



LAPORAN

Pengembangan Energi Angin Proyek 312 MW di Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, Sumatra Utara

2024

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



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
Saemunan-ro, Jongno-gu
Provinsi Seoul
Republik Korea Selatan

Kantor 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

Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan,
Sumatra Utara – 312 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 Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, Sumatra Utara – 312 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	5
2.2	Ketersediaan sumber daya angin dan penggunaan lahan	6
2.2.1	Pendekatan	6
2.2.2	Sumber daya dan karakteristik angin	7
2.2.3	Topografi	10
2.2.4	Penggunaan lahan	11
2.2.5	Persyaratan perizinan khusus	12
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	19
2.4.3	Transportasi di dalam lokasi	25
2.5	Kondisi geologi dan kegempaan	28
2.5.1	Geologi	28
2.5.2	Kegempaan	30
2.6	Keanekaragaman hayati, kondisi sosio-ekonomi dan lingkungan	32
2.6.1	Kesan umum	32
2.6.2	Keanekaragaman hayati dan dampak lingkungan	35
2.6.3	Dampak sosial	37
2.7	Desain jaringan transmisi	44
2.7.1	Titik koneksi	44
2.7.2	Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi	45
2.8	Asesmen keluaran energi	46
2.8.1	Rugi-rugi energi	47
2.8.2	Keluaran energi termasuk ketidakpastian	50
2.8.3	Variasi keluaran daya	51
2.9	Asesmen kasus bisnis	51
2.9.1	Asumsi komponen	51
2.9.2	Asumsi biaya	55
2.9.3	Parameter keuangan	56
2.9.4	Hasil asesmen kasus bisnis	57
3	Kesimpulan dan Rekomendasi	58
4	Sanggahan	62



Daftar Gambar

Gambar 1. Peta Provinsi Sumatra Utara di mana wilayah dari PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan yang dibayangkan berada. _____	2
Gambar 2. Peta sistem kelistrikan Sumatra Utara di RUPTL (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). _____	4
Gambar 3. Proyeksi produksi listrik dan beban puncak di Sumatra Utara (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). _____	4
Gambar 4. Kapasitas pembangkit tambahan yang direncanakan untuk Sumatra Utara (IPP: <i>Independent Power Producer</i> ; Sumber: RUPTL PLN 2021-2030). _____	5
Gambar 5. Area pencarian Padang Lawas Utara Tapanuli Selatan 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). _____	7
Gambar 6. Tampilan yang diperbesar pada area pencarian di Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan beserta dengan sebaran kecepatan angin. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG akhir yang memenuhi semua kriteria. Kecepatan angin rata-rata di atas ambang batas 6 m/s pada ketinggian 100 m ditampilkan berdasarkan GWA. _____	8
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. _____	9
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. _____	9
Gambar 9. Topografi area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut. _____	10
Gambar 10. Zona pengecualian di wilayah Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan berdasarkan penggunaan lahan, topografi, dan kawasan pemukiman. Sumber: perhitungan berdasarkan elevasi FABDEM, ESRI, dan OSM. _____	11
Gambar 11. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Padang Lawas Utara (RTRW 2015-2035) ditumpuk dengan area WTG final di kabupaten tersebut. Karena kualitas gambar RTRW yang buruk, analisis telah diperiksa kembali menggunakan RTRW tingkat kabupaten dan tingkat provinsi dari portal GISTARU KLHK. _____	12
Gambar 12. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Tapanuli Selatan (RTRW tahun 2017-2037) dilapisi dengan area WTG akhir di kabupaten tersebut. _____	14
Gambar 13. Area WTG final berdasarkan kriteria pembatasan. Sumber: Google Satellite Images. _____	15
Gambar 14. Tata letak awal PLTB di area WTG final. _____	17
Gambar 15. 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 16. Lokasi dan akses dari Pelabuhan Sibolga (barat laut area WTG/turbin) dan Pelabuhan Dumai (timur laut area WTG/turbin) ke area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. _____	19
Gambar 17. Citra satelit Pelabuhan Sibolga menunjukkan pelabuhan dikelilingi oleh area pemukiman, dan dua belokan 90 derajat harus dilakukan untuk memasuki jalan utama ke arah tenggara. _____	20
Gambar 18. Jalan perumahan tepat di luar Pelabuhan Sibolga. _____	20



Gambar 19. Persimpangan tepat setelah Jembatan Batangoru perlu didesain ulang karena turbin angin harus melewati jembatan sebelum mereka dapat berbelok. _____	21
Gambar 20. Tikungan tajam di jalan di Sialogo, Tapanuli Selatan karena turunan jalan di ketinggian yang curam _____	21
Gambar 21. Garis hitam merepresentasikan pengalihan dari jalan utama; Hal ini terutama menggunakan jalan yang sudah ada (~350 m), dan 200 m jalan sementara baru di atas lapangan/tempat parkir. _____	22
Gambar 22. Contoh jembatan beton (kiri) dan jembatan baja (kanan). _____	23
Gambar 23. Tanjakan dari barat Sipoepees ke titik akses timur dari area WTG yang dibayangkan _____	23
Gambar 24. Bagian dari tikungan tajam di utara menampilkan dinding batu di kedua sisi; singkapan batu yang lebih kecil diperkirakan tingginya sekitar 8 m. _____	24
Gambar 25. Status pembangunan jalan raya di Sumatra. Garis putus-putus menunjukkan jalan raya yang direncanakan, dengan konstruksi yang belum dimulai. Ruas 8 dapat digunakan jika sudah selesai sebelum pembangunan PLTB yang dibayangkan dimulai di area WTG (lingkaran merah). Sumber: Kompas.com, dipublikasikan 5 April 2023. _____	24
Gambar 26. Sebuah perlintasan di dekat Bandara Aek Godang memiliki jembatan beton tua dan jembatan baja baru. _____	25
Gambar 27. Belokan tajam di kedua sisi sungai (foto diambil dengan lensa sudut lebar, yang membuat situasinya lebih luas daripada aslinya). _____	26
Gambar 28. Jembatan beton dan baja di atas sungai Aek Sihapas, dengan tikungan tajam di kedua sisi. _____	26
Gambar 29. Tata letak jalan internal untuk area WTG. _____	27
Gambar 30. Bagian dari jalan internal yang dapat ditingkatkan di daerah perbukitan (kiri); beberapa bagian sudah diaspal dan sebagian besar lebarnya ~4 m (kanan). Jalan harus diperlebar, terutama di bagian yang berkelok-kelok. _____	27
Gambar 31. Peta geologi wilayah, situs berwarna merah (Barber, 2005). _____	28
Gambar 32. Indeks kerentanan gerakan tanah area WTG Padang Lawas Utara –Tapanuli Selatan (Sumber: Portal Mitigasi Bencana Geologi Kementerian ESDM). _____	29
Gambar 33. Lokasi umum sistem Sesar Sumatra Besar yang membentang di sepanjang pulau. _____	30
Gambar 34. Tingkat bahaya dan risiko gempa bumi di area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. _____	31
Gambar 35. Lokasi dibagi menjadi tiga bagian dengan topografi dan penggunaan lahan yang serupa. _____	32
Gambar 36. Gambaran pegunungan di sebelah barat. _____	33
Gambar 37. Gambaran di daerah perbukitan tengah. _____	33
Gambar 38. Gambaran lembah di daerah perbukitan tengah. _____	34
Gambar 39. Gambaran pegunungan di sebelah timur. _____	34
Gambar 40. Area di mana flora dan fauna yang disebutkan di atas telah diamati (meliputi lokasi PLTB yang dibayangkan). Seluruh pengamatan ini dikategorikan sebagai 'risiko rendah' atau 'tidak dievaluasi'. _____	36
Gambar 41. Peta penggunaan lahan berdasarkan citra satelit (ESRI/Sentinel 2, 2022). Area di sekitar PLTB sebagian besar ditutupi oleh hutan (perkebunan, wanatani), tanaman dan semak belukar. _____	37
Gambar 42. Laju pertumbuhan penduduk dan penduduk tahunan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara (bps.go.id)). _____	38
Gambar 43. Piramida kependudukan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2023 (Sumber: Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara (bps.go.id)). _____	38



Gambar 44. Laki pertumbuhan penduduk dan tahunan penduduk di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan (bps.go.id)).	39
Gambar 45. Piramida kependudukan di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2022 (Sumber: Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan (bps.go.id)).	39
Gambar 46. Lokasi gardu induk PLN 150 kV (ULTG) Padang Sidempuan. Sumber: Google Maps.	44
Gambar 47. Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi di PLTB yang dibayangkan.	45
Gambar 48. Representasi skematis dari posisi saluran transmisi udara antara pembangkit listrik dan gardu induk Padang Sidempuan.	45
Gambar 49. Hasil kecepatan angin rata-rata jangka panjang dengan model ASPIRE pada ketinggian 140 m di lokasi turbin. Lingkaran berbatas hitam mewakili turbin angin, sedangkan warna di dalam lingkaran menunjukkan kecepatan angin rata-rata jangka panjang masing-masing.	46
Gambar 50. 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).	51
Gambar 51. Lokasi tiang pengukuran meteorologis yang direkomendasikan.	59



Daftar Tabel

Tabel 1. Daftar flora yang diamati (sumber: GBIF) yang setidaknya mendekati terancam menurut kategori daftar merah global IUCN	36
Tabel 2. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran di Kabupaten Padang Lawas Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Kota Medan).	40
Tabel 3. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2023 (Sumber: BPS Kabupaten Padang Lawas Utara).	40
Tabel 4. Angka partisipasi murni di Kabupaten Padang Lawas Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Sumatra Utara).	41
Tabel 5. Fasilitas pendidikan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021 (Sumber: Badan Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara (bps.go.id)).	41
Tabel 6. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: Badan Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara (bps.go.id)).	41
Tabel 7. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Kota Medan).	42
Tabel 8. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2023 (Sumber: BPS Kabupaten Tapanuli Selatan).	42
Tabel 9. Angka partisipasi murni di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: BPS Sumatra Utara).	43
Tabel 10. Fasilitas pendidikan di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2023 (Sumber: Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan (bps.go.id)).	43
Tabel 11. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Tapanuli Selatan Tahun 2021-2023 (Sumber: Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan (bps.go.id)).	44
Tabel 12. Rugi-rugi yang diperkirakan di tingkat PLTB	47
Tabel 13. Keluaran energi untuk semua 78 WTG di PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan.	50
Tabel 14. Jumlah turbin angin relevan untuk PLTB yang dibayangkan.	52
Tabel 15. Daftar asumsi tentang komponen pekerjaan sipil.	53
Tabel 16. Daftar asumsi komponen pekerjaan kelistrikan.	54
Tabel 17. Asumsi biaya per komponen biaya	55
Tabel 18. Hasil asesmen kasus bisnis.	57



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 Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. 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

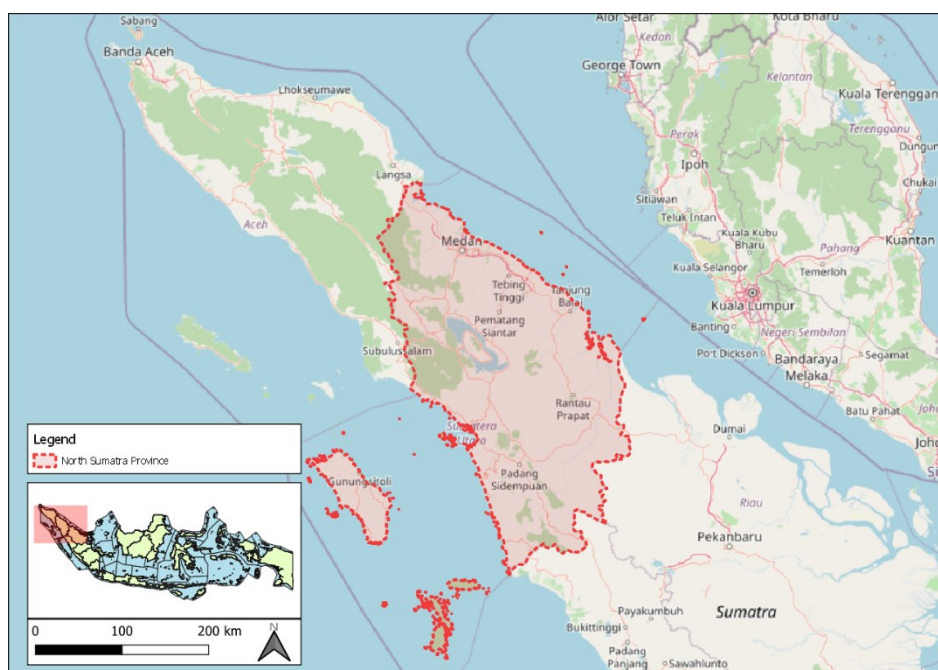


2 Analisis PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, Sumatra Utara – 312 MW

2.1 Pengenalan lokasi PLTB

Bagian ini memperkenalkan lokasi PLTB, yaitu Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, Sumatra Utara dalam tiga bagian: (1) lokasi geografis, (2) status dalam RUPTL, dan (3) status pengembangan.

2.1.1 Lokasi geografis



Gambar 1. Peta Provinsi Sumatra Utara di mana wilayah dari PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan yang dibayangkan berada.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, Sumatra Utara adalah provinsi yang terletak dekat dengan ujung barat laut Pulau Sumatra, yang berada di Indonesia bagian barat. Ada tiga provinsi yang bersebelahan dengan Sumatra Utara, yaitu, DI Aceh, Riau, dan Sumatra Barat. Provinsi Sumatra Utara memiliki luas wilayah 72.981 km² yang dihuni oleh sekitar 15,1 juta orang pada tahun 2022¹, menjadikannya provinsi terpadat keempat di Indonesia. Provinsi ini berada di peringkat ke-14 berdasarkan PDB (Produk Domestik Bruto/GDP) per kapita provinsi yang jumlahnya Rp 63,19 juta². Selain itu, pertumbuhan ekonomi provinsi ini adalah 5,01% pada tahun 2023 (c-to-c).³ Untuk memberikan konteks, pertumbuhan ekonomi Indonesia pada tahun tersebut adalah 5,05% (c-to-c).⁴

¹ <https://sumut.bps.go.id/statictable/2023/03/10/2929/jumlah-penduduk-menurut-jenis-kelamin-rasio-jenis-kelamin-dan-kabupaten-kota-jiwa-2022.html>

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

³ <https://sumut.bps.go.id/pressrelease/2024/02/05/1212/ekonomi-sumatera-utara-tahun-2023-tumbuh-sebesar-5-01-persen--c-to-c-.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>



Sumatra Utara dikenal antara lain dengan ekowisata, pertanian, dan industrinya. Salah satu tujuan wisata yang terkenal adalah Danau Toba, sebuah danau kawah alam yang sangat besar dengan sebuah pulau besar (yaitu Pulau Samosir) di tengahnya. Sementara itu, produk pertanian utama dari Sumatra Utara meliputi kopi, karet, dan kelapa sawit.

Ada dua kawasan industri di Sumatra Utara⁵, yaitu, Kawasan Industri Medan (1.000 ha) dan Kawasan Industri Medan Star (103 ha). Kawasan industri lainnya adalah Kuala Tanjung Industrial Estate (3.400 ha) yang masih dalam pembangunan. Lokasinya yang strategis di Selat Malaka, kawasan tersebut akan berada di sekitar Pelabuhan Kuala Tanjung, yang diharapkan menjadi pusat internasional untuk wilayah Indonesia bagian barat⁶. Barang-barang yang akan diproduksi di Kawasan ini antara lain adalah minyak kelapa sawit, baja, aluminium, semen, makanan, dan produk karet.

Sementara itu, ada satu kawasan ekonomi khusus (KEK) di provinsi ini yaitu KEK Sei Mangkei (2.002 ha)⁵. KEK tersebut berada di tenggara Medan dan diresmikan pada tahun 2015 untuk memfasilitasi kegiatan industri memproduksi minyak sawit dan karet yang berkualitas internasional⁷.

Dalam Lampiran E RUPTL PLN 2021-2030, PLN mencantumkan strategi untuk memenuhi kebutuhan listrik baru/tambahan dari empat konsumen listrik 'besar' di Sumatra Utara, yaitu:

- KEK Sei Mangkei (23,28 MW pada tahun 2025⁸)
- Kawasan Industri Kuala Tanjung (18 MVA pada tahun 2022)
- Destinasi Wisata Super Prioritas Danau Toba (25,87 MW)⁹

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

Lokasi PLTB yang dibayangkan tersebar di dua kabupaten yang bersebelahan: Kabupaten Padang Lawas Utara dan Kabupaten Tapanuli Selatan. Dengan demikian, nama "PTLB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan" digunakan dalam laporan ini.

2.1.2 Status dalam RUPTL PLN 2021-2030

Gambar 2 menggambarkan sistem kelistrikan Sumatra Utara. Sistem ini terdiri dari pulau utama (jalur transmisi 150 kV dan 275 kV) dan Pulau Nias (jalur transmisi 70 kV). Menurut RUPTL PLN 2021-2030, beban puncak provinsi ini pada tahun 2020 sebesar 1.883 MW pada tahun 2021-2030. Tingkat produksi energi dan beban puncak di provinsi tersebut diproyeksikan akan terus meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Proyeksi ini didasarkan pada asumsi bahwa tingkat pertumbuhan permintaan rata-rata akan menjadi 5,5% per tahun.

