000 /m² + pajak 5% untuk tanah kualitas rendah, Rp 520.000 /m² + 5% untuk lahan subur sedang, yang akan digunakan untuk:
 - Permukaan jalan baru
 - Permukaan diameter rotor
 - Permukaan peningkatan jalan
 - Permukaan rumah pembangkit dan gardu induk
 - Permukaan menara transmisi

Turbin angin

Jumlah komponen yang relevan untuk pemasangan 30 turbin angin di PLTB ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Kuantitas turbin angin relevan untuk PLTB Aceh Besar yang dibayangkan.

Komponen utama	Jumlah
Nasel termasuk generator (4 MW)	30 buah
Sudu (85 m)	90 buah
Segmen menara (tinggi total 140 m)	180 buah

Selanjutnya, asumsi (biaya) berikut digunakan dalam kasus bisnis:

- Produsen turbin angin asal Republik Rakyat Tiongkok (RRT) digunakan sebagai turbin referensi. Sejauh ini, pabrikan ini memiliki rekam jejak terbatas di luar RRT tetapi dapat menawarkan harga yang kompetitif. Jaminan kualitas melalui referensi klien, sertifikasi internasional, tes penerimaan pabrik, tes penerimaan situs, garansi kualitas, dll. diperlukan.
- Semua komponen turbin angin dikirim dari RRT ke Pelabuhan Malahayati (Medan) dan melalui transportasi darat membawa lokasi PLTB;
- Diasumsikan bea masuk sebesar 5% berlaku untuk generator dan sudu, dan sebesar 15% untuk bagian menara¹⁵;
- Biaya tersebut sudah termasuk transportasi, sewa *crane*, instalasi, dan *commissioning*.

¹⁵ Asumsi berdasarkan laporan PwC berjudul *Power in Indonesia: Investment and Taxation Guide* (Agustus 2023, Edisi ke-7)



Pekerjaan sipil

Kuantitas yang relevan untuk pekerjaan sipil yang diperlukan untuk pemasangan 30 turbin angin di PLTB ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 10. Daftar asumsi tentang komponen pekerjaan sipil.

Komponen utama	Sub-komponen	Jumlah
Jalan (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	Pembangunan jalan berkerikil baru di dalam lokasi PLTB	23 km
	Peningkatan jalan yang sudah ada	12 km
Memperkuat jembatan (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	Penguatan jembatan beton	7 jembatan
	Penguatan jembatan baja	1 jembatan
Fondasi (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	Jangkar (72 per fondasi)	2.160 buah
	Kandang jangkar	30 buah
	Beton (230 m ³ per fondasi)	6.900 m ³
	Baja (35 ton per fondasi)	1.050 ton
Crane hardstand (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	Crane hardstand (50 x 100 m) menggunakan kerikil	30 hardstand

Selanjutnya, asumsi (biaya) berikut digunakan dalam kasus bisnis:

- Pekerjaan sipil termasuk desain, bahan, transportasi dan tenaga kerja;
- Sebagian besar jalan dari pelabuhan ke lokasi dalam kondisi baik. Beberapa tikungan tajam terletak di dalam kota Banda Aceh. Diharapkan bahwa sebagian besar jembatan yang lebih besar tidak perlu diperkuat, karena mereka dibangun setelah tsunami tahun 2004 dan mungkin cukup kuat. Di dalam lokasi PLTB, beberapa jalan yang ada dapat digunakan. Terutama di pegunungan, jalan baru harus dibangun.
- Ada risiko biaya tambahan (tersembunyi) yang substansial. Misalnya, kebutuhan untuk memperkuat dermaga pembongkaran di pelabuhan atau untuk membuat area *lay-down* yang besar karena tantangan logistik di pelabuhan. Hal ini memerlukan analisis lebih lanjut dalam studi kelayakan berikutnya;
- Jumlah biaya yang digunakan dalam kasus bisnis didasarkan pada praktik terbaik, penelitian sekunder dan kunjungan lapangan terbatas yang menimbulkan ketidakpastian yang signifikan dalam asumsi biaya.



Pekerjaan kelistrikan

Daftar kuantitas untuk pekerjaan kelistrikan berikut telah ditentukan untuk PLTB pada Tabel 11.