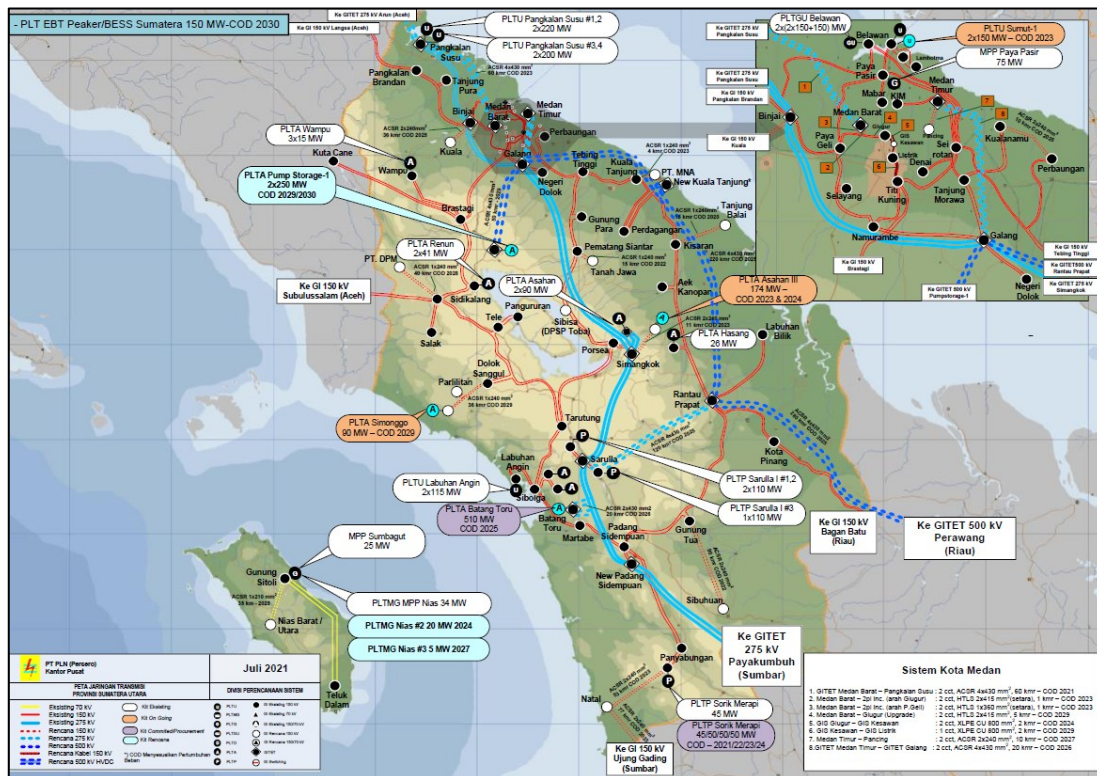
⁵ <https://regionalinvestment.bkpm.go.id/pir/kawasan-industri-kek/>

⁶ <https://northsumatrainvest.id/en/investment-project/kuala-tanjung-industrial-estate>

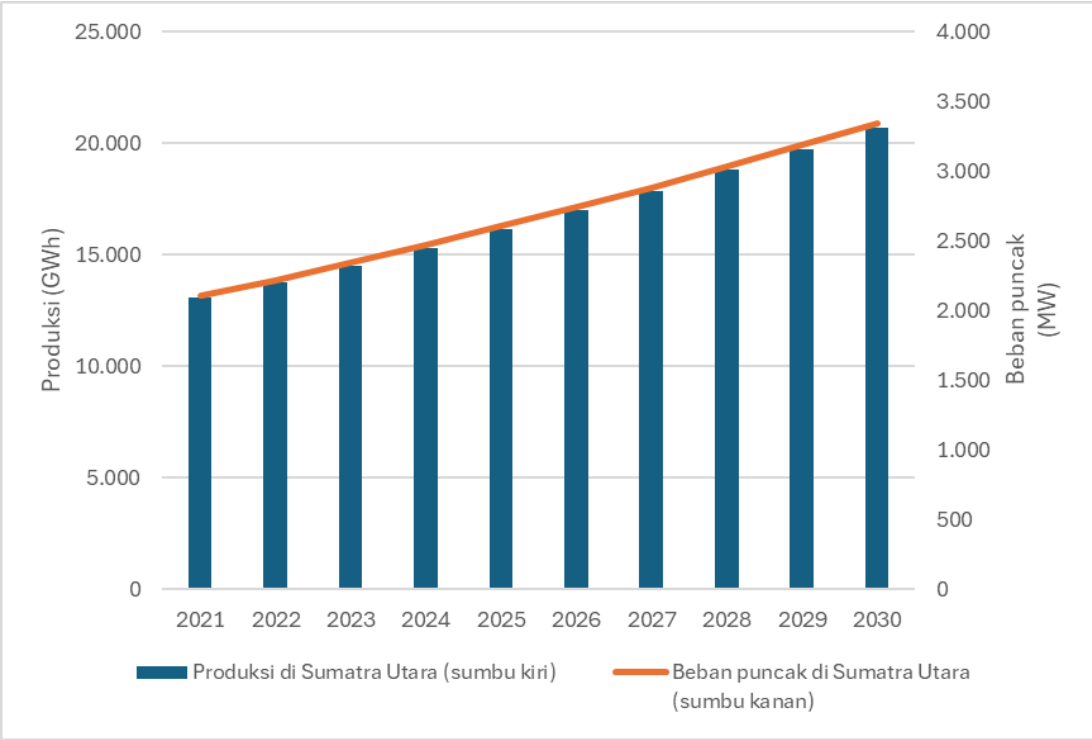
⁷ <https://www.seimangkeisez.com/en/>

⁸ <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2022/05/siap-sambut-investor-pln-perkuat-keandalan-kelistrikan-di-kek-sei-mangkei/>

⁹ <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2022/12/pakai-rec-pln-danau-toba-jadi-destinasi-pariwisata-berbasis-energi-hijau-pertama-di-indonesia/>



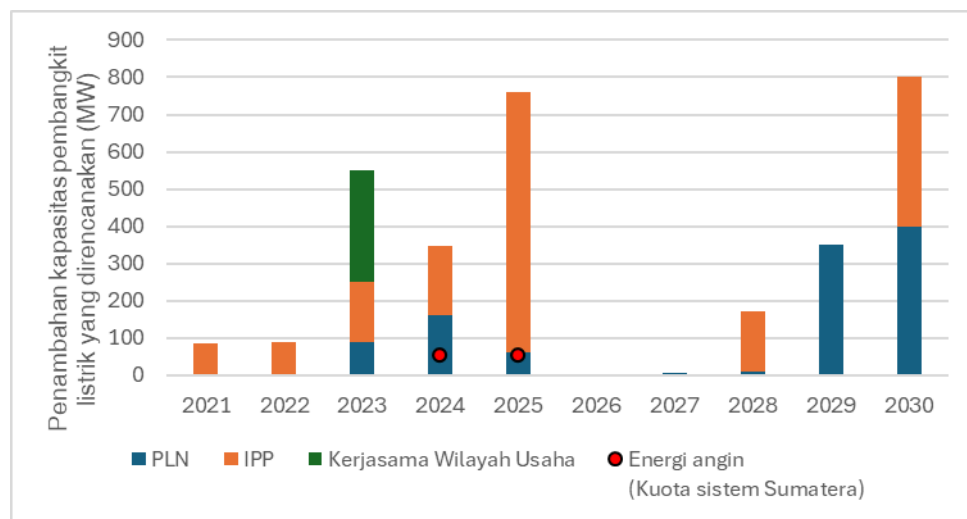
Gambar 2. Peta sistem kelistrikan Sumatra Utara di RUPTL (Sumber: RUPTL PLN 2021-2030).



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



Ringkasan perencanaan pengembangan pembangkit listrik dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar ini mencakup pembangkit listrik energi konvensional dan terbarukan. Pembangkit listrik tambahan dikategorikan menjadi tiga sumber, yaitu, PLN, *Independent Power Producer* (IPP), dan kerja sama Wilayah Usaha. Selain itu, 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 88 MW potensi tenaga angin di Sumatra Utara.



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

2.1.3 Status pengembangan

Sepengetahuan kami, tidak ada pengembangan yang sedang berlangsung untuk energi angin di Sumatra Utara. Selama misi dagang Kerajaan Belanda ke Sumatra Utara pada awal 2022, seorang perwakilan dari Badan Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi menyebutkan bahwa angin di provinsi tersebut memiliki kecepatan yang relatif tidak stabil dengan arah yang tidak konsisten sesuai data yang ada. Oleh karena itu, studi kelayakan diperlukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang karakteristik angin dan potensinya.



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 **Error! Reference source not found..** 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.

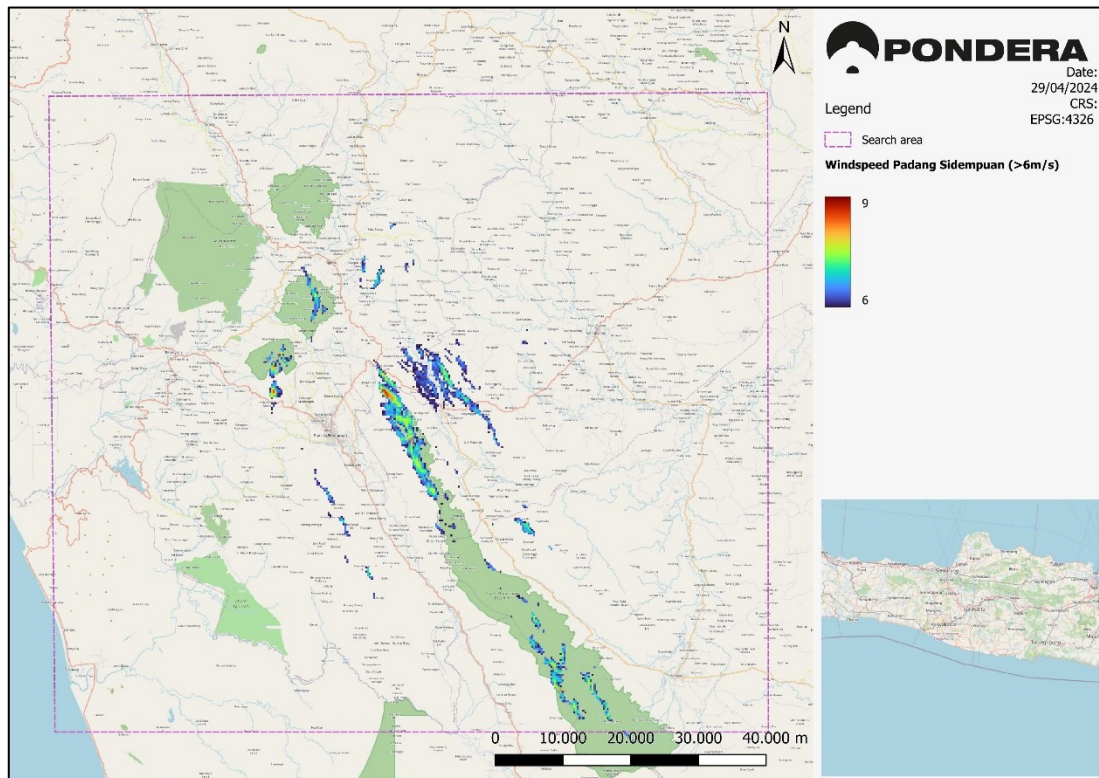
Jarak penyangga tertentu diterapkan pada setiap kasus untuk meminimalkan risiko yang memungkinkan gangguan, masalah keselamatan, dan konflik penggunaan lahan. Langkah ini menghasilkan area WTG final. Kriteria pembatasan kedua yang diperiksa meliputi:

- 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 menunjukkan area pencarian awal (dibatasi oleh kotak putus-putus berwarna ungu), di dekat dan di dalam Padang Lawas Utara dan Tapanuli Selatan. 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 sepanjang area "berbentuk strip".

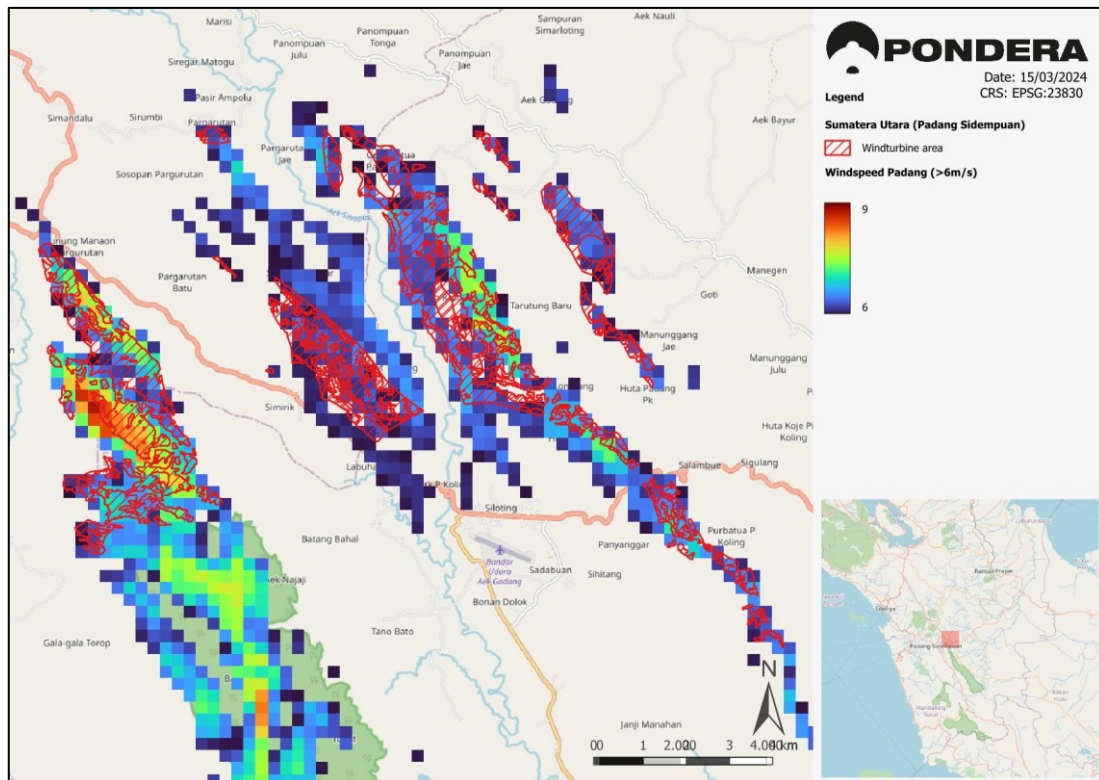


Gambar 5. Area pencarian Padang Lawas Utara Tapanuli Selatan dengan sebaran kecepatan angin. Kotak pembatas putus-putus berwarna ungu menunjukkan seluruh area pencarian. Bilah warna menunjukkan kecepatan angin rata-rata di atas 6 m/s pada ketinggian 100 m menurut klimatologi *Global Wind Atlas* (GWA).

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.



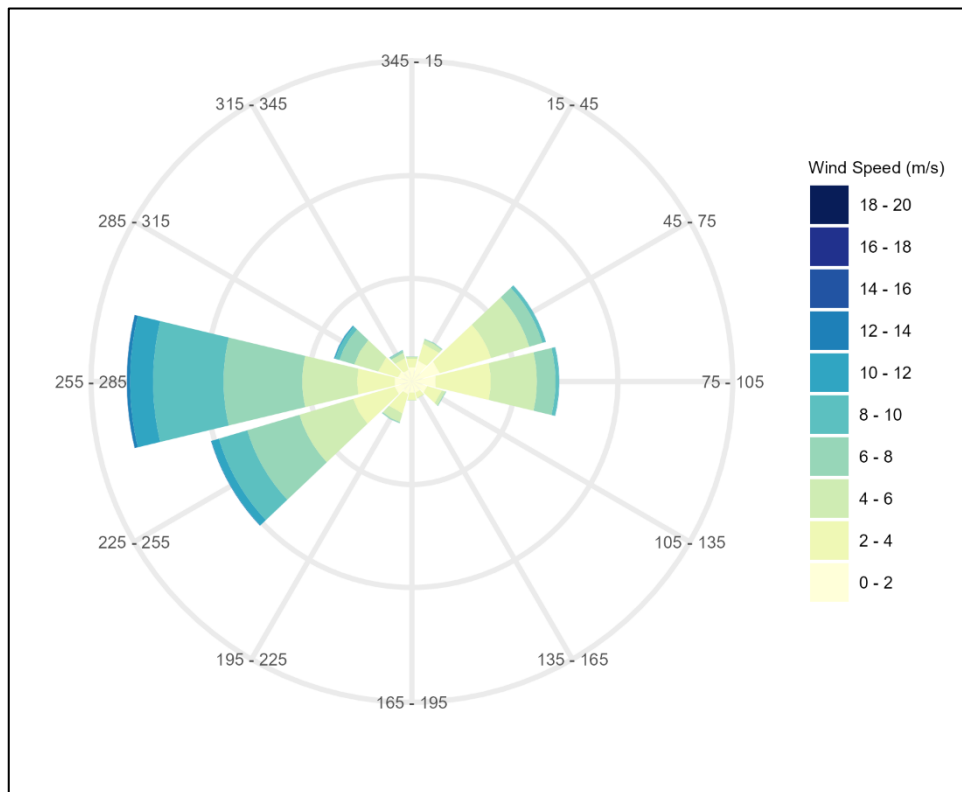
Gambar 6 menunjukkan peta yang diperbesar dari area kontinu ini yang telah dipelajari lebih lanjut pada langkah-langkah selanjutnya. Gambar tersebut juga dilengkapi dengan area WTG final untuk memberikan gambaran tingkat kecepatan angin di lokasi tersebut.



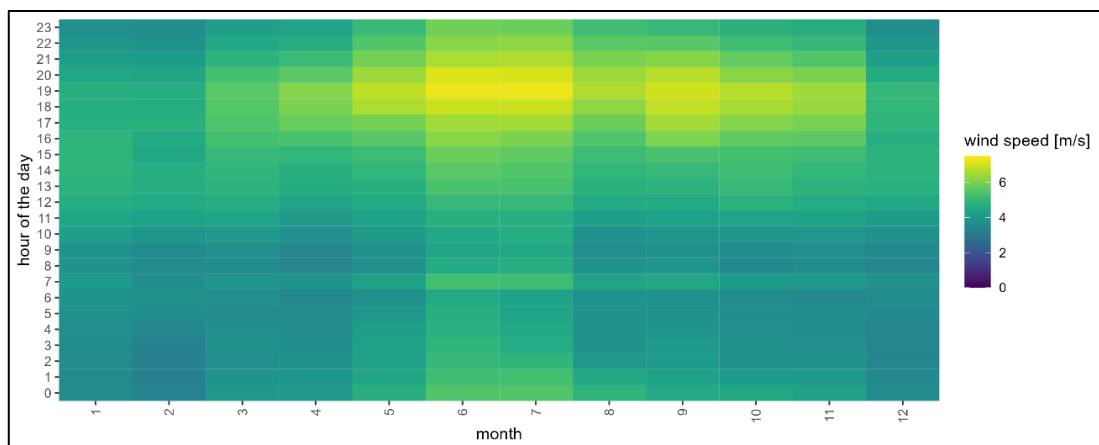
Gambar 6. Tampilan yang diperbesar pada area pencarian di Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan beserta dengan sebaran kecepatan angin. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG akhir yang memenuhi semua kriteria. Kecepatan angin rata-rata di atas ambang batas 6 m/s pada ketinggian 100 m ditampilkan berdasarkan GWA.

Selain itu, Gambar 7 memvisualisasikan distribusi arah angin rata-rata jangka panjang untuk wilayah Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. Seperti dapat diinterpretasikan dari gambar ini, iklim angin di daerah tersebut terutama terdiri dari angin dari arah barat.