Tabel 11. Daftar asumsi pada komponen pekerjaan listrik.

Komponen utama	Sub-komponen	Jumlah
Saluran transmisi (19 km, 48 menara)	Menara transmisi	19 unit
	Konduktor	1 set
	Isolator dan fitting; Tipe Normal	1 set
	Kabel <i>ACSR Hawk</i> 240 mm ²	1 set
	Kabel GSW 70 mm ²	1 set
	Kabel OPGW 70 mm ²	1 set
Rumah pembangkit (1 untuk seluruh PLTB)	<i>Switchgear</i> MV yang masuk	3 unit
	<i>Switchgear</i> LV	1 unit
	<i>DC Supplies</i>	1 unit
	Proteksi petir	1 unit
	Kabel 2x3C 300 mm	567 m
Pekerjaan listrik PLTB (antara pembangkit tenaga listrik, gardu induk dan turbin angin)	Transformator 20 kV (5 MVA)	30 unit
	<i>Switchgear</i>	30 unit
	Kabel MVAC (1 x 3c x 240) 50 dan 300 meter	163 km
	Sistem Penumaian	1 set
	Sistem Kontrol & Pemantauan	1 set
	Sistem Proteksi Kebakaran	1 set
	Sistem Hidran	1 set
	Fasilitas Air (Bersih dan Kotor)	1 set
Gardu induk (tiga untuk seluruh PLTB)	Transformator 150/20 kV 30 MVA	3 unit
	Resistor <i>Grounding</i> Netral	3 unit
	<i>Switchyard</i>	1 unit
	<i>Bay</i> masuk/keluar, <i>coupler</i> , <i>busbar</i> , Panel RCP	3 set
	<i>Switchgear</i> LV	1 set
	Sistem SAS/SCADA	1 set



Selanjutnya, asumsi (biaya) berikut digunakan dalam kasus bisnis:

- Pekerjaan kelistrikan termasuk desain, bahan, transportasi dan tenaga kerja;
- Karena studi saat ini tidak termasuk studi kelayakan interkoneksi jaringan listrik, diasumsikan bahwa PLTB dapat dihubungkan ke jaringan yang ada, tidak mempengaruhi fungsi jaringan secara negatif, dan oleh karena itu tidak diperlukan sistem baterai; dan
- Diasumsikan bahwa *busbar* tersedia di gardu induk untuk menghubungkan PLTB dengan gardu induk.

Pengeluaran operasional

Biaya berikut diperkirakan akan dikeluarkan ketika PLTB mulai beroperasi (juga disebut sebagai *Commercial Operation Date* atau CoD) hingga akhir masa pakai desain PLTB (25 tahun):

- Biaya pemeliharaan dan layanan turbin angin, pekerjaan sipil dan pekerjaan kelistrikan
- Biaya operasi bisnis, misalnya manajemen aset, manajemen keuangan, manajemen PJBL, dll.
- Kompensasi penggunaan hutan sekitar 50% dari lokasi proyek, dengan asumsi Rp 2 juta/ha/tahun
- Asuransi (misalnya asuransi kerusakan mesin, kewajiban pihak ketiga)

2.9.2 Asumsi biaya

Dalam tabel di bawah ini, asumsi biaya per komponen biaya tercantum yang berfungsi sebagai masukan untuk kasus bisnis. Kasus bisnis membedakan antara DEVEX (belanja pengembangan atau *development expenditure*, sebelum CoD), CAPEX (belanja modal atau *capital expenditure*) dan OPEX (belanja operasional atau *operational expenditure*). Karena ketidakpastian dan informasi terbatas yang menjadi dasar asumsi biaya, kisaran biaya (sebagai persentase dari biaya dasar) didefinisikan untuk masing-masing komponen biaya. Persebaran kisaran biaya tergantung pada ketidakpastian asumsi biaya.

Misalnya, untuk pekerjaan sipil, asumsi biaya memiliki ketidakpastian yang tinggi karena pengaruh survei fisik terhadap keputusan desain dan oleh karena itu harga konstruksi. Biaya turbin angin memiliki persebaran yang lebih kecil karena ketidakpastian disebabkan terutama oleh fluktuasi global, bukan oleh keputusan desain (seri produk).