Pada 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), diposisikan di utara lokasi. Oleh karena itu, periode ini juga dapat dibedakan dari bulan-bulan lainnya berdasarkan arah angin barat yang berlaku. Kira-kira dari bulan November hingga 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 dan timur laut 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.



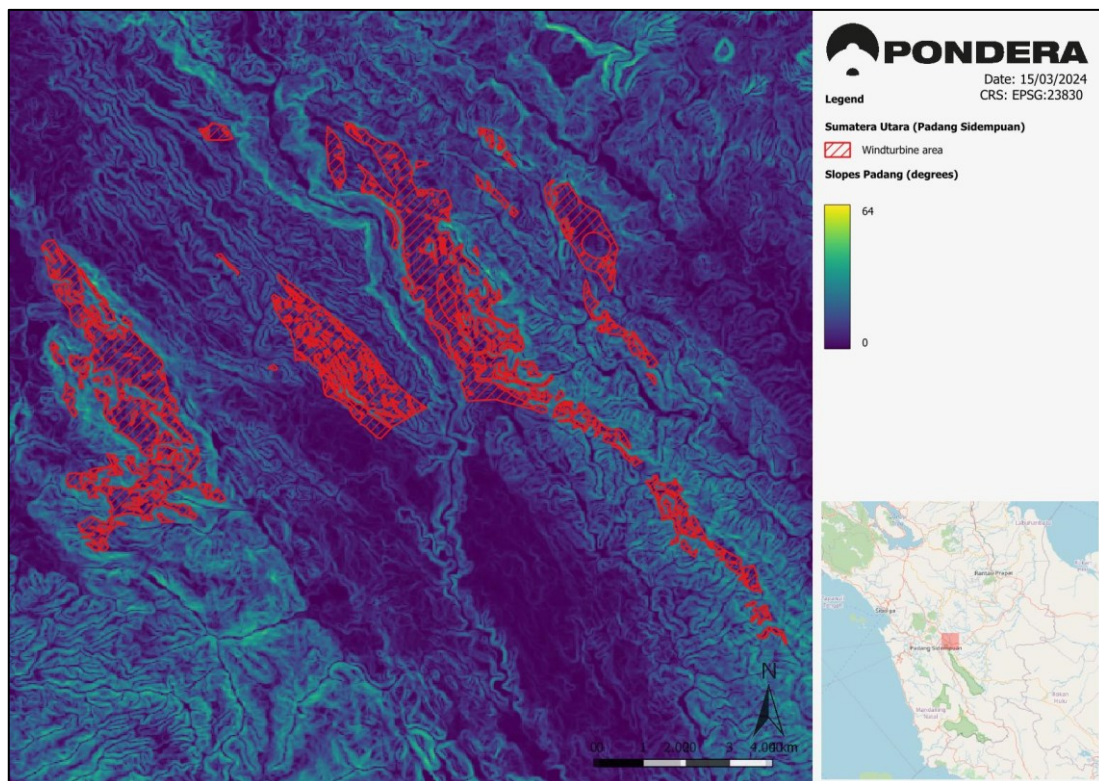
Gambar 8. Sebaran kecepatan angin sepanjang hari, divisualisasikan per bulan dalam setahun. Berdasarkan klimatologi 10 tahun, termasuk seri waktu data per jam tahun 2004-2015. Sumber: EMD-WRF.



2.2.3 Topografi

Area WTG terletak di 40 hingga 70 km dari pesisir barat daya Pulau Sumatra. Wilayah ini bercirikan dengan daerah perbukitan (400-800 m di atas permukaan laut), dan perbukitannya berorientasi barat laut hingga tenggara. Topografi wilayah ini sangat dipengaruhi oleh keberadaan sistem patahan geologi (lihat Bagian 2.5) yang membelah seluruh pulau (arah barat laut ke tenggara). Terdapat beberapa patahan individu dari sistem ini di dalam area tersebut. Beberapa di antaranya dapat dikenali dari lembah yang dalam sebagai titik lemah di tanah yang memungkinkan sungai mudah terkikis ke dalam dataran. Sesar/Patahan geologi di daerah tersebut juga menjadi alasan mengapa terdapat banyak jenis batuan yang berbeda di permukaan. Hal ini menyebabkan adanya variasi topografi, lanskap, dan penggunaan lahan di dalam lokasi tersebut.

Gambar 9. Topografi area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut. Gambar 9 menunjukkan topografi area pencarian di wilayah Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. Poligon dengan arsir berwarna merah mewakili area WTG akhir 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).

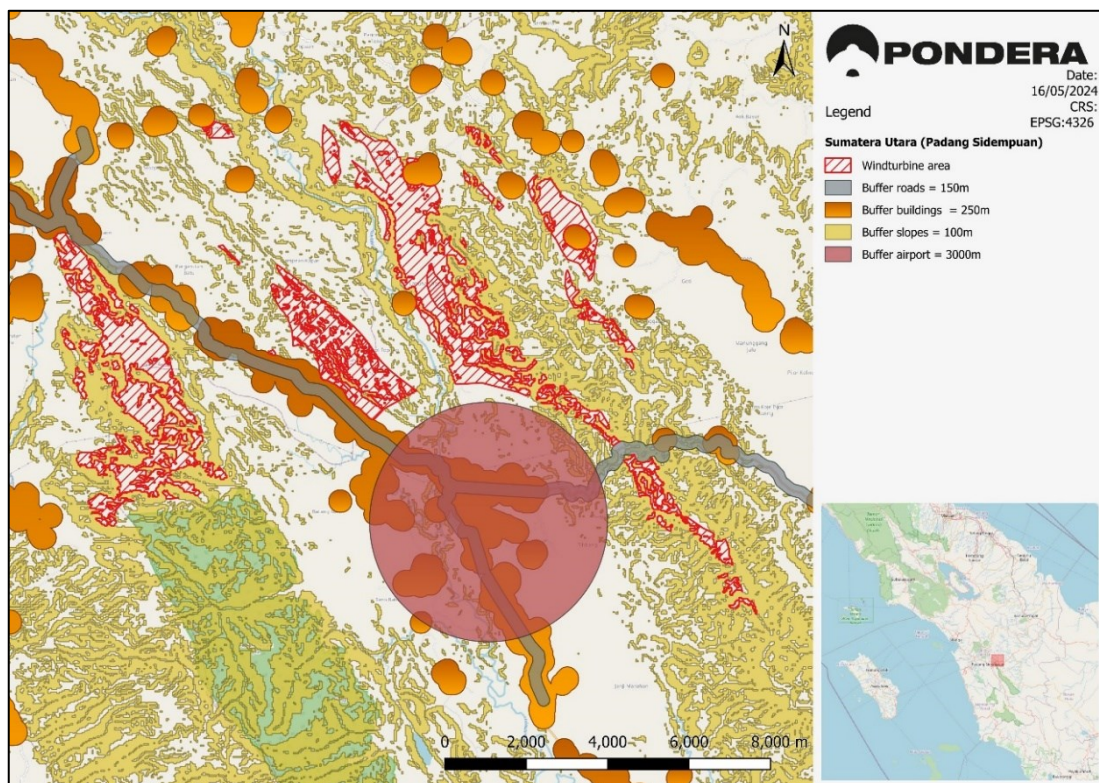


Gambar 9. Topografi area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, menunjukkan kemiringan (dalam derajat; menurut perhitungan berdasarkan data FABDEM) di wilayah tersebut.



2.2.4 Penggunaan lahan

Seperti yang 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 dari 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 Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan berdasarkan penggunaan lahan, topografi, dan kawasan pemukiman. Sumber: perhitungan berdasarkan elevasi FABDEM, ESRI, dan OSM.



2.2.5 Persyaratan perizinan khusus

Seperti yang disebutkan sebelumnya, area WTG berada di dekat perbatasan dua kabupaten, yaitu Kabupaten Padang Lawas Utara dan Kabupaten Tapanuli Selatan. Oleh karena itu, persyaratan perizinan di kedua lokasi ini diteliti dalam subbagian ini.

Kabupaten Padang Lawas Utara

Lapisan antara Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) 2015-2035 dan area WTG di kabupaten ini ditunjukkan pada Gambar 11. Seperti yang disimpulkan dari gambar tersebut, area WTG bersinggungan dengan empat jenis tata guna lahan, yaitu:

1. Kawasan Hutan Produksi Tetap/HTP
2. Area Penggunaan Lain/APL
3. Kawasan Hutan Produksi Terbatas/HPT
4. Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering



Gambar 11. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Padang Lawas Utara (RTRW 2015-2035) ditumpuk dengan area WTG final di kabupaten tersebut. Karena kualitas gambar RTRW yang buruk, analisis telah diperiksa kembali menggunakan RTRW tingkat kabupaten dan tingkat provinsi dari portal GISTARU KLHK.

Analisis rencana tata ruang juga dilakukan dengan menggunakan Rencana Tata Ruang Sumatra Utara (RTRW) 2017-2037 yang lebih baru. Sesuai dengan peraturan, RTRW tingkat kabupaten harus (pada akhirnya) disesuaikan untuk memastikan keselarasan dengan RTRW tingkat provinsi. Oleh karena itu, RTRW tingkat provinsi dapat dijadikan sebagai acuan tambahan. Dengan menumpangkan area WTG final dengan RTRW tingkat provinsi terlihat bahwa sebagian besar area WTG terletak di Kawasan Hutan Produksi, sedangkan sebagian kecil area tersebut berada di Kawasan Hutan Produksi Terbatas.



Area di dalam Kawasan Hutan Produksi, Kawasan Hutan Produksi Tetap, dan Kawasan Hutan Produksi Terbatas dapat digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin sesuai Peraturan Pemerintah 23/2021, dengan ketentuan bahwa pengguna memperoleh Izin Penggunaan Kawasan Hutan (IPPKH), atau yang sekarang dikenal sebagai Persetujuan Penggunaan Kawasan Hutan (PPKH). Izin ini dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), sehingga pengembang PLTB harus mengajukan izin ini ke depannya. Selanjutnya, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan 7/2021 mengatur syarat untuk mendapatkan izin kegiatan di bidang ketenagalistrikan. Tergantung pada jumlah kawasan hutan di provinsi, pemilik izin pada akhirnya mungkin berkewajiban untuk antara lain membayar ganti rugi Penghasilan Negara Bukan Pajak (PNBP), membayar PNBP untuk pemanfaatan kawasan hutan, dan penanaman rehabilitasi pada wilayah aliran sungai dengan perbandingan minimal 1:1. Biaya-biaya tersebut telah diperhitungkan dalam kalkulasi bisnis yang dibuat di Bagian 2.9.

Di sisi lain, area di dalam Kawasan Non-Kehutanan dan Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering¹⁰ dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga angin (dan jenis kegiatan pembangkit listrik dan transmisi lainnya untuk kepentingan umum) jika diperoleh perjanjian pembelian atau sewa. Dalam studi ini, tidak dapat ditentukan pemilik area WTG dalam kedua kategori tersebut. Kemungkinan Kawasan Non-Kehutanan dimiliki oleh masyarakat jika komoditas tersebut terdiri dari beberapa jenis tanaman. Sebaliknya, kawasan tersebut dapat dimiliki oleh perusahaan swasta atau BUMN jika hanya ada satu jenis tanaman yang dibudidayakan di daerah tersebut. Sementara itu, Kawasan Pertanian Lahan Kering biasanya dimiliki oleh masyarakat.

Seperti yang akan ditunjukkan nanti di Bagian 2.3 (tata letak PLTB), lokasi turbin angin yang dibayangkan dalam area WTG final sebagian besar terletak di Kawasan Hutan Produksi dan Kawasan Hutan Produksi Terbatas. Oleh karena itu, kedua kategori penggunaan lahan ini akan dipertimbangkan dalam kalkulasi kasus bisnis (lihat Bagian 2.9).

Penting diketahui bahwa RTRW Kabupaten Padang Lawas Utara yang diperoleh adalah untuk tahun 2015-2035 dan bersumber dari situs web GISTARU. Belum diketahui apakah Peraturan Daerah mengenai RTRW baru sudah diterbitkan, atau apakah RTRW baru masih direvisi/disiapkan. Oleh karena itu, diperlukan konfirmasi dari instansi yang berwenang di Kabupaten Padang Lawas Utara. Jika sudah ada Peraturan Daerah RTRW yang baru, maka RTRW yang digunakan dalam laporan ini tidak berlaku lagi. Namun, jika RTRW belum direvisi atau masih direvisi, maka RTRW dalam laporan ini masih berlaku.

Kabupaten Padang Lawas Utara juga memiliki Bandara Aek Godang, yang dikategorikan sebagai Bandara Kelas III. Menurut otoritas transportasi udara, bandara ini melayani satu penerbangan domestik per hari (menggunakan pesawat regional jarak pendek) dari Bandara Kualanamu¹¹. Lokasi bandara berjarak sekitar 3-5 km dari area WTG. Mengingat kedekatan ini, pemeriksaan menyeluruh

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

¹¹

<https://lpse.dephub.go.id/eproc4/dl/bbd4a96037a2f85a77ca213a282fb7bcf8ac78cb378a682d0fda0512c2037ccc4ad9b1601c84a24bb9d252c6c27d23d6d33fbc9bd4d3f4466185e5897ec71def81ccaa421a6f971b3e55950463395cd249d7042d8d05d30aed0f26b8777f887e#:~:text=Kantor%20Unit%20Penyelenggara%20Bandar%20Udara,Sumber%20Daya%20Manusia%20Kantor%20Unit>

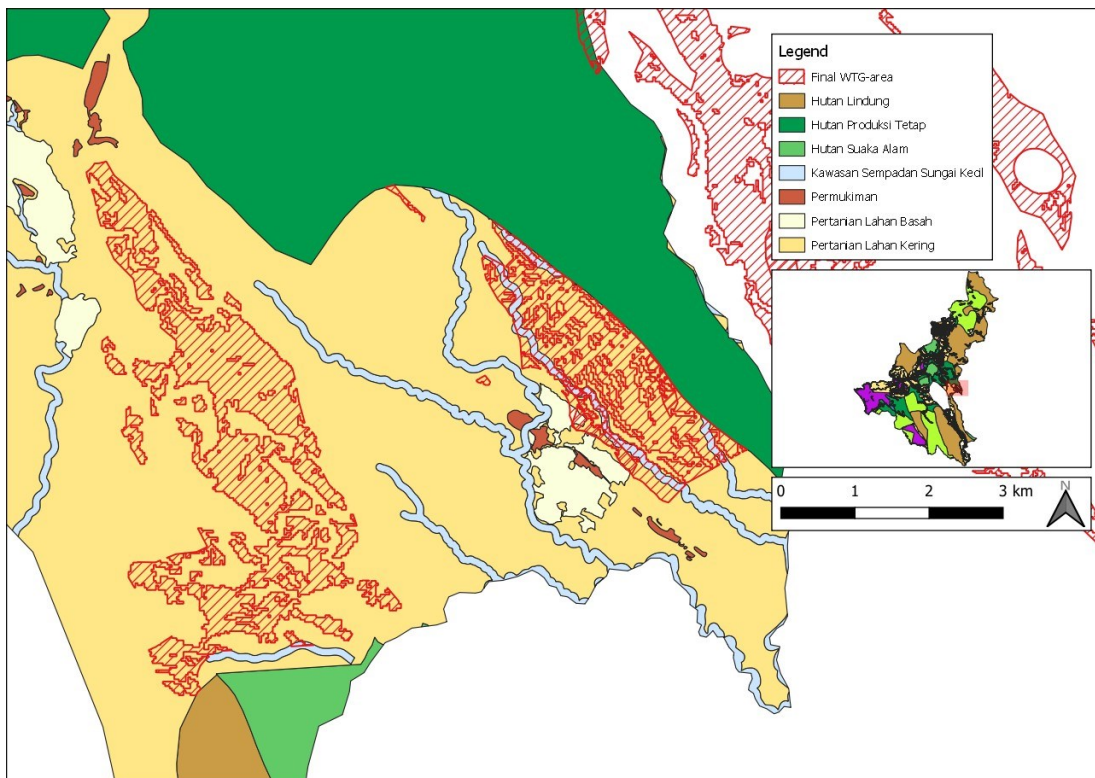


dengan otoritas bandara akan diperlukan untuk mengetahui apakah navigasi penerbangan di bandara dapat terganggu oleh keberadaan PLTB yang dibayangkan.

Kabupaten Tapanuli Selatan

Analisis persyaratan perizinan untuk kabupaten ini dilakukan berdasarkan Rencana Tata Ruang (RTRW) Kabupaten Tapanuli Selatan Tahun 2017-2037. Pelapisan rencana tata ruang terhadap area WTG menghasilkan peta yang ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar tersebut ini menunjukkan bahwa area WTG terletak di:

1. Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering
2. Kawasan Sempadan Sungai Kecil
3. Kawasan Hutan Produksi Tetap/HTP
4. Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Basah



Gambar 12. Peta rencana tata ruang wilayah Kabupaten Tapanuli Selatan (RTRW tahun 2017-2037) dilapisi dengan area WTG akhir dari kabupaten tersebut.

Di kabupaten ini, sebagian besar area WTG tumpang tindih dengan Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering, yang dapat digunakan untuk PLTB (dan jenis kegiatan pembangkit dan transmisi listrik lainnya untuk kepentingan umum) jika diperoleh perjanjian pembelian atau sewa¹⁰. Kepemilikan sebidang tanah ini juga belum diketahui untuk penelitian ini. Oleh karena itu, wajar apabila tanah tersebut diasumsikan dimiliki oleh masyarakat, perusahaan swasta, atau badan usaha milik negara. Kesepakatan harus dicapai dengan pihak-pihak tersebut untuk memungkinkan pengembangan PLTB di daerah tersebut. Kesepakatan serupa dapat diharapkan untuk area yang tumpang tindih dengan Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Basah¹⁰.

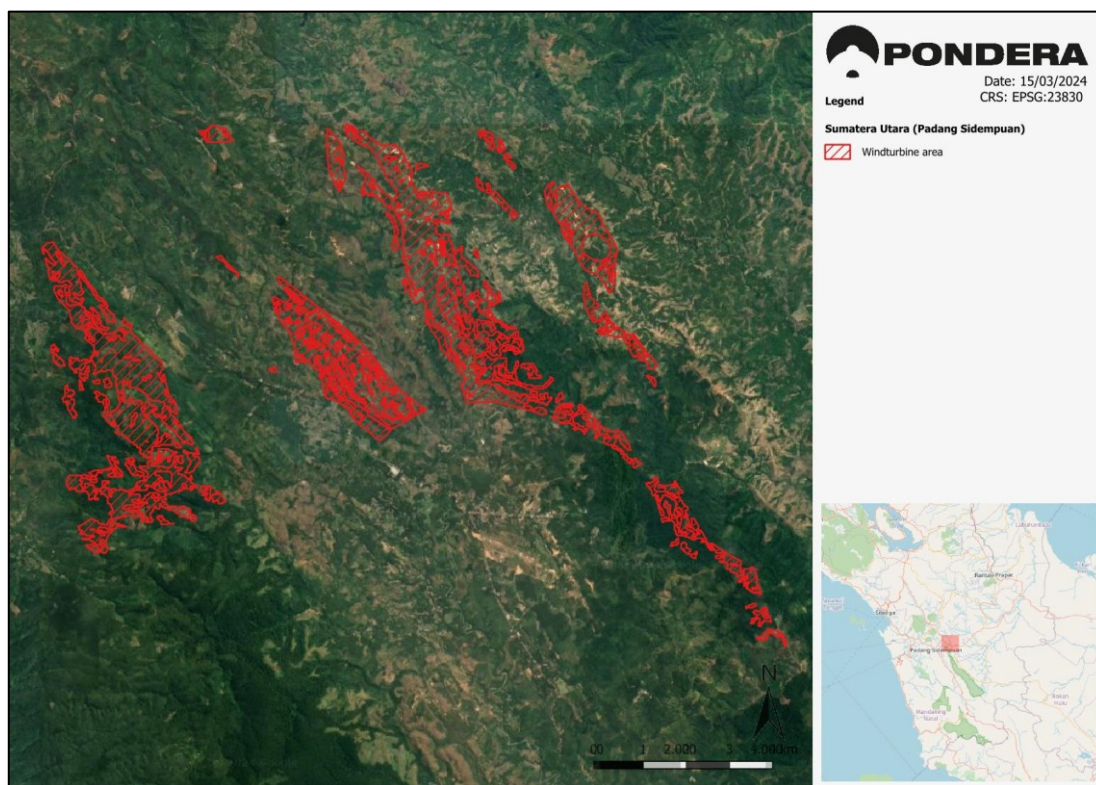


Area WTG final juga berdampingan dengan Kawasan Sempadan Sungai, dan oleh karena itu, penempatan masing-masing turbin angin harus mempertimbangkan area penggunaan lahan ini. Selain itu, sebagaimana disebutkan di atas, area WTG final yang terletak di Kawasan Hutan Produksi Tetap dapat dimanfaatkan untuk PLTB mengingat pengguna memperoleh Izin Penggunaan Kawasan Hutan (IPPKH), atau yang sekarang dikenal sebagai Persetujuan Penggunaan Kawasan atau PPKH, sesuai Peraturan Pemerintah 23/2021. Oleh karena itu, konsekuensi yang sama (misalnya pembayaran kompensasi pendapatan negara bukan pajak dan penanaman rehabilitasi) akan berlaku.

Seperti yang akan ditunjukkan nanti di Bagian 2.3, lokasi turbin angin yang dibayangkan dalam area WTG final sebagian besar terletak di Kawasan Peruntukan Pertanian Lahan Kering. Akibatnya, penggunaan lahan ini, selain dua yang ditemukan di Kabupaten Padang Lawas Utara, akan dimasukkan dalam kalkulasi kasus bisnis (lihat Bagian 2.9). Selain itu, seperti halnya kabupaten sebelumnya, RTRW yang dianalisis di sini perlu divalidasi dan dikonfirmasi dengan instansi yang berwenang di Kabupaten Tapanuli Selatan.

2.2.6 Area WTG Final

Gambaran umum area WTG final terhadap citra satelit di lokasi dapat ditemukan pada Gambar 13. Area ini memenuhi semua kriteria seperti yang divisualisasikan pada gambar sebelumnya.



Gambar 13. Area WTG final berdasarkan kriteria pembatasan. Sumber: Google Satellite Images.



Keterbatasan

Seperti disebutkan sebelumnya, parameter yang telah membentuk area WTG akhir 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 2.4 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 pembatasan); dan
3. Data jalan utama yang berasal dari OSM juga mencakup jalan kecil; Akibatnya, kumpulan data ini mungkin terlalu membatasi dalam beberapa kasus.

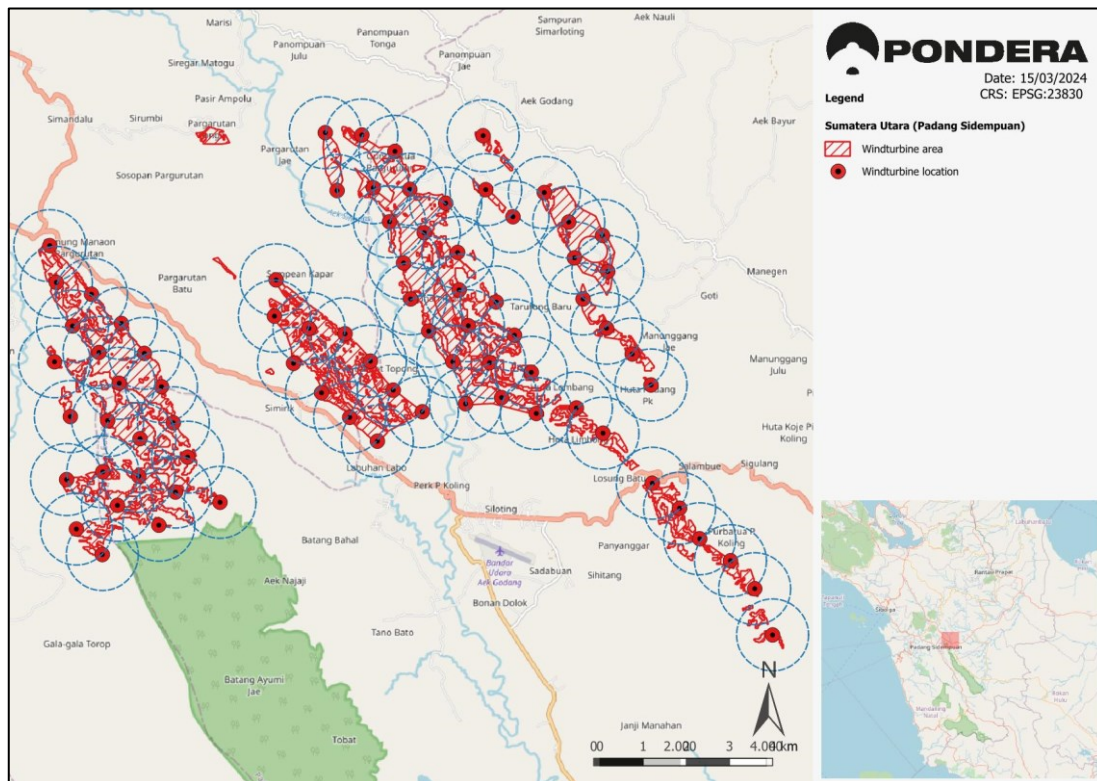
2.3 Tata letak awal PLTB

Tata letak PLTB didasarkan pada area WTG yang disediakan di Bagian 2.2 Tata letak awal PLTB dirancang berdasarkan pengelompokan sebanyak mungkin posisi turbin angin. Ini mencegah misalnya membangun jalan dan kabel ke lokasi turbin angin tunggal, yang tidak hemat 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, turbin angin referensi 4 MW dengan diameter rotor hampir 170 m dan ketinggian naf 140 m telah digunakan. 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.

Error! Reference source not found. Gambar 14 menampilkan gambaran lokasi turbin angin di area WTG final. Sebanyak 30 turbin angin ditempatkan ke daerah tersebut, sebesar total kapasitas terpasang yang dibayangkan 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 menunjukkan jarak setidaknya 5 kali diameter rotor.



Gambar 14. 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 15). Jalan-jalan 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 mengakibatkan 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. Sementara beberapa ruas jalan raya 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.



Gambar 15. 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.

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. Artinya, untuk semua rumah atau kelompok rumah 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.

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

Terdapat dua pelabuhan yang dipertimbangkan untuk memfasilitasi pengangkutan turbin angin ke wilayah Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan. Pelabuhan Sibolga merupakan pelabuhan berukuran sedang terdekat di wilayah tersebut, dengan jarak ~100 km dari wilayah Padang Lawas Utara ke arah barat laut. Sementara itu, pelabuhan terbesar yang tersedia terletak di Dumai (Provinsi Riau), 300 km dari wilayah Padang Lawas Utara ke arah timur laut.



Gambar 16. Lokasi dan akses dari Pelabuhan Sibolga (barat laut area WTG/turbin) dan Pelabuhan Dumai (timur laut area WTG/turbin) ke area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan.

Pelabuhan Sibolga ke lokasi

Selama penelitian sekunder, diasumsikan bahwa Pelabuhan Sibolga yang berlokasi lebih dekat dapat digunakan. Namun, selama kunjungan lapangan, banyak hambatan kecil dan besar yang diamati di dekat pelabuhan dan jalan menuju lokasi.

Empat lokasi yang khususnya bermasalah:

1. Jalur keluar dari Pelabuhan Sibolga ke jalan utama

Pelabuhan ini sendiri mungkin cukup memadai untuk transportasi turbin angin. Pelabuhan tersebut memiliki kedalaman air sekitar 7 m (menurut pejabat pelabuhan), platform bongkar muat 150 x 30 m dan satu *fixed crane*. Namun, tidak ada jalan akses khusus yang tersedia dari dan ke pelabuhan. Semua transportasi dilakukan melalui area pemukiman di dekatnya (lihat Gambar 17 dan Gambar 18). Selain itu, dua belokan 90 derajat harus dilakukan di area ini, dengan rumah-rumah di dekatnya.



Gambar 17. Citra satelit Pelabuhan Sibolga menunjukkan pelabuhan dikelilingi oleh area pemukiman, dan dua belokan 90 derajat harus dilakukan untuk memasuki jalan utama ke arah tenggara.



Gambar 18. Jalan perumahan tepat di luar Pelabuhan Sibolga.



2. Jembatan Batangoru (persimpangan Jl. Merdeka / Jl. Balige)

Jembatan ini memiliki desain 'sangkar' (yaitu balok baja yang menghubungkan kedua sisi di bagian atas). Biasanya, hal ini tidak menjadi masalah jika bagian atasnya cukup tinggi dan jalan menuju jembatan lurus. Namun, pada perlintasan Jl. Merdeka/Jl. Balige, setelah keluar dari jembatan harus langsung berbelok 90 derajat (lihat Gambar 19). Hal ini tidak memungkinkan tanpa mengubah tata letak jalan dan merelokasi bangunan di sekitar persimpangan ini.



Gambar 19. Persimpangan tepat setelah Jembatan Batangoru perlu didesain ulang karena turbin angin harus melewati jembatan sebelum mereka dapat berbelok.

3. Tikungan tajam di Sialogo, Tapanuli Selatan

Di Desa Sialogo di Kabupaten Tapanuli Selatan (lihat Gambar 20), terdapat turunan jalan ketinggian yang tajam. Pada jalan tersebut terdapat lima tikungan jalan (diameter 30-35 m). Karena belokan ini terletak di dalam desa, terdapat banyak bangunan, tiang listrik, dan kabel telekomunikasi yang berada di dekat jalan.



Gambar 20. Tikungan tajam di jalan di Sialogo, Tapanuli Selatan karena turunan jalan di ketinggian yang curam



4. Tata letak umum jalan

Rute dari Sibolga ke area WTG mengarah melalui dataran perbukitan dan pegunungan. Banyak belokan harus diperiksa apakah cukup lebar untuk transportasi turbin angin. Diperkirakan bahwa untuk sebagian besar belokan ini, setidaknya tiang listrik dan telekomunikasi harus dipindahkan sementara atau ditempatkan di tempat lain. Karena dataran yang berbukit, terdapat banyak jembatan di atas sungai dan beberapa sungai besar. Selama kunjungan lapangan, terhitung terdapat 63 jembatan antara Sibolga dan Bandara Aek Godang, yang berjarak kurang lebih 3,5 - 6,5 km dari area WTG. Sebagian besar jembatan ini memiliki panjang antara 5-15 m dan terbuat dari beton. Ada juga beberapa jembatan baja dengan panjang antara 20 hingga >100 m. Pada tahap ini, belum diketahui apakah semua jembatan ini dapat mengakomodasi transportasi turbin angin.

Menurut pemangku kepentingan setempat, karena alasan ini, semua transportasi berat di wilayah tersebut dilakukan melalui Pelabuhan Dumai. Pelabuhan ini terletak jauh lebih jauh dari area WTG tetapi sebagian besar mengarah melalui medan datar dengan jalan lurus. Oleh karena itu, pelabuhan Sibolga telah dikecualikan dari analisis lebih lanjut untuk pengangkutan komponen PLTB.

Pelabuhan Dumai ke situs

Karena sebagian besar angkutan berat di wilayah tersebut menggunakan Pelabuhan Dumai, maka jalan dari lokasi menuju dataran rendah sebelah timur wilayah pencarian (Sipoepoes, Desa Padang Bujur) juga telah diperiksa. Karena keterbatasan waktu, jalan yang tersisa menuju Dumai belum disurvei, tetapi penelitian sekunder menunjukkan bahwa jalan dari Sipoepoes menuju Dumai memiliki lebih banyak ruas jalan lurus dan kualitas serta lebar jalannya lebih konstan.

Jalan dari Kota Pinang menuju lokasi melewati beberapa kota. Di Gunung Tua, jalan melewati pusat kota (lihat Gambar 21). Jalan utama berbelok 90 derajat. Pada bagian ini, desain ulang jalan mungkin diperlukan, seperti yang dicontohkan pada Gambar 21.

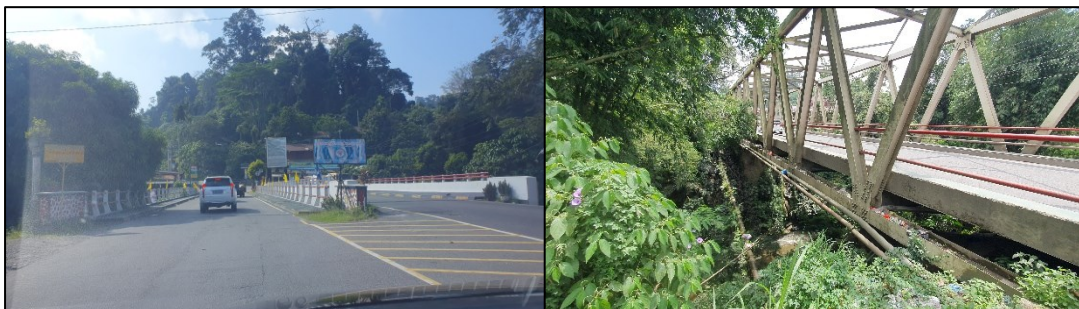


Gambar 21. Garis hitam merepresentasikan pengalihan dari jalan utama; Hal ini terutama menggunakan jalan yang sudah ada (~350 m), dan 200 m jalan sementara baru di atas lapangan/tempat parkir.



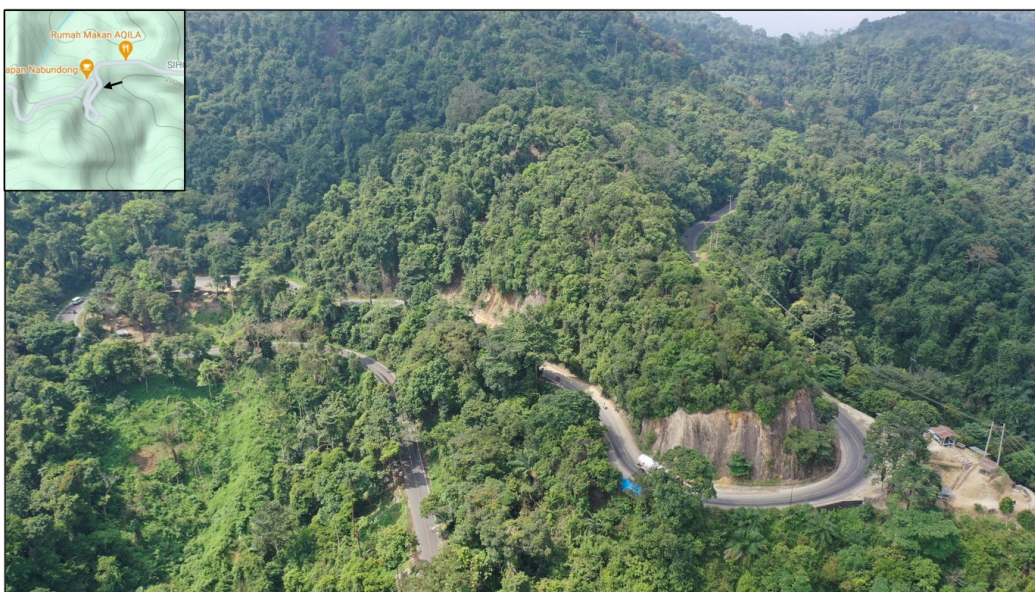
Dari Dumai ke Kota Pinang, beberapa jembatan besar harus dilewati. Jembatan yang terpanjang dari beberapa jembatan tersebut (panjang 75 dan 230 m) dibangun pada tahun 2017-2019 tepat di sebelah jembatan lama dan mungkin tidak perlu diperkuat. Jembatan utama yang dekat dengan Kota Pinang (Barumon, 180 m) juga dibangun di sebelah jembatan tua, tetapi tidak diketahui pada tahun berapa jembatan itu dibangun. Selain jembatan tersebut, satu jembatan beton di Jl. Soekarno Hatta, 3 km selatan Dumai, diperkirakan perlu diperkuat.

Dari Kota Pinang ke lokasi, ada empat jembatan (tiga beton yang lebih kecil dan satu jembatan baja yang lebih panjang) yang mungkin perlu diperkuat. Gambar 22 menunjukkan contoh jembatan beton dan baja.



Gambar 22. Contoh jembatan beton (kiri) dan jembatan baja (kanan).

Dalam hal dataran, satu hambatan besar telah diamati, yaitu tanjakan dari barat Sipoepees ke titik akses timur dari area WTG yang dibayangkan (lihat Gambar 23). Jalan tersebut dalam kondisi baik, dan berdasarkan citra satelit, radius dua tikungan tajam tersebut kira-kira 25 dan 30 m (diukur dari tengah jalan). Jalan ini lebih dari radius minimum 20 m, dan dengan demikian, tidak ada rekonstruksi jalan besar yang diharapkan. Namun, untuk bagian pendek di tikungan tajam utara, terdapat dinding batu di kedua sisi jalan yang dapat membatasi jumlah ruang (lihat Gambar 24). Singkapan yang lebih kecil mungkin harus dihilangkan.