Akumulasi rentang biaya akhirnya mengarah pada total biaya investasi batas bawah, dasar, dan batas atas. Dari sini, biaya per MW dihitung, yang merupakan indikasi seberapa tinggi investasi untuk PLTB tertentu ini dibandingkan dengan rata-rata global (berada di USD 1.3 juta/MW untuk tahun 2024¹⁶) dan dengan 7 lokasi lainnya.

¹⁶ Sumber: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/actual-and-forecast-onshore-wind-costs-2016-2025>



Tabel 12. Asumsi biaya per komponen biaya.

Komponen biaya	Biaya dasar termasuk PPN	Komentar	Kisaran biaya
Persiapan pekerjaan	USD 3.245.000	DEVEX: Sebelum Pemenuhan Pembiayaan	90% - dasar -120%
Manajemen proyek	USD 8.442.000	DEVEX: Sampai CoD	Dasar
Turbin angin	USD 83.619.000	CAPEX: termasuk transportasi dan instalasi	90% - dasar -120%
Pekerjaan sipil: fondasi	USD 12.021.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan sipil: jalan	USD 13.010.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan sipil: <i>crane hardstands</i>	USD 2.825.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan kelistrikan	USD 29.734.000	CAPEX	90% - dasar -120%
Pembebasan lahan	USD 24.309.000	CAPEX	90% - dasar -150%
Kontingensi risiko	USD 13.508.000	DEVEX + CAPEX	Dasar
Total biaya investasi batas bawah (DEVEX + CAPEX)	USD 171.123.000	Biaya investasi per MW: USD 1.423.000	
Total biaya investasi dasar (DEVEX + CAPEX)	USD 190.803.000	Biaya investasi per MW: USD 1.590.000	
Total biaya investasi batas atas (DEVEX + CAPEX)	USD 240.249.000	Biaya investasi per MW: USD 2.002.000	
Pengeluaran operasional dasar (OPEX)	USD 3.577.000 / tahun	Biaya operasional per MW/tahun: USD 29.000	

2.9.3 Parameter keuangan

Asumsi parameter keuangan berikut diterapkan dalam kasus bisnis:

- PLTB memiliki masa pakai desain 25 tahun;
- Periode penyusutan 25 tahun;
- Konstruksi dimulai pada tahun 2028,
- Pengadaan komponen PLTB diasumsikan pada tahun 2026, di mana indeksasi tahunan sebesar 3% digunakan pada tingkat harga pada tahun 2024;
- Pengeluaran operasional akan diindeks sebesar 5%;
- *Gearing* pinjaman sebesar 70%, ekuitas sebesar 30%;
- Jangka waktu utang adalah 10 tahun, struktur pembayaran anuitas;
- Tingkat bunga utang adalah 9,0%;
- Pajak properti dan pajak perusahaan sudah termasuk;
- Semua biaya sudah termasuk PPN;



- Biaya manajemen proyek atas nama pengembang sampai CoD diasumsikan sebesar 5% dari total biaya;
- Anggaran kontingensi risiko diasumsikan sebesar 8% dari total biaya termasuk biaya manajemen proyek;
- Setelah 25 tahun, nilai sisa PLTB yang ditransfer adalah sebesar USD 0 ke PLN;
- Struktur tarif sesuai dengan Peraturan Presiden 112/2022 digunakan. Peraturan ini mendefinisikan sebagai berikut:
 - Tarif batas atas per kWh pada tahun 1-10 untuk PLTB >20 MW = $9,54 \times \text{faktor lokasi}$ (menjadi 1,1 untuk Aceh Besar) = USD 10,49 sen/kWh
 - Tarif batas atas per kWh pada tahun 11-25 untuk PLTB >20 MW = USD 5,73 sen/kWh
 - Kasus bisnis mengasumsikan PJBL dengan tarif batas atas yang sudah dijelaskan di atas. Dalam praktiknya, pengembang mungkin harus bernegosiasi dengan PLN tentang hal ini yang akan mengarah pada tarif PJBL yang lebih rendah.
 - Tidak ada pemisahan komponen untuk struktur tarif yang digunakan, yaitu pada O&M dan pekerjaan kelistrikan.
- Dalam PJBL, tidak ada Energi Kontrak Tahunan (*Annual Contracted Energy* atau ACE) yang berlaku.

2.9.4 Hasil asesmen kasus bisnis

Berdasarkan keluaran energi yang dihitung dalam Subbagian 0, asumsi biaya sebagaimana tercantum dalam Subbagian 2.9.2, dan parameter keuangan yang diasumsikan dalam Subbagian 2.9.3, kasus bisnis PLTB telah ditentukan untuk skenario biaya batas bawah, dasar, dan batas atas. Kasus bisnis ini mengarah pada hasil berikut:

Tabel 13. Hasil asesmen kasus bisnis.

Hasil kasus bisnis	Skenario biaya batas bawah	Skenario biaya dasar	Skenario biaya batas atas
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR) Proyek (sebelum pajak) di P50	11,25%	9,25%	5,52%
Rata-rata <i>Debt Service Coverage Ratio</i> (DSCR) di P90	0,90	0,82	0,67
Laba bersih di P50 selama 25 tahun	USD 119.250.000	USD 99.468.000	USD 50.970.000



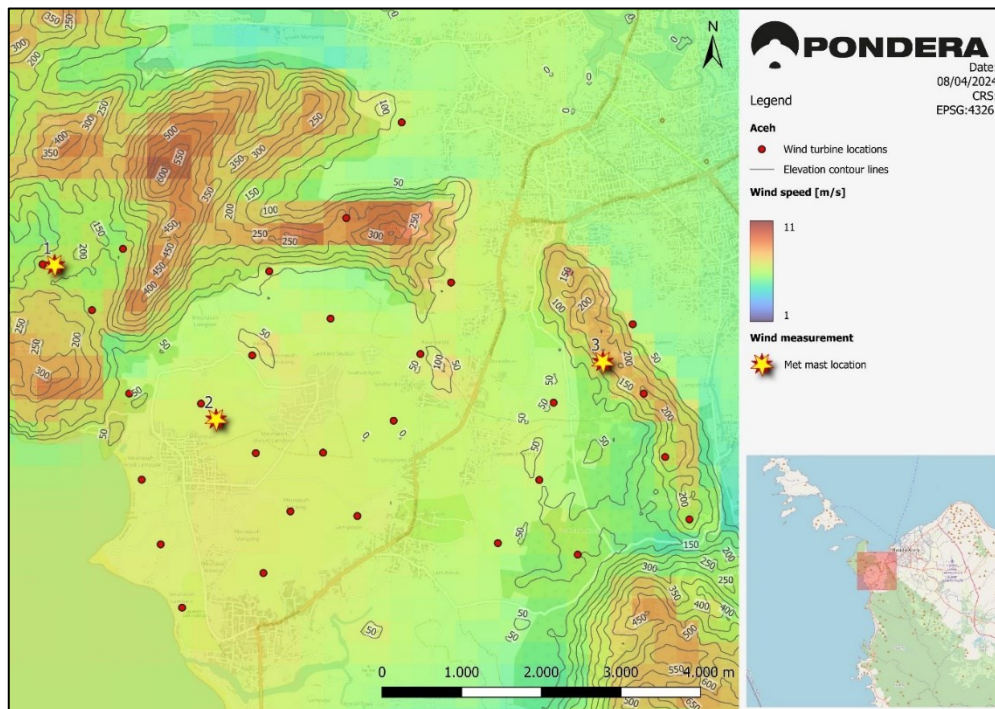
3 Kesimpulan dan Rekomendasi

Berdasarkan analisis yang dilakukan, disimpulkan bahwa kelayakan tekno-ekonomi keseluruhan dari PLTB di wilayah Aceh Besar memerlukan peningkatan. Penyebab utama hal ini adalah kecepatan angin yang lebih rendah dari yang diperkirakan di beberapa lokasi turbin angin tertentu. Meskipun penilaian awal sumber daya angin hanya mencakup daerah dengan kecepatan angin di atas 6 m/s, selama tahap pemodelan angin, kecepatan angin di beberapa lokasi turbin angin ternyata berada di bawah angka ini (lihat Gambar 39). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh efek topografi pada karakteristik angin, yang pada tingkat lebih rendah menonjol ketika membuat peta kecepatan angin berdasarkan *Global Wind Atlas*. Berdasarkan pemodelan angin, tampaknya kecepatan angin yang paling menjanjikan ditemukan di timur laut punggung bukit, dekat pantai, dan di daerah pegunungan di bagian barat laut lokasi (masih harus divalidasi oleh pengukuran angin). Sebaiknya pertimbangan kembali tata letak lokasi selama studi tindak lanjut, di mana fokusnya adalah pada area spesifik ini. Hal ini dapat menghasilkan ukuran PLTB sekitar 50 MW, dengan kemungkinan hasil kasus bisnis yang lebih baik.