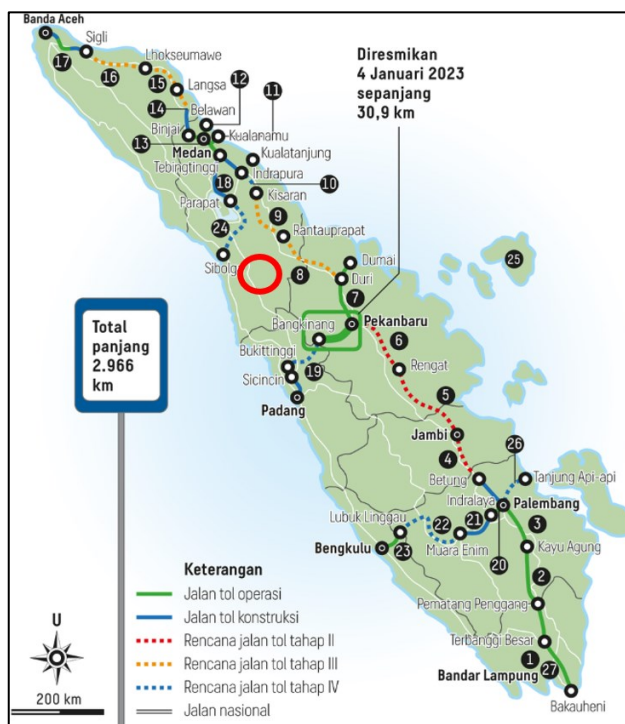


Gambar 23. Tanjakan dari barat Sipoepees ke titik akses timur dari area WTG yang dibayangkan



Gambar 24. Bagian dari tikungan tajam di utara menampilkan dinding batu di kedua sisi; singkapan batu yang lebih kecil diperkirakan tingginya sekitar 8 m.

Perlu diketahui bahwa program pembangunan jalan tol skala besar saat ini sedang berlangsung (JTTS/Jalan Tol Trans Sumatra) di Sumatra. Pada tahun 2024, fokusnya terletak pada penyelesaian Fase I dan II (lihat Gambar 25). Perencanaan fase selanjutnya, termasuk Ruas 8 Rantauprapat-Dumai, masih belum jelas. Ruas ini diharapkan menjadi jalur penting dari Pelabuhan Dumai ke area WTG.



Gambar 25. Status pembangunan jalan raya di Sumatra. Garis putus-putus menunjukkan jalan raya yang direncanakan, dengan konstruksi yang belum dimulai. Ruas 8 dapat digunakan jika sudah selesai sebelum pembangunan PLTB yang dibayangkan dimulai di area WTG (lingkaran merah). Sumber: Kompas.com, dipublikasikan 5 April 2023.



Sejak pembangunan jalan tol dimulai pada tahun 2014, jalan sepanjang 884 km telah selesai pada Februari 2024. Jika konstruksi Ruas 8 selesai sebelum pengangkutan turbin angin yang direncanakan ke area WTG, maka biaya transportasi dapat dikurangi secara signifikan karena penguatan jembatan atau perubahan dalam tata letak jalan antara pelabuhan dan lokasi tidak diperlukan.

Dengan asumsi bahwa pembangunan PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan di masa depan dimulai pada tahun 2028 dengan jalan akses dan fondasi baru, pengangkutan komponen turbin besar mungkin tidak akan dimulai sebelum tahun 2029. Dapat diasumsikan bahwa jalan tol antara Dumai dan Kota Pinang/Rantauprapat akan selesai pada saat itu. Akibatnya, penguatan jembatan utama antara Dumai dan Kota Pinang tidak diperhitungkan dalam biaya EPC (*Engineering, Procurement and Construction*).

2.4.3 Transportasi di dalam lokasi

Di dalam lokasi (area WTG), tersedia jalan utama yang menghubungkan bagian PLTB sepanjang 20 km. Diharapkan tidak diperlukan rekonstruksi besar dari jalan ini. Pengecualian untuk hal ini adalah jembatan di atas sungai Aek Sihapas, yang berada di bagian lokasi. Sungai ini terletak di lembah yang dalam, 50 m di bawah dataran sekitarnya. Ketika turbin angin ditempatkan di kedua sisi lembah ini, masing-masing bagian harus diangkut melalui lembah ini terlepas dari apakah pengangkutan akan dilakukan dari Pelabuhan Sibolga atau Pelabuhan Dumai.

Satu persimpangan di jalan utama (sekitar 1,5 km di sebelah barat laut Bandara Aek Godang) memiliki jembatan beton lama dan jembatan baja baru yang berdampingan (lihat Gambar 26). Jembatan baja baru mungkin dapat menahan beban yang lebih berat tetapi memiliki balok baja di samping dan di bagian atas.



Gambar 26. Sebuah perlintasan di dekat Bandara Aek Godang memiliki jembatan beton tua dan jembatan baja baru.



Di kedua sisi sungai, terdapat belokan 90 derajat tepat di depan dan belakang jembatan (lihat Gambar 27 dan Gambar 28), yang membuat penyeberangan melalui jembatan baru dengan komponen turbin yang panjang tidak mungkin dilakukan, karena balok baja membatasi pergerakan apa pun di luar profil jalan. Citra satelit udara dari lokasi ini tidak tersedia karena terletak di dalam zona larangan terbang dari Bandara Aek Godang.

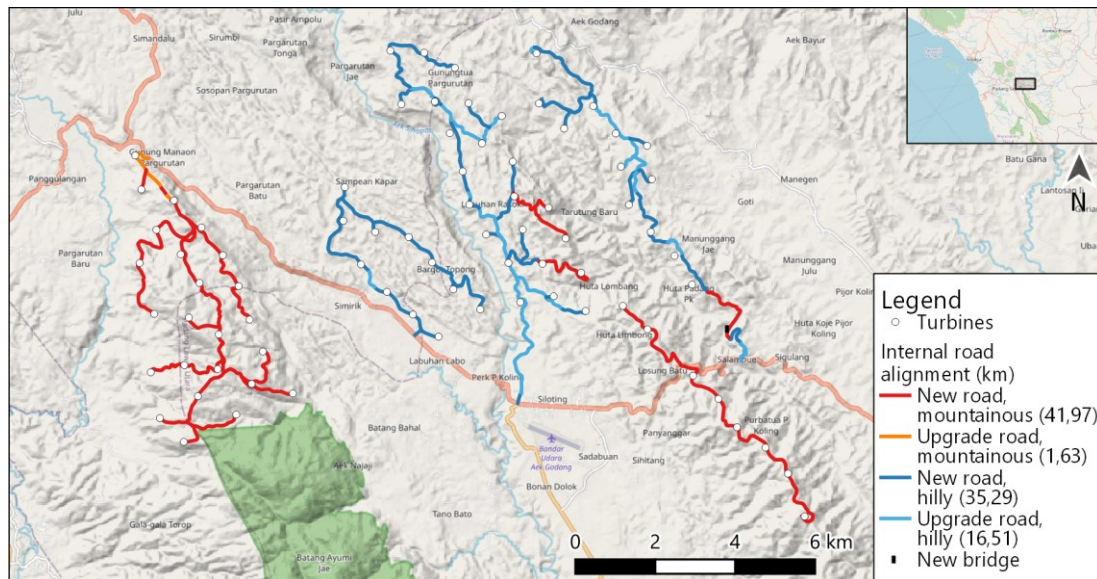


Gambar 27. Belokan tajam di kedua sisi sungai (foto diambil dengan lensa sudut lebar, yang membuat situasinya lebih luas daripada aslinya).



Gambar 28. Jembatan beton dan baja di atas sungai Aek Sihapas, dengan tikungan tajam di kedua sisi.

Dataran di dalam lokasi tidak beraturan (Subbagian 2.2.3): sebagian bergunung dan sebagian berbukit. Untuk tata letak jalan internal (lihat Gambar 29), dibuat perbedaan antara jalan baru dan jalan yang dapat ditingkatkan di medan pegunungan dan perbukitan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30. Total jalan baru dan yang ditingkatkan diperkirakan sepanjang 95 km untuk tata letak PLTB ini.



Gambar 29. Tata letak jalan internal untuk area WTG.



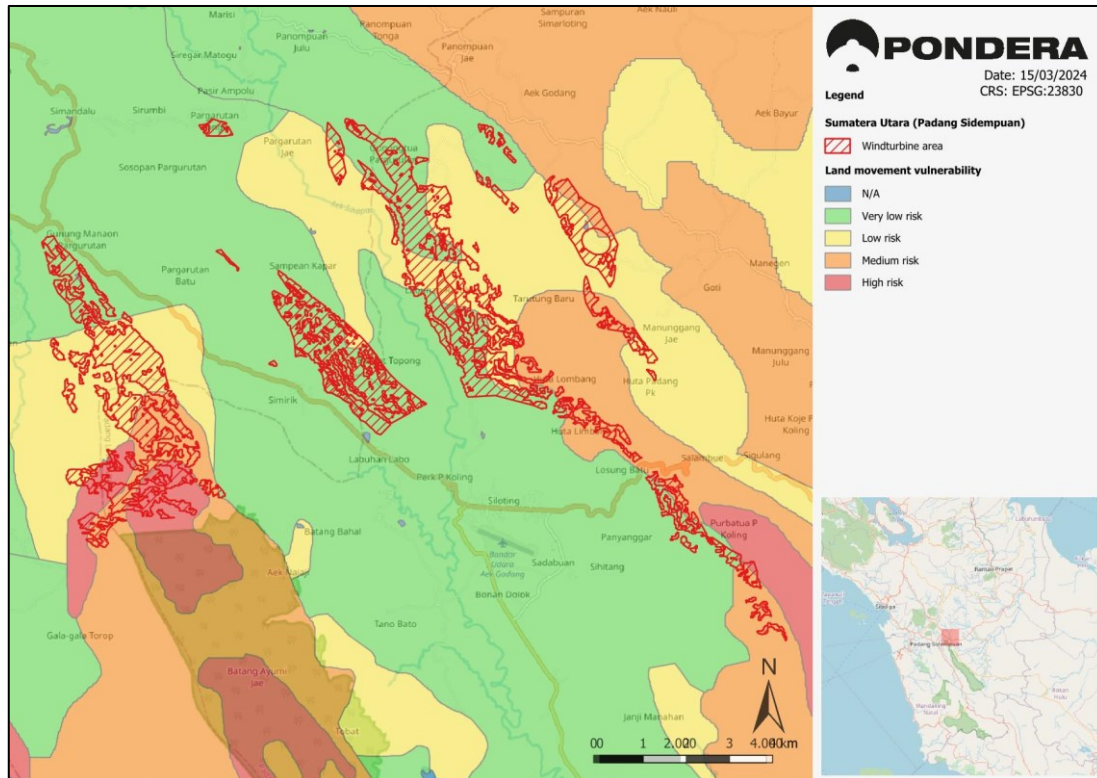
Gambar 30. Bagian dari jalan internal yang dapat ditingkatkan di daerah perbukitan (kiri); beberapa bagian sudah diaspal dan sebagian besar lebarnya ~4 m (kanan). Jalan harus diperlebar, terutama di bagian yang berkelok-kelok.

Untuk studi kelayakan, kami sarankan untuk melihat poin-poin berikut mengenai transportasi turbin angin:

- Menanyakan tentang perencanaan pembangunan jalan tol antara Dumai dan Rantauprapat. Jika jalan tol tersedia selama pengangkutan turbin angin, pengangkutan ke lokasi dapat dilakukan jauh lebih mudah dan lebih sedikit jembatan yang perlu diperkuat.
- Periksa apakah penggunaan jembatan lama yang dikombinasikan dengan jalan berkelok-kelok yang ada di atas Aek Sihapas memungkinkan (~1,5 km di sebelah barat laut Bandara Aek Godang).



Indeks Kerentanan Gerakan Tanah memberikan gambaran tentang kerentanan gerakan tanah berdasarkan kecuraman lereng, jenis tanah, curah hujan, kegempaan, dll. Gambar 32 memvisualisasikan Indeks Kerentanan Gerakan Tanah dari tanah tersebut di dalam dan sekitar area WTG, yang berasal dari Portal Mitigasi Bencana Geologi KESDM.



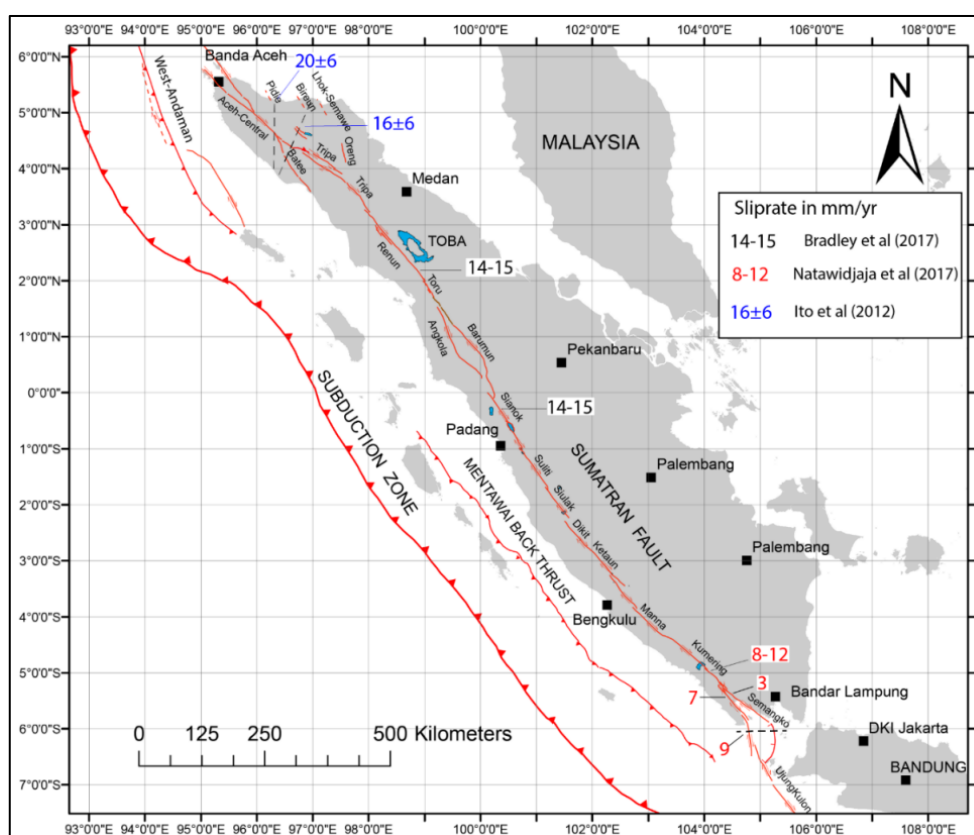
Gambar 32. Indeks kerentanan gerakan tanah area WTG Padang Lawas Utara –Tapanuli Selatan (Sumber: Portal Mitigasi Bencana Geologi Kementerian ESDM).

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

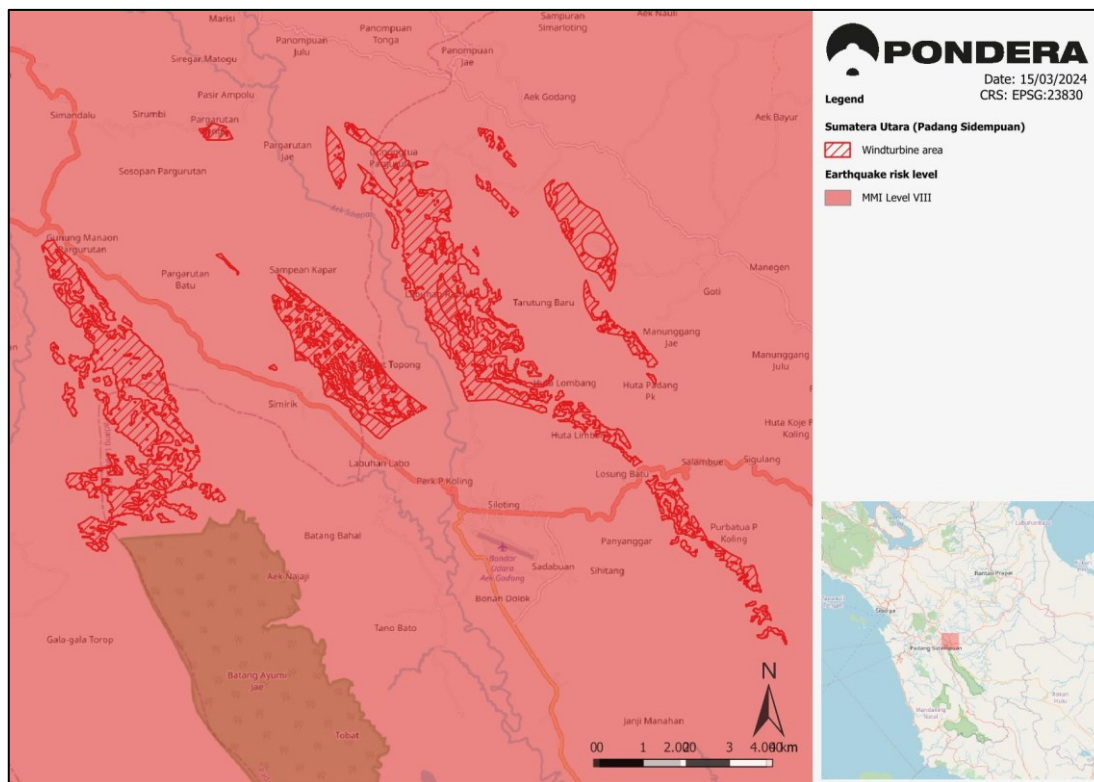
Lokasi proyek tersebut terletak relatif dekat dengan Sesar Sumatra Besar (lihat Gambar 33). Patahan/Sesar tersebut merupakan kumpulan patahan *dextral* yang membentang di sepanjang pulau dengan panjang total ~1.900 km. Sesar ini menampung pergerakan konvergensi lempeng miring antara lempeng samudera Indo-Australia dan lempeng benua Sumatra-Eurasia. Laju geser (pergerakan) diperkirakan sebesar 14-15 mm/tahun. Pergerakan ini tidak konstan tetapi terjadi secara berkala selama gempa bumi. Rata-rata, gempa bumi besar terjadi sekali di sepanjang sistem patahan sepanjang 1.900 km setiap 5 tahun (Natawidjaja, 2018). Lokasi proyek ini terletak di lokasi di mana sistem Sesar Sumatra Besar bercabang menjadi sistem patahan yang lebih luas. Hal ini berarti bahwa di dalam lokasi tersebut, terdapat lebih banyak patahan kecil.



Gambar 33. Lokasi umum sistem Sesar Sumatra Besar yang membentang di sepanjang pulau.