Selain kurangnya sumber daya angin di beberapa lokasi turbin angin, PLTB yang dibayangkan memang mengandung risiko lain yang harus diperhitungkan oleh pengembang dan investor. Hal ini dapat diringkas dalam daftar risiko non-limitatif berikut, termasuk rekomendasi tindakan mitigasi masing-masing:

- **Sumber daya angin:** Masih ada ketidakpastian yang signifikan pada sumber daya angin di daerah tersebut sebagaimana ditentukan dalam penelitian ini. Variasi hasil antara model yang berbeda menunjukkan bahwa validasi sumber daya angin di awal proses pengembangan sangat penting. Kami merekomendasikan setidaknya untuk menempatkan tiga tiang pengukuran meteorologis untuk pengumpulan data setidaknya selama satu tahun, lihat Gambar 41. Di latar belakang gambar yang ditunjukkan adalah kecepatan angin dari *Global Wind Atlas* (GWA). Elevasi ditunjukkan dengan garis kontur. Titik berwarna merah menunjukkan lokasi turbin angin. Ikon kuning menunjukkan posisi global lokasi dari tiang pengukuran meteorologis yang direkomendasikan.

Lokasi tiang pengukuran meteorologis digambarkan sebagai berikut: satu di bagian barat laut pegunungan, satu di dataran yang rata, dan satu di timur punggung bukit area WTG. Terutama di punggung bukit, disarankan untuk melakukan pengukuran tambahan dengan anemometer 3D ultrasonik, karena di punggung bukit, kemungkinan besar turbin akan mengalami draf naik dan turun. Menggunakan anemometer 3D ultrasonik, kecepatan horizontal dan kecepatan vertikal akan diukur. Anemometer ultrasonik 3D juga harus dipertimbangkan di daerah barat laut.



Gambar 41. Lokasi tiang pengukuran meteorologis yang direkomendasikan.

- **Penggunaan lahan dan perizinan:** Seperti yang dapat diperoleh dari Gambar 32, PLTB direncanakan terbagi sekitar 70/30 antara area hutan dan area tanaman. Untuk area sebelumnya, pengembang masa depan wajib mendapatkan persetujuan dan izin khusus dari pihak berwenang; sedangkan untuk area yang terakhir, kesepakatan perlu dicapai dengan pemilik lahan untuk memperoleh atau menyewakan lahan. Mempertimbangkan tindakan yang diperlukan ini, penting juga bagi pengembang untuk menilai penggunaan / kepemilikan lahan secara lebih rinci sejak awal dalam proses pengembangan. Pengembang direkomendasikan untuk terlebih dahulu berkonsultasi dengan pihak berwenang tentang kesiapan dan kemungkinan untuk menerbitkan persetujuan dan izin tersebut, dan pendekatan dengan pemilik lahan yang relevan tentang kemungkinan mencapai kesepakatan tentang lahan tersebut.
- **Transportasi:** Analisis aksesibilitas terbatas telah dilakukan untuk prospektus ini, menyimpulkan bahwa Pelabuhan Malahayati adalah titik awal yang paling cocok untuk transportasi darat. Untuk memastikan bahwa pelabuhan di Malahayati cocok untuk pembongkaran dan penyimpanan komponen turbin angin, penilaian yang lebih ekstensif perlu dilakukan di pelabuhan yang dapat memerlukan konsultasi dengan pemilik pelabuhan. Sebagian besar jalan dari pelabuhan ke lokasi dalam kondisi baik. Beberapa tikungan tajam terletak di dalam kota Banda Aceh. Diharapkan bahwa sebagian besar jembatan yang lebih besar tidak perlu diperkuat, karena mereka dibangun setelah tsunami tahun 2004 dan mungkin cukup kuat. Di dalam lokasi PLTB, beberapa jalan yang ada dapat digunakan. Terutama di pegunungan, jalan baru harus dibangun. Survei logistik yang lebih ekstensif direkomendasikan untuk dilakukan sebagai bagian dari studi kelayakan di masa mendatang untuk mendapatkan detail lebih lanjut tentang (penyesuaian) infrastruktur yang diperlukan.



- **Geologi:** Berdasarkan tingkat studi yang dilakukan untuk prospektus ini, masih ada ketidakpastian yang signifikan termasuk dalam desain dan konstruksi fondasi, jalan, dan *hardstand crane*, karena keadaan geologis dan dampak dari keadaan ini. Oleh karena itu, disarankan untuk menyelidiki lebih lanjut stabilitas dan kemampuan tanah untuk menahan beban turbin angin. Hal ini perlu ditentukan melalui penyelidikan geoteknik, yang menentukan beberapa karakteristik tanah (misalnya kuat geser, kepadatan, permeabilitas dll.), dan analisis stabilitas tanah berikut dalam kombinasi dengan studi LiDAR untuk pemetaan topografi yang lebih tepat.
- **Kegempaan:** PLTB yang dibayangkan direncanakan di daerah dengan risiko gempa bumi (mirip dengan banyak lokasi lain di Indonesia). Selama studi kelayakan, percepatan puncak tanah maksimum yang diharapkan harus dihitung untuk penilaian bahaya yang lebih tepat akibat gempa bumi. Studi ini juga harus melihat kemungkinan cara untuk mengurangi risiko gempa yang teridentifikasi. Desain fondasi setidaknya harus memenuhi standar internasional untuk mengurangi risiko gempa.
- **Lingkungan:** Meskipun lokasi PLTB bukan di daerah padat penduduk, akan ada dampak visual pada daerah tersebut karena penggunaan turbin angin dengan ketinggian ujung 200 m. Kehadiran PLTB ini dapat menyebabkan oposisi dari pemangku kepentingan lokal dan kelompok lingkungan terhadap pengembangan PLTB. Oleh karena itu, disarankan untuk melibatkan para pemangku kepentingan ini di awal pengembangan PLTB, untuk mengidentifikasi dan mengurangi keberatan spesifik dari masing-masing pemangku kepentingan.
- **Flora dan fauna:** Pada tahun 2022, survei keanekaragaman hayati dan penelitian sekunder dilakukan di area proyek, menunjukkan potensi beberapa spesies yang menjadi perhatian (termasuk spesies burung pemangsa, bangau, burung walet dan kelelawar). Sementara mamalia ikonik seperti harimau Sumatra, orang utan, dan gajah Sumatra mungkin tidak ada lagi di daerah ini, beberapa mamalia yang terancam punah telah diamati, seperti beruang madu, trenggiling Sunda, kera ekor panjang dan kukang Sumatra. Sangat mungkin bahwa pengembangan PLTB akan berpengaruh pada keanekaragaman hayati. Hal yang juga harus dipertimbangkan adalah pendanaan internasional untuk pembangunan di dalam hutan yang tidak diberikan dengan mudah. Oleh karena itu, disarankan bahwa sebagai bagian dari Analisis Dampak Lingkungan dan Sosial, studi dasar keanekaragaman hayati, dan penilaian risiko dan langkah-langkah mitigasinya dilakukan selama studi kelayakan.
- **Koneksi jaringan dan PJBL:** PLTB terkait dirancang untuk dihubungkan ke jaringan PLN. Hal ini mengasumsikan bahwa jaringan dapat mengintegrasikan 120 MW energi angin (dengan keluaran yang bersifat variabel), dan bahwa gardu induk di Banda Aceh cocok untuk memfasilitasi koneksi jaringan PLTB. Asumsi tersebut harus diverifikasi selama studi kelayakan. Selain itu, hasil asesmen kasus bisnis saat ini didasarkan pada asumsi bahwa PJBL menggunakan tarif batas atas listrik sebagaimana diatur dalam Peraturan Presiden 112/2022, dan bahwa tidak ada Energi Kontrak Tahunan (ACE) yang diterapkan. Kondisi PJBL yang sebenarnya tergantung pada PLN dan bagaimana proses tender diatur. Penyelarasan awal dengan PLN pada kondisi PJBL ini dan pengaturan proses tender direkomendasikan.