Menurut Kementerian ESDM, sebagian besar wilayah tersebut berpotensi dilanda gempa bumi kuat dengan intensitas lebih besar dari VIII pada skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI). Gambar 34 menunjukkan representasi visual dari tingkat risiko gempa bumi di dalam dan sekitar area WTG.



Gambar 34. Tingkat bahaya dan risiko gempa bumi di area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan.

Skala MMI mengklasifikasikan gempa bumi berdasarkan dampak pada 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 sangat besar pada struktur yang dibangun dengan buruk. Jatuhnya cerobong asap, tumpukan pabrik, kolom, monumen, dinding. Furnitur berat terbalik."*¹²

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

¹² https://pubs.usgs.gov/gip/earthq4/severity_text.html

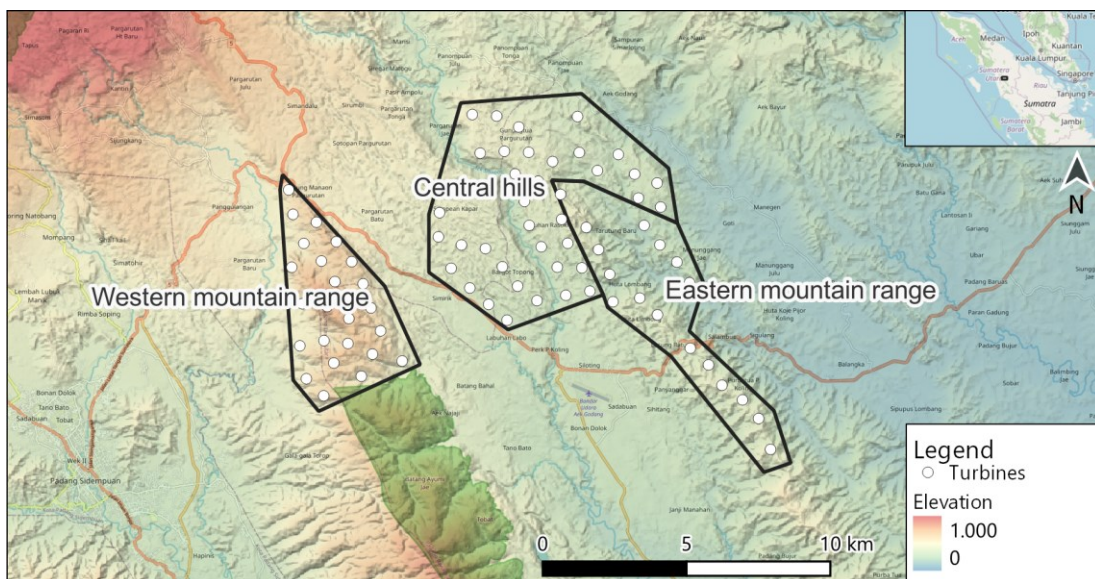


2.6 Keanekaragaman hayati, kondisi sosio-ekonomi dan lingkungan

2.6.1 Kesan umum

Area WTG Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan dapat dibagi menjadi tiga bagian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 35, baik dari segi topografi maupun penggunaan lahan. Ada tiga jenis lanskap yang dapat dibedakan:

1. Pegunungan di sebelah barat (lihat Gambar 36). Lerengnya panjang dan tidak diselingi oleh lembah yang lebih kecil. Tipe lanskap ini sepenuhnya dimanfaatkan oleh perkebunan (terutama kelapa sawit, beberapa pohon karet).
2. Daerah perbukitan tengah (lihat Gambar 37). Tipe lanskap ini mempunyai jurang yang dalam, dan digunakan untuk wanatani, berbagai tanaman pangan, dan perkebunan. Seperti terlihat pada Gambar 38, terdapat juga lembah dalam yang membelah dataran di wilayah ini.
3. Pegunungan di sebelah timur (lihat Gambar 39). Di daerah ini, terdapat lereng yang lebih curam dan banyak lembah kecil. Sebagian besar ditutupi oleh hutan primer dengan beberapa ladang petani kecil.



Gambar 35. Lokasi dibagi menjadi tiga bagian dengan topografi dan penggunaan lahan yang serupa.



Gambar 36. Gambaran pegunungan di sebelah barat.



Gambar 37. Gambaran di daerah perbukitan tengah.



Gambar 38. Gambaran lembah di daerah perbukitan tengah.



Gambar 39. Gambaran pegunungan di sebelah timur.



2.6.2 Keanekaragaman hayati dan dampak lingkungan

Sebagian besar area WTG telah dikembangkan untuk perkebunan atau pertanian. Diperkirakan bahwa daerah ini bukan lokasi dengan peringkat tertinggi dalam hal keanekaragaman hayati. Namun, di bagian tenggara, masih terdapat beberapa hutan primer. Hutan ini tidak terletak di kawasan lindung. Pembangunan di kawasan hutan kemungkinan akan berdampak pada keanekaragaman hayati dan lingkungan. Dampak utamanya adalah sebagai berikut:

Dampak keanekaragaman hayati

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

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

Karena besarnya kehadiran manusia di wilayah tersebut, diperkirakan dampak tambahan akibat pembangunan PLTB sebagian besar terbatas pada bagian tenggara di mana masih terdapat hutan primer.

Flora dan fauna yang diamati

Menurut *database* keanekaragaman hayati daring dari *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), tidak ada spesies hewan atau tumbuhan yang terancam diamati di daerah tersebut dalam beberapa waktu terakhir (lihat Gambar 40) yang dikategorikan dalam 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 liar¹³. 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).

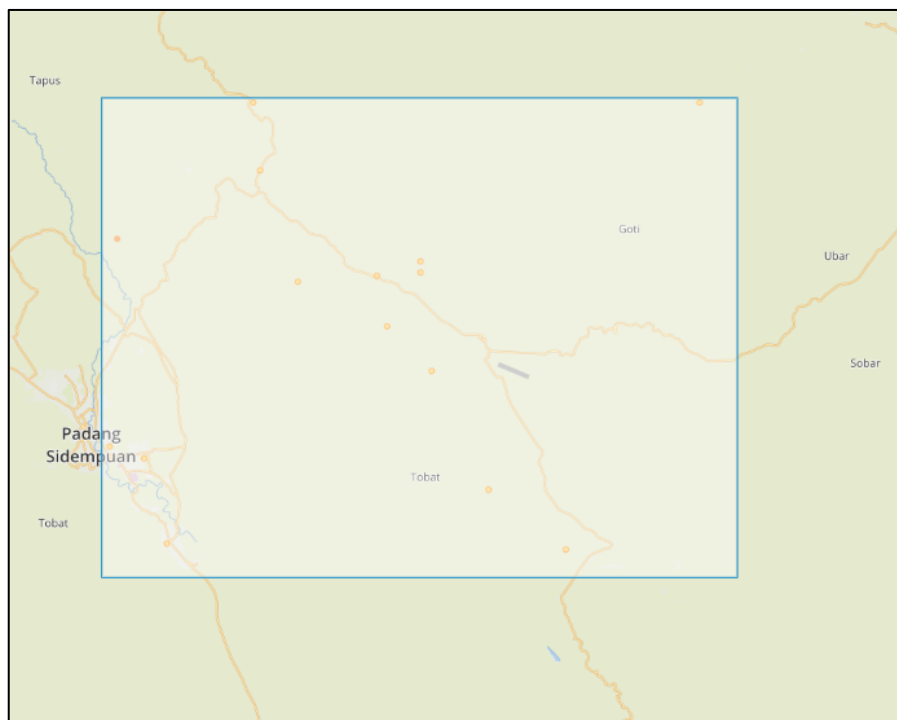
Tidak ada fauna yang terdaftar dengan status setidaknya 'hampir terancam' menurut daftar IUCN. Selain itu, hanya ada satu jenis flora yang terdaftar dalam daftar IUCN, seperti yang disajikan pada Tabel 1. *Orania sylvicola* (sejenis sawit) yang diamati pada tahun 1930-an dan didasarkan pada spesimen yang diawetkan. Tidak diketahui apakah jenis palem ini masih ada di daerah tersebut.

¹³ <https://www.britannica.com/topic/IUCN-Red-List-of-Threatened-Species>



Tabel 1. Daftar flora yang diamati (sumber: GBIF) yang setidaknya mendekati terancam menurut kategori daftar merah global IUCN

Tumbuhan	Nama Bahasa Inggris	Status
<i>Orania sylvicola</i>	-	Hampir Terancam (NT)



Gambar 40. Area di mana flora dan fauna yang disebutkan di atas telah diamati (meliputi lokasi PLTB yang dibayangkan). Seluruh pengamatan ini dikategorikan sebagai 'risiko rendah' atau 'tidak dievaluasi'.

Bahkan ketika tidak ada spesies yang terancam punah yang diamati di hutan primer, pembangunan masih akan berpengaruh pada keanekaragaman hayati. Selain itu, pendanaan internasional untuk pembangunan di dalam hutan primer tidak diberikan dengan mudah. Pengaruh terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati harus dibatasi sebanyak mungkin dan setiap kerugian harus dikompensasi.

Dampak terhadap keanekaragaman hayati dan lingkungan dapat diminimalkan jika mempertimbangkan poin-poin berikut:

- Memanfaatkan kembali sebanyak mungkin infrastruktur yang tersedia atau layak, seperti jalan akses yang ada di dalam area tersebut;
- Hindari pembangunan jalan dan/atau saluran listrik yang menyebabkan hutan yang ada terbagi menjadi beberapa bagian, dan gunakan tata letak yang sama untuk jalan dan jaringan listrik antara turbin untuk menghindari fragmentasi habitat;
- Idealnya hanya dibuat satu titik akses yang harus dibuat untuk memasuki PLTB untuk membatasi pembukaan area untuk kegiatan lain seperti penebangan liar dan perburuan / penangkapan liar; dan
- Membatasi jumlah hutan yang dibuka di sekitar setiap turbin angin (umumnya antara 50 hingga 100 x 100 m). Ruang ini digunakan untuk derek dan penyimpanan. Dengan menggunakan *self-climbing crane* dan bukan *crane* tradisional, ruang ini dapat diminimalkan.



Dengan perencanaan yang matang, penyimpanan sementara sudu turbin angin di sisi samping jalan dan bukan di samping turbin juga dapat mengurangi area yang diperlukan di sekitar turbin angin.

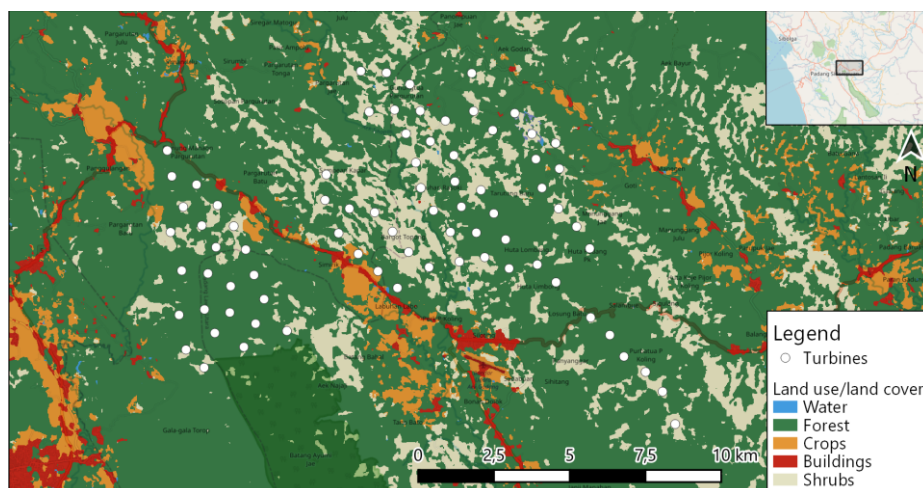
Sebagai bagian dari Analisis Dampak Lingkungan dan Sosial, studi dasar keanekaragaman hayati dan penilaian risiko serta langkah-langkah mitigasi harus dilakukan selama fase kelayakan.

2.6.3 Dampak sosial

Selain pedesaan di dekat jalan utama, daerah ini jarang penduduknya. Terdapat sejumlah desa kecil (sekitar 20-50 rumah per desa) yang tersebar di seluruh lokasi proyek (lihat Gambar 41). Di dekat jalan utama, penduduknya sebagian besar terdiri dari pemilik toko kecil dan restoran. Jalan tersebut merupakan penghubung penting antara wilayah di pesisir barat daya dan timur laut, sehingga lalu lintasnya menjadi sumber pendapatan bagi penduduk desa. Jauh dari jalan utama, sebagian besar penduduknya adalah petani skala kecil dan pekerja perkebunan. Turbin potensial ditempatkan pada jarak setidaknya 300 meter dari pemukiman tersebut.

Dampak sosial dapat dibagi menjadi beberapa aspek:

- Hilangnya 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);
- Dampak visual jangka panjang dari turbin di daerah tersebut; dan
- Peningkatan mobilitas antara kawasan tertentu ketika jalan diperbaiki.



Gambar 41. Peta penggunaan lahan berdasarkan citra satelit (ESRI/Sentinel 2, 2022). Area di sekitar PLTB sebagian besar ditutupi oleh hutan (perkebunan, wanatani), tanaman dan semak belukar.

Karena turbin sebagian besar dibangun di daerah yang jarang penduduknya, dampak sosialnya terutama terbatas pada hilangnya lahan pertanian, berkurangnya aksesibilitas selama pembangunan jalan, serta dampak transportasi dan visual.

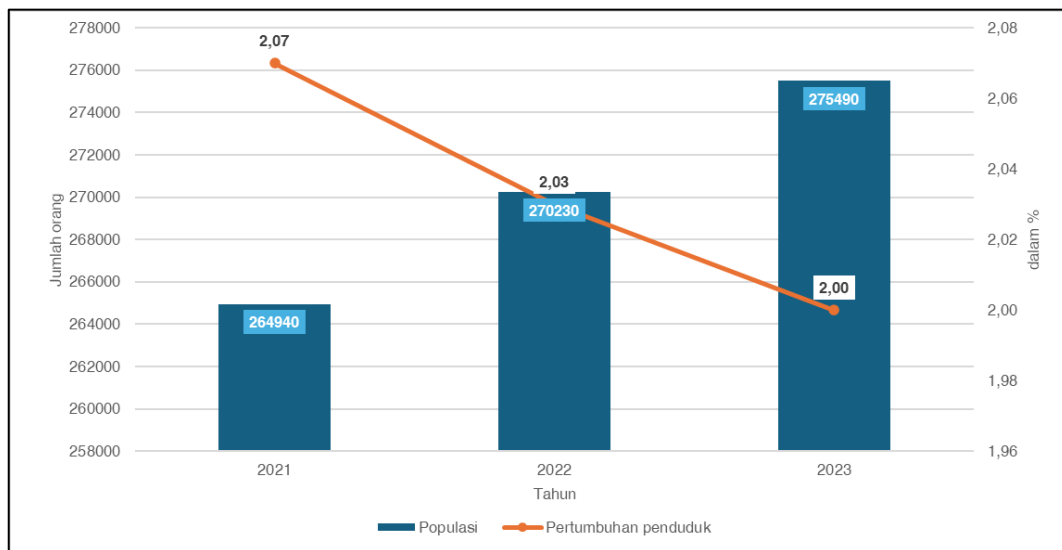
Paragraf berikutnya memberikan gambaran tentang statistik populasi dan pekerjaan di Kabupaten Padang Lawas Utara dan Tapanuli Selatan.



Populasi

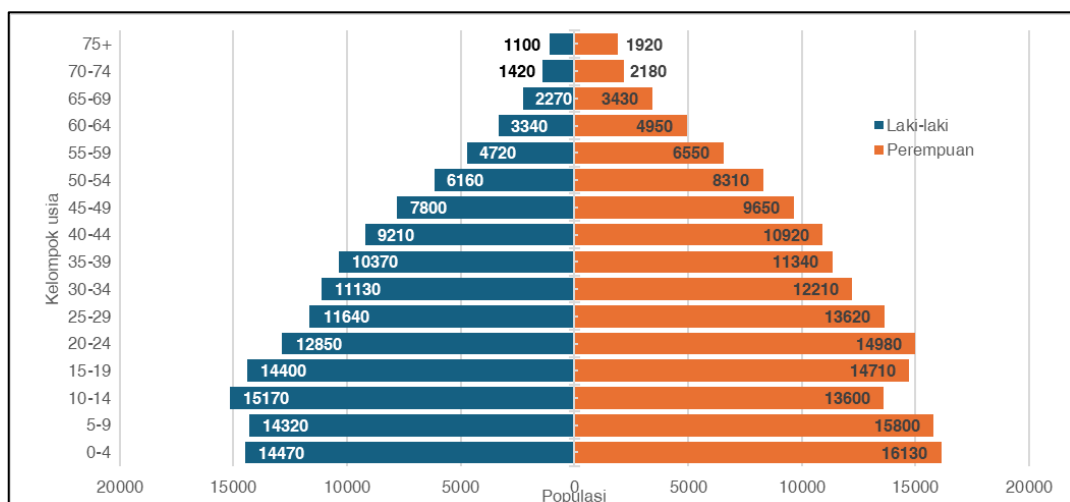
Padang Lawas Utara

Grafik populasi dan tingkat pertumbuhan penduduk tahunan ditunjukkan pada Gambar 42. Terlihat bahwa laju pertumbuhan penduduk tahunan di kabupaten tersebut menurun dari 2,07% pada tahun 2021 menjadi 2,00% pada tahun 2023. Sementara itu, jumlah penduduk meningkat dari 264.940 orang pada tahun 2021 menjadi 275.490 orang pada tahun 2023.



Gambar 42. Laju pertumbuhan penduduk dan penduduk tahunan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: [Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Piramida penduduk kabupaten ditampilkan pada Gambar 43. Perlu diperhatikan bahwa rasio gender adalah 1,01 pada tahun 2023.

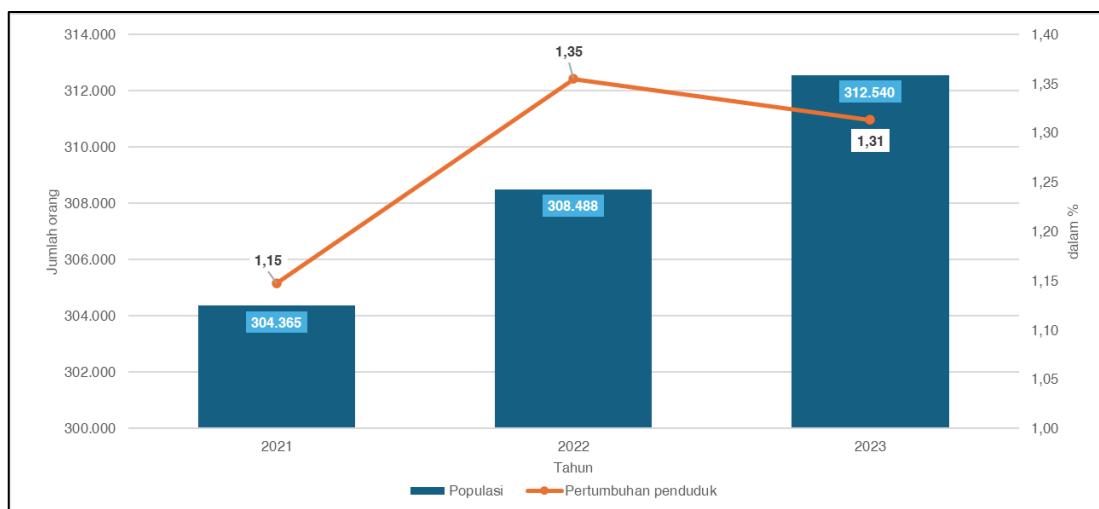


Gambar 43. Piramida kependudukan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2023 (Sumber: [Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).



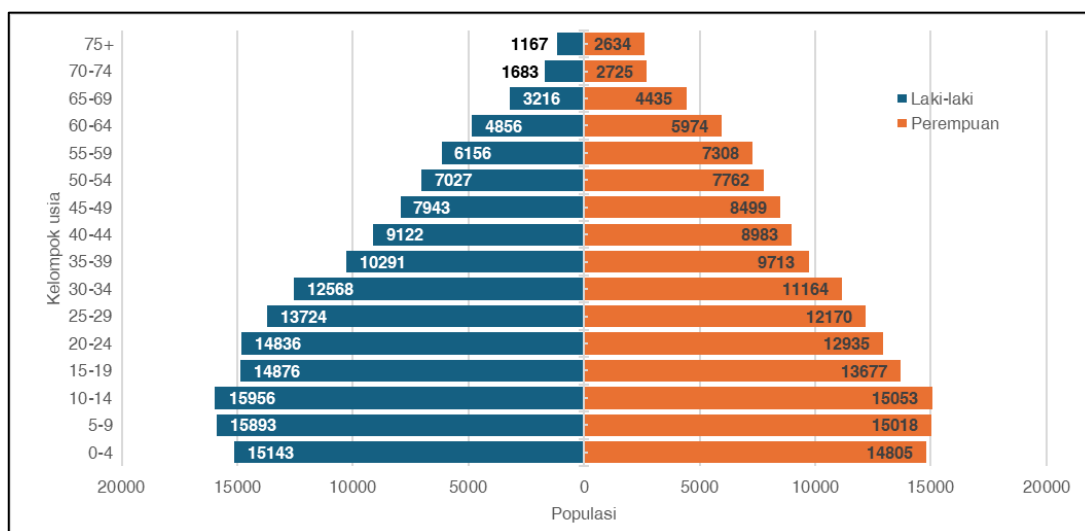
Tapanuli Selatan

Grafik populasi dan tingkat pertumbuhan populasi tahunan ditunjukkan pada Gambar 44. Terlihat bahwa laju pertumbuhan penduduk tahunan di kabupaten tersebut berfluktuasi pada tahun 2021-2023. Sementara itu, jumlah penduduk terus meningkat dalam periode yang sama.



Gambar 44. Laki pertumbuhan penduduk dan tahunan penduduk di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: [Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Piramida penduduk kabupaten ini ditampilkan pada Gambar 45. Perlu dicatat bahwa rasio gender adalah 101,38 pada tahun 2023.



Gambar 45. Piramida kependudukan di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2022 (Sumber: [Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).



Pekerjaan, pendidikan, dan perkembangan

Padang Lawas Utara

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. Angka ini ditampilkan pada Tabel 2. Selama tahun 2021-2023, angka partisipasi angkatan kerja berfluktuasi, sedangkan angka pengangguran meningkat.

Tabel 2. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran di Kabupaten Padang Lawas Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Kota Medan](#)).

Metrik (dalam %)	Tahun		
	2021	2022	2023
Partisipasi tenaga kerja	76,82	70,33	73,41
Tingkat pengangguran	3,19	4,31	4,42

Jumlah pekerja menurut pendidikan tertinggi disajikan pada Tabel 3. Secara keseluruhan, angkatan kerja didominasi oleh lulusan sekolah dasar, diikuti oleh sekolah menengah atas dan sekolah menengah pertama.

Tabel 3. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2023 (Sumber: [BPS Kabupaten Padang Lawas Utara](#)).

Pencapaian pendidikan	Bekerja	Tidak Bekerja	Jumlah Penduduk Aktif Secara Ekonomi	Persentase Pekerja yang Aktif Secara Ekonomi (%)
Sekolah dasar (SD)	31.510	277	31.787	99,13
Sekolah menengah pertama (SMP)	31.383	324	31.707	98,98
Sekolah menengah atas (SMA)	55.656	4.947	60.603	91,84
Universitas	14.671	607	15.278	96,03
Total	133.220	6.155	139.375	95,58

Angka Partisipasi Murni dalam data demografis mewakili rasio pendaftaran untuk kelompok usia yang sesuai dengan usia sekolah resmi di tingkat dasar atau menengah, dengan total populasi kelompok usia yang sama pada tahun tertentu. Angka tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.



Tabel 4. Angka partisipasi murni di Kabupaten Padang Lawas Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Sumatra Utara](#)).

Angka partisipasi murni	Tahun		
	2021	2022	2023
Tingkat pendidikan			
Sekolah dasar	98,80	100,65	99,85
Sekolah menengah pertama	83,89	87,34	92,24
Sekolah menengah atas	69,33	77,08	82,89
Universitas	10,32	15,66	11,76

Tabel 5 menunjukkan jumlah fasilitas pendidikan di kabupaten. Di antara tingkat pendidikan yang berbeda. Jumlah fasilitas pendidikan terbanyak adalah sekolah dasar, diikuti oleh sekolah menengah pertama (SMP), sekolah menengah atas (SMA), sekolah menengah kejuruan (SMK), dan universitas.

Tabel 5. Fasilitas pendidikan di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021 (Sumber: [Badan Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara \(bps.go.id\)](#)).

Tingkat pendidikan	Jumlah unit
Sekolah dasar	206
Sekolah menengah pertama	79
Sekolah menengah atas	42
Sekolah menengah kejuruan	10
Universitas	3

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 tersebut dari tahun 2021 hingga 2023 mengalami peningkatan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Lawas Padang Utara pada tahun 2021-2023 (Sumber: [Badan Statistik Kabupaten Lawas Padang Utara \(bps.go.id\)](#)).

Metrik	Tahun		
	2021	2022	2023
Indeks Pembangunan Manusia	70,11	70,93	71,63
Indeks Pemberdayaan Gender	68,14	68,98	67,41
Indeks Pembangunan Gender	88,06	88,10	88,26



Indeks Pemberdayaan Gender (GEI) mengukur ketimpangan 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 tahun 2023 berfluktuasi, 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 peningkatan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tapanuli Selatan

Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja (TPAK) dan Tingkat Pengangguran Terbuka (TPT) ditampilkan pada Tabel 2. Selama tahun 2021-2023, tingkat partisipasi angkatan kerja mengalami peningkatan, sedangkan tingkat pengangguran mengalami penurunan.

Tabel 7. Tingkat partisipasi angkatan kerja dan tingkat pengangguran di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Kota Medan](#)).

Metrik (dalam %)	Tahun		
	2021	2022	2023
Partisipasi angkatan kerja	74,38	74,53	75,64
Tingkat pengangguran	4,00	3,65	3,49

Jumlah pekerja menurut pendidikan tertinggi dari disajikan pada Tabel 8. Secara keseluruhan, angkatan kerja didominasi oleh lulusan sekolah menengah atas, diikuti oleh sekolah dasar dan sekolah menengah.

Tabel 8. Pekerja menurut pendidikan tertinggi (orang) di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2023 (Sumber: [BPS Kabupaten Tapanuli Selatan](#))

Pencapaian pendidikan	Bekerja	Menganggur	Jumlah Penduduk Aktif Secara Ekonomi
Sekolah dasar (SD)	46.512	506	46.658
Sekolah menengah pertama (SMP)	39.878	732	40.610
Sekolah menengah atas (SMA)	43.729	3.955	47.684



Pencapaian pendidikan	Bekerja	Menganggur	Jumlah Penduduk Aktif Secara Ekonomi
Sekolah menengah kejuruan (SMK)	15.189	-	15.189
Diploma I/II/III	3.165	-	3.165
Universitas	13.659	660	14.319
Total	161.772	5.853	167.625

Angka partisipasi murni kabupaten ditunjukkan pada TabelTabel 9.

Tabel 9. Angka partisipasi murni di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2021-2023 (Sumber: [BPS Sumatra Utara](#)).

Angka partisipasi murni	Tahun		
Tingkat pendidikan	2021	2022	2023
Sekolah dasar	98,14	99,62	99,02
Sekolah menengah pertama	80,80	73,48	89,83
Sekolah menengah atas	68,89	57,67	67,98
Universitas	17,61	19,44	21,19

Jumlah fasilitas pendidikan di Kabupaten Tapanuli Selatan ditunjukkan pada TabelTabel 10.

Tabel 10. Fasilitas pendidikan di Kabupaten Tapanuli Selatan pada tahun 2023 (Sumber: [Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan \(bps.go.id\)](#)).

Tingkat pendidikan	Jumlah unit
Taman kanak-kanak (TK)	157
Madrasah Diniyah Awaliyah (MDA)	191
Sekolah dasar (SD)	271
Madrasah Ibtidaiyah (MI)	12
Sekolah menengah pertama (SMP)	47
Madrasah Tsanawiyah (MTs)	33
Sekolah menengah atas (SMA)	12
Sekolah menengah kejuruan (SMK)	13
Madrasah Aliyah (MA)	27



Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 11, HDI Kabupaten Tapanuli Selatan dari tahun 2021 hingga 2023 meningkat dari 73,37 menjadi 74,58. Selain itu, GEI di kabupaten tersebut menunjukkan peningkatan yang stabil. Selama periode yang sama, GDI berfluktuasi.

Tabel 11. Indeks Pembangunan Manusia, Indeks Pemberdayaan Gender, dan Indeks Pembangunan Gender di Kabupaten Tapanuli Selatan Tahun 2021-2023 (Sumber: [Statistik Kabupaten Tapanuli Selatan \(bps.go.id\)](https://bps.go.id)).

Metrik	Tahun		
	2021	2022	2023
Indeks Pembangunan Manusia	73,37	73,96	74,58
Indeks Pemberdayaan Gender	69,25	70,95	71,61
Indeks Pembangunan Gender	90,74	90,99	90,63

2.7 Desain jaringan transmisi

2.7.1 Titik koneksi

Berdasarkan lokasi tata letak PLTB awal yang dibayangkan, titik koneksi terdekat ke jaringan PLN yang ada telah ditentukan. Gardu induk PLN 150 kV (ULTG) Padang Sidempuan yang terletak di timur Desa Sidikalang, dipilih untuk studi ini. Foto udara gardu induk ini terdapat dalam Gambar 46. 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.

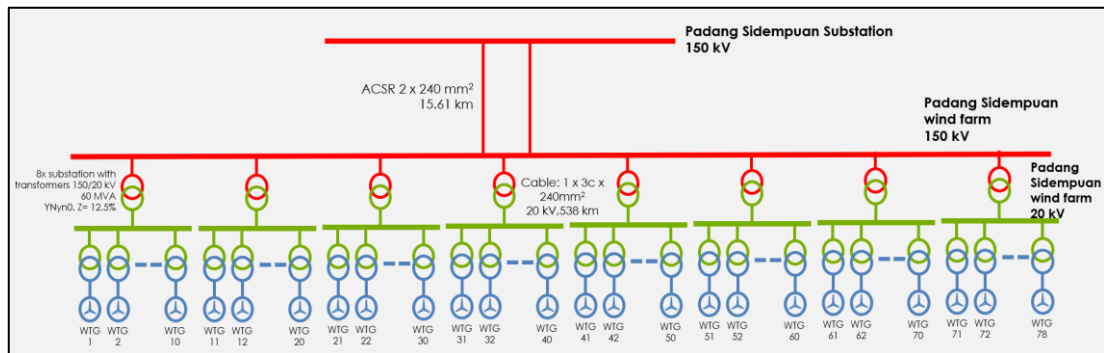


Gambar 46. Lokasi gardu induk PLN 150 kV (ULTG) Padang Sidempuan. Sumber: Google Maps.



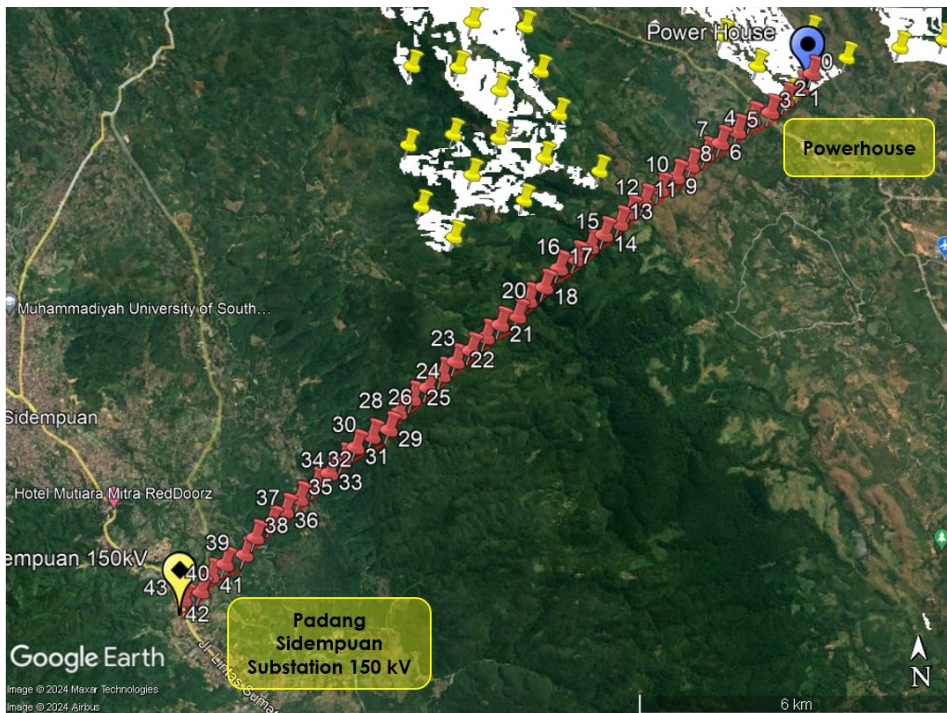
2.7.2 Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi

Pada Gambar 47, desain skematis jaringan transmisi dan distribusi diilustrasikan. Masing-masing 78 turbin angin akan memiliki keluaran 20 kV (melalui transformator 5 MVA per turbin angin) yang didistribusikan melalui kabel distribusi. Per rangkaian maksimal 10 turbin angin, listrik yang dihasilkan didistribusikan ke salah satu dari delapan gardu induk di dalam PLTB. Di gardu induk ini, tegangan diubah menjadi 150 kV. Dari gardu induk, kabel 150 kV disatukan dan dihubungkan ke rumah pembangkit di perbatasan PLTB. Saluran transmisi udara mengangkut listrik yang dihasilkan dari rumah pembangkit ke titik koneksi, gardu induk Padang Sidempuan.



Gambar 47. Desain skematis jaringan transmisi dan distribusi di PLTB yang dibayangkan.

Saluran transmisi udara antara rumah pembangkit dan gardu PLN diasumsikan sebagai garis lurus antara kedua lokasi, meliputi 15 km seperti yang divisualisasikan pada Gambar 48. Sebanyak 44 menara transmisi direncanakan dengan jarak perantara antar menara sebesar 340-450 m.



Gambar 48. Representasi skematis dari posisi saluran transmisi udara antara pembangkit listrik dan gardu induk Padang Sidempuan.

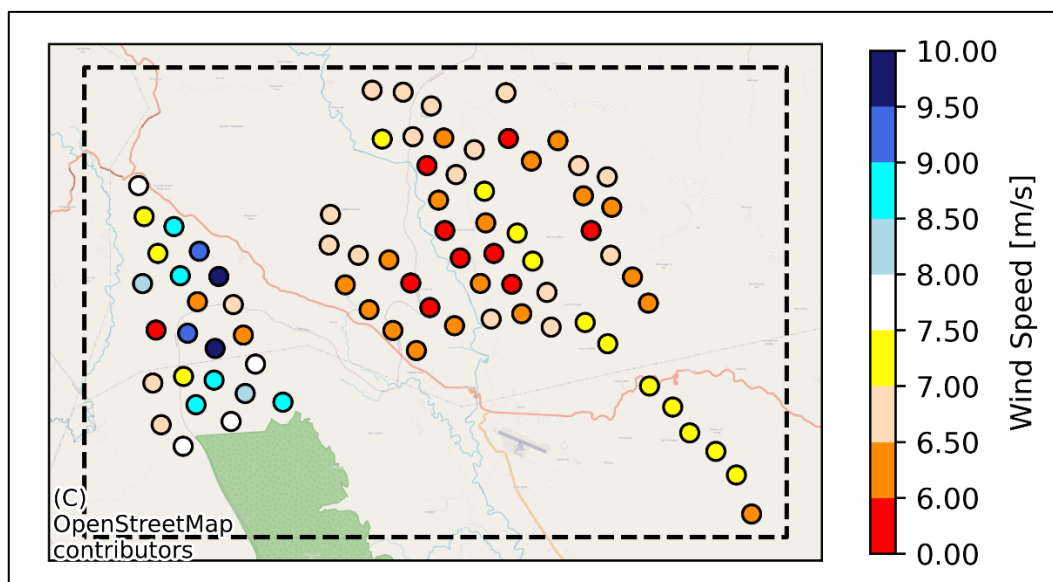


2.8 Asesmen keluaran energi

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 daya.

Untuk asesmen keluaran energi PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan, 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 terperinci dari pola aliran yang kompleks. Hal ini penting karena WTG yang dipertimbangkan sebagian ditempatkan di dataran yang kompleks dengan intensitas turbulensi tinggi.

Resolusi horizontal LES adalah 100 m dan resolusi dalam arah vertikal adalah 40 m. Klimatologi didasarkan pada pilihan 50 hari perwakilan yang dipilih antara tahun 2002 dan 2024. Pemilihan dilakukan berdasarkan data kecepatan angin ERA5 pada ketinggian 100 m dan memperhitungkan variasi iklim angin akibat El Nino dan La Niña.