Berdasarkan daftar risiko di atas dan langkah-langkah mitigasi yang direkomendasikan, dan sebagai langkah selanjutnya dalam pengembangan PLTB, disarankan untuk memprioritaskan pelaksanaan pengukuran angin di tempat untuk memvalidasi kecepatan angin aktual di daerah tersebut. Sejalan dengan pengukuran, penting untuk mulai terlibat dan menyelaraskan dengan pemangku kepentingan terkait dan otoritas lokal tentang kesediaan mereka untuk berkolaborasi dalam pengembangan energi angin di lokasi ini.



4 Sanggahan

Prospektus PLTB ini telah ditulis dengan hati-hati berdasarkan penilaian yang dilakukan oleh empat pihak berpengalaman di sektor energi angin (Pondera, Witteveen+Bos, Quadran, dan BITA). Namun, selain kunjungan lapangan selama dua hari ke daerah tersebut, penilaian telah dilakukan melalui penelitian sekunder berdasarkan data dan informasi yang tersedia untuk umum. Sifat dan keakuratan data dan informasi yang digunakan untuk laporan sangat menentukan keakuratan dan ketidakpastian rekomendasi dan hasil laporan ini. Selanjutnya, verifikasi dan validasi melalui survei fisik, pengukuran, desain, perhitungan, dan konsultasi pemangku kepentingan diperlukan untuk menentukan kelayakan tekno-ekonomi definitif dari PLTB terkait. Oleh karena itu, tidak ada hak yang dapat diperoleh dari informasi dan hasil yang disajikan. Untuk beberapa situs, para pengembang telah memulai studi tindak lanjut dan oleh karena itu mungkin sampai pada pertimbangan dan kesimpulan yang berbeda berdasarkan data yang mereka dapatkan. Penggunaan prospektus PLTB ini terbatas untuk menginformasikan Pemerintah Indonesia, pengembang, dan investor tentang potensi indikatif dari lokasi yang disajikan untuk pengembangan energi angin. Penulis laporan ini tidak bertanggung jawab atas segala konsekuensi yang mungkin timbul dari penggunaan laporan yang tidak tepat.

Sanggahan

Informasi yang diberikan dalam dokumen ini diberikan "sebagaimana adanya", tanpa jaminan dalam bentuk apa pun, baik tersurat maupun tersirat, termasuk, tanpa batasan, jaminan kelayakan untuk diperdagangkan, kesesuaian untuk tujuan tertentu, dan tidak adanya pelanggaran. UNOPS secara khusus tidak memberikan jaminan atau pernyataan apa pun mengenai keakuratan atau kelengkapan informasi tersebut. Dalam keadaan apa pun, UNOPS tidak akan bertanggung jawab atas segala kerugian, kerusakan, kewajiban, atau biaya yang dikeluarkan atau diderita yang diklaim sebagai akibat dari penggunaan informasi yang terdapat di sini, termasuk, tanpa batasan, segala kesalahan, kekeliruan, kelalaian, gangguan, atau penundaan sehubungan dengan hal tersebut. Dalam keadaan apa pun, termasuk namun tidak terbatas pada kelalaian, UNOPS atau afiliasinya tidak akan bertanggung jawab atas segala kerusakan langsung, tidak langsung, insidental, khusus, atau konsekuensial, meskipun UNOPS telah diberitahu tentang kemungkinan kerusakan tersebut. Dokumen ini juga dapat berisi saran, pendapat, dan pernyataan dari dan dari berbagai penyedia informasi. UNOPS tidak menyatakan atau mendukung keakuratan atau keandalan saran, pendapat, pernyataan, atau informasi lain yang diberikan oleh penyedia informasi mana pun. Ketergantungan pada saran, pendapat, pernyataan, atau informasi lain tersebut juga menjadi risiko pembaca sendiri. Baik UNOPS maupun afiliasinya, maupun agen, karyawan, penyedia informasi, atau penyedia konten masing-masing, tidak bertanggung jawab kepada pembaca atau siapa pun atas ketidakakuratan, kesalahan, kelalaian, gangguan, penghapusan, cacat, perubahan, atau penggunaan konten apa pun di sini, atau atas ketepatan waktu atau kelengkapannya.