Gambar 49. Hasil kecepatan angin rata-rata jangka panjang dengan model ASPIRE pada ketinggian 140 m di lokasi turbin. Lingkaran berbatas hitam mewakili turbin angin, sedangkan warna di dalam lingkaran menunjukkan kecepatan angin rata-rata jangka panjang masing-masing.

Gambar 49 menunjukkan klimatologi yang dihasilkan di lokasi WTG. Kecepatan angin jangka panjang yang dimodelkan, yang dirata-ratakan dari semua 78 WTG pada ketinggian yang direncanakan 140 m, adalah 6,9 m/s. Lokasi yang ditandai dengan warna merah menunjukkan kecepatan angin di bawah 6 m/s. Harus dicatat bahwa kecepatan angin rata-rata di *Global Wind Atlas* (GWA), jauh lebih rendah (lihat Gambar 6). Namun demikian, verifikasi model numerik melalui pengukuran sangat penting, dan dalam hal ini, model LES yang lebih rumit digunakan untuk analisis lebih lanjut. Tren kecepatan angin konsisten antara data jangka panjang dan *Global Wind Atlas*.

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



2.8.1 Rugi-rugi energi

AEP netto 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 bersih ditampilkan sebagai AEP P50. Nilai P50 adalah tingkat kepercayaan statistik yang menunjukkan nilai AEP yang dapat dilampaui dengan probabilitas 50%. Dengan kata lain, P50 AEP adalah produksi energi tahunan rata-rata yang diharapkan selama masa pakai PLTB. Tabel 12 menyajikan perkiraan rugi-rugi pada tingkat PLTB.

Tabel 12. Rugi-rugi yang diperkirakan di tingkat PLTB

Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
Interaksi	Rugi-rugi olakan [%]	10,8%	Rugi-rugi olakan adalah pengaruh agregat pada produksi energi oleh PLTB, yang dihasilkan dari perubahan kecepatan angin yang disebabkan oleh <i>downwind</i> dari turbin angin satu sama lain. Rugi-rugi olakan dimodelkan menggunakan model standar NO Jensen (RISØ / EMD) (versi PARK2 – 2018) di windPRO, menghasilkan rugi-rugi olakan keseluruhan sebesar 2,0%.
	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) ¹⁴ dengan parameterisasi linier digunakan untuk menghitung halangan. Halangan 0% diperkirakan untuk tata letak di Padang Lawas Utara dan Tapanuli Selatan.
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.

¹⁴ Meyer Forsting, A. R., 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
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 pencegahan 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.
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.



Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
	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%	Turbin angin diposisikan di hutan dan perubahan ketinggian pohon atau penebangan pohon dapat menyebabkan kekasaran yang berbeda dan perubahan kecepatan angin. Namun, karena ketinggian pohon yang terbatas (sekitar 15 m), dan tidak ada penebangan pohon yang substansial yang diperkirakan, dalam hal ini tidak ada kerugian 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 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.



Kategori	Tipe rugi-rugi energi	Jumlah	Keterangan
			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 $1-(1-\text{rugi-rugi A}) \cdot (1-\text{rugi-rugi B}) \cdot (1-\text{rugi-rugi C}) \dots$ dll.
Total rugi-rugi [%]		22,4%	Akumulasi semua rugi-rugi yang disebutkan di atas, termasuk rugi-rugi olakan. Berdasarkan $1-(1-\text{rugi-rugi A}) \cdot (1-\text{rugi-rugi B}) \cdot (1-\text{rugi-rugi C}) \dots$ 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: $P90 = P50 \cdot (1 - 1,28 \cdot \sigma)$. 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 13.

Tabel 13. Keluaran energi untuk semua 78 WTG di PLTB Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan.

Parameter [Satuan]	Jumlah
Jumlah WTG baru	78
Nilai Daya per WTG [MW]	4,0
Total Nilai Daya [MW]	312,0
Diameter rotor [m]	~170
Tinggi naf [m]	140
Kepadatan udara [kg/m ³]	1,129
Kecepatan angin [m/s]	6,9
Hasil bruto [MWh/th]	1.183.369
Hasil bruto termasuk efek olakan [MWh/th]	1.055.565
P50 [MWh/th]¹⁵	918.143
P90 (25 th) [MWh/th]	682.813

¹⁵ 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.

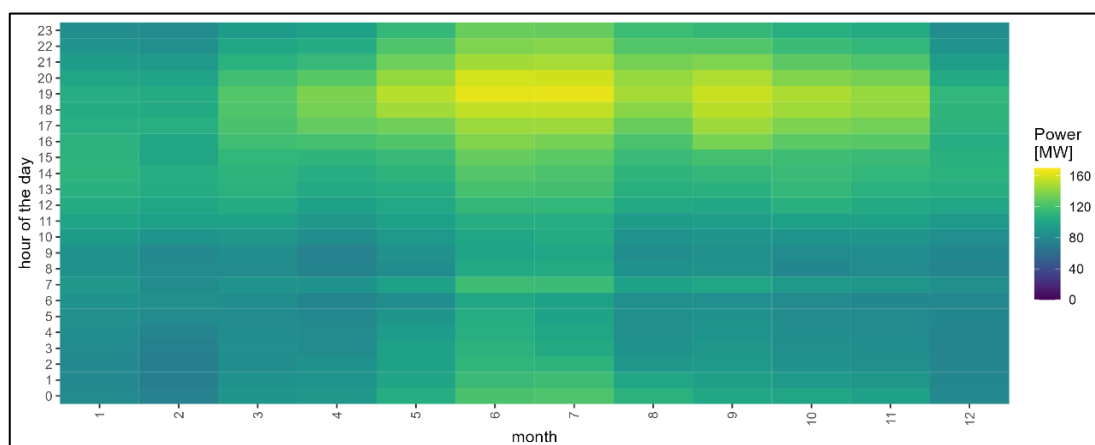


Parameter [Satuan]	Jumlah
P50 [jam/th]	2.943
P90 (25 th) [jam/th]	2.189

2.8.3 Variasi keluaran daya

Dalam Subbagian 2.8.2 kami telah memberikan perkiraan produksi tahunan P50, setara dengan 918.143 MWh per tahun. 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.

Gambar 50 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 50. 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 dilakukan sebelum dimulainya sebagian besar pekerjaan desain dan pasti 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: (7 tiang pengukuran meteorologis, durasi 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 yang relevan untuk pemasangan 78 turbin angin di PLTB ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Jumlah turbin angin relevan untuk PLTB yang dibayangkan.

Komponen utama	Jumlah
Nasel termasuk generator (4 MW)	78 buah
Sudu (85 m)	234 buah
Segmen menara (tinggi total 140 m)	468 buah

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

- Produsen turbin angin Republik Rakyat Tiongkok (RRT) digunakan sebagai turbin referensi. Pabrikan ini sejauh 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 lokasi, garansi kualitas, dll. diperlukan;
- Semua komponen turbin angin dikirim dari RRT ke Pelabuhan Dumai dan melalui transportasi darat membawa lokasi PLTB;



- Diasumsikan bea masuk sebesar 5% berlaku untuk generator dan sudu, dan sebesar 15% untuk bagian menara¹⁶;
- Biaya tersebut sudah termasuk transportasi, sewa *crane*, instalasi, dan *commissioning*.

Pekerjaan sipil

Jumlah yang relevan untuk pekerjaan sipil yang diperlukan untuk pemasangan 78 turbin angin di PLTB ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Daftar asumsi tentang komponen pekerjaan sipil.

Komponen utama	Sub-komponen	Jumlah
Jalan (termasuk desain, material, transportasi, tenaga kerja)	Pembangunan jalan berkerikil baru di dalam lokasi PLTB	77 km
	Peningkatan jalan	18 km
Memperkuat jembatan (termasuk desain, material, transportasi, tenaga kerja)	Penguatan jembatan beton	7 jembatan
	Penguatan jembatan baja	1 jembatan
Fondasi (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	Jangkar (72 per fondasi)	5.616 buah
	Kandang jangkar	78 buah
	Beton (230 m ³ per fondasi)	17.940 m ³
	Baja (35 ton per fondasi)	2.730 ton
Crane hardstands (termasuk desain, bahan, transportasi, tenaga kerja)	<i>Crane hardstand</i> (50 x 100 m) menggunakan kerikil	78 <i>hardstand</i>

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

- Pekerjaan sipil termasuk desain, material, transportasi dan tenaga kerja;
- Penguatan jembatan jalan raya tidak termasuk. Diasumsikan bahwa jembatan tersebut cukup kuat;
- 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.

¹⁶ Asumsi berdasarkan laporan PwC berjudul *Power in Indonesia: Investment and Taxation Guide* (Agustus 2023, Edisi ke-7)



Pekerjaan kelistrikan

Tabel berikut adalah daftar kuantitas terbatas untuk pekerjaan kelistrikan yang telah ditentukan untuk PLTB pada Tabel 16.

Tabel 16. Daftar asumsi komponen pekerjaan kelistrikan.

Komponen utama	Sub-komponen	Jumlah
Saluran transmisi (15 km, 44 menara)	Menara transmisi	44 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	78 unit
	<i>Switchgear</i> LV	1 pc
	<i>DC Supplies</i>	1 pc
	Proteksi petir	1 pc
	Kabel 2x3C 300 mm	567 m
Pekerjaan listrik PLTB (antara pembangkit tenaga listrik, gardu induk dan turbin angin)	Transformator 20 kV (5 MVA)	78 unit
	<i>Switchgear</i>	78 unit
	Kabel MVAC (1 x 3c x 240) 50 dan 300 meter	538 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 (empat untuk seluruh PLTB)	Transformator 150/20 kV 30 MVA	8 unit
	Resistor <i>Grounding</i> Netral	8 unit
	<i>Switchyard</i>	1 unit
	<i>Bay</i> masuk/keluar, <i>coupler</i> , <i>busbar</i> , Panel RCP	8 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 (Lihat Subbagian 2.2.4).
- Asuransi (misalnya asuransi kerusakan mesin, kewajiban pihak ketiga).

2.9.2 Asumsi biaya

Pada 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).

Tabel 17. Asumsi biaya per komponen biaya

Komponen biaya	Biaya dasar termasuk PPN	Komentar	Kisaran biaya
Pekerjaan persiapan	USD 6.375.000	DEVEX: Sebelum Pemenuhan Pembiayaan	90% - dasar -120%
Manajemen proyek	USD 23.220.000	DEVEX: Sampai CoD	Dasar
Turbin angin	USD 217.408.000	CAPEX: termasuk transportasi dan instalasi	90% - dasar -120%
Pekerjaan sipil: fondasi	USD 31.255.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan sipil: jalan	USD 43.817.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan sipil: <i>crane hardstand</i>	USD 10.940.000	CAPEX	80% - dasar -150%
Pekerjaan kelistrikan	USD 74.646.000	CAPEX	90% - dasar -120%



Komponen biaya	Biaya dasar termasuk PPN	Komentar	Kisaran biaya
Pembebasan lahan	USD 79.961.000	CAPEX	90% - dasar -150%
Kontingensi risiko	USD 37.152.000	DEVEX + CAPEX	Dasar
Total biaya investasi batas bawah (DEVEX + CAPEX)	USD 469.734.000	Biaya investasi per MW: USD 1.506.000	
Total biaya investasi batas dasar (DEVEX + CAPEX)	USD 524.776.000	Biaya investasi per MW: USD 1.682.000	
Total biaya investasi batas atas (DEVEX + CAPEX)	USD 667.449.000	Biaya investasi per MW: USD 1.901.000	
Pengeluaran operasional dasar (OPEX)	USD 9.017.000 / tahun	Biaya operasional per MW/tahun: USD 29.000	

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 2024)¹⁷ dan dengan 7 lokasi lainnya.

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 jaringan listrik Sumatra Utara) = USD 10,49 sen/kWh

¹⁷ Sumber: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/actual-and-forecast-onshore-wind-costs-2016-2025>



- 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 2.8.2, 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 atas. Kasus bisnis ini mengarah pada hasil berikut:

Tabel 18. Hasil asesmen kasus bisnis.

Hasil kasus bisnis	Skenario biaya batas bawah	Skenario biaya batas dasar	Skenario biaya batas atas
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR) Proyek (sebelum pajak) di P50	12,93 %	10,80 %	6,77 %
Rata-rata <i>Debt Service Coverage Ratio</i> (DSCR) di P90	0,97	0,88	0,72
Laba bersih di P50 selama 25 tahun	USD 417.987.000	USD 356.181.000	USD 210.654.000



3 Kesimpulan dan Rekomendasi

Berdasarkan analisis yang dilakukan dan data yang tersedia, disimpulkan bahwa kelayakan tekno-ekonomi keseluruhan dari PLTB di Padang Lawas Utara – Tapanuli Selatan relatif dapat menjanjikan tetapi membutuhkan optimalisasi lebih lanjut untuk meningkatkan IRR dan DSCR (saat ini masih di bawah 1) ke tingkat yang menarik. Kecepatan angin sangat bervariasi di seluruh PLTB yang dianalisis, artinya beberapa posisi turbin angin memiliki sumber daya angin yang relatif rendah dibandingkan posisi lainnya. Hal ini berdampak negatif pada kasus bisnis untuk seluruh PLTB. Penyebab utamanya adalah kecepatan angin yang lebih rendah daripada yang diharapkan di lokasi turbin angin tertentu. Meskipun penilaian sumber daya angin awal hanya mencakup wilayah dengan kecepatan angin di atas 6 m/s, selama tahap pemodelan angin, kecepatan angin di beberapa lokasi turbin angin ternyata berada di bawah angka tersebut (lihat Gambar 49). 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*.

Dengan melakukan perhitungan *micro-siting* dan kasus bisnis per posisi turbin angin tertentu (misalnya memilih posisi dengan kinerja terbaik), kasus bisnis dapat dioptimalkan dalam analisis selanjutnya. Kami merekomendasikan untuk mempertimbangkan kembali tata letak lokasi selama studi lanjutan. Di sini fokusnya bisa pada kelompok turbin barat atau pada punggung bukit yang memanjang hingga bagian tenggara wilayah tersebut. Kedua wilayah ini memiliki kecepatan angin rata-rata di atas 7 m/s, yang menguntungkan untuk kasus bisnis. Selain itu, jika melihat perincian biaya investasi, biaya pengadaan tanah dan pekerjaan kelistrikan mempunyai porsi yang relatif besar terhadap total biaya. Dalam analisis selanjutnya, upaya dapat dilakukan untuk menurunkan biaya ini melalui mengoptimalkan tata letak PLTB dan meminimalkan kebutuhan untuk pembebasan lahan.

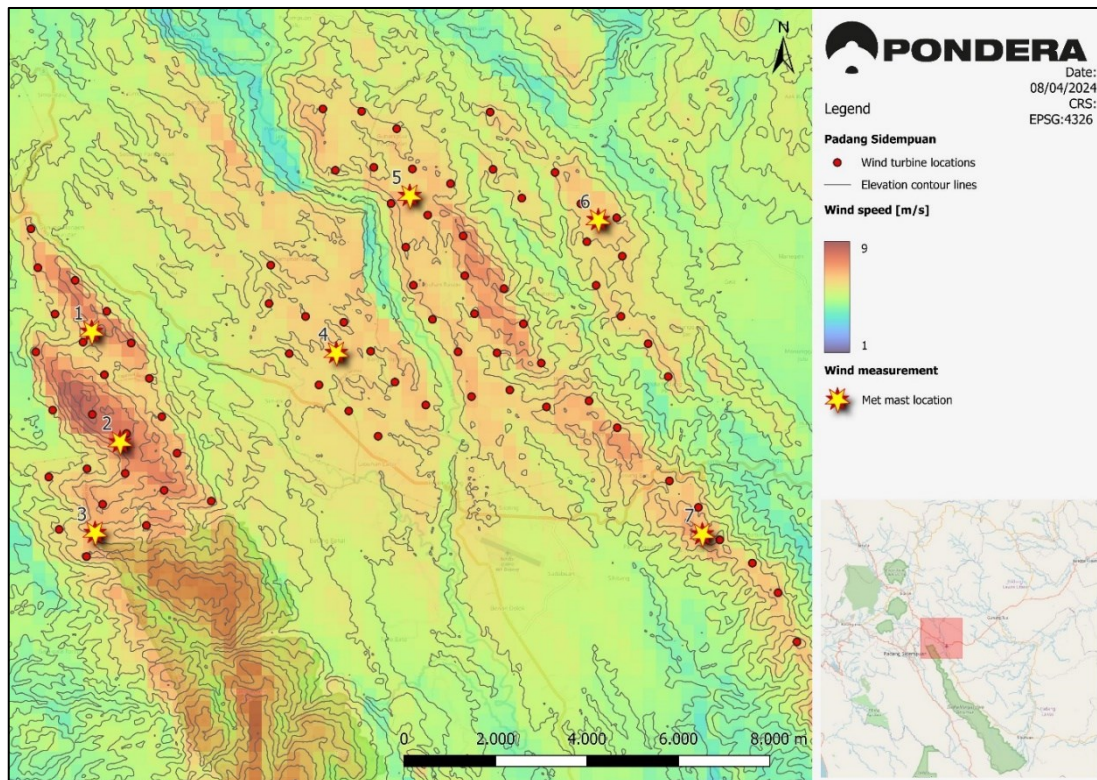
Selain pengoptimalan yang diperlukan, PLTB yang dibayangkan memiliki risiko yang harus dipertimbangkan oleh pengembang dan investor. Hal ini dapat diringkas dalam daftar risiko non-limitatif berikut, termasuk rekomendasi tindakan mitigasi masing-masing:

- **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 untuk setidaknya menempatkan tujuh tiang pengukuran meteorologis untuk pengumpulan data setidaknya selama satu tahun (lihat Gambar 51). 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.

Wilayah barat daya lokasi ini memiliki variasi terbesar. Oleh karena itu, di bagian selatan, tengah dan utara tiang pengukuran meteorologis diposisikan (nomor 1, 2, dan 3). Karena puncak gunung di bagian tengah, sangat penting untuk melakukan pengukuran tambahan dengan anemometer 3D ultrasonik. Di puncak gunung, kemungkinan besar turbin akan mengalami draf naik dan turun. Menggunakan anemometer 3D ultrasonik, kecepatan horizontal dan kecepatan vertikal akan diukur. Di sebelah barat laut bandara, direkomendasikan tiang pengukuran meteorologis di lembah dan di bukit (nomor 4 dan 5).



Untuk tiang pengukuran meteorologis di bagian tenggara punggung bukit, juga direkomendasikan menggunakan anemometer 3D ultrasonik karena besar akan mengalami naik-turunnya arus (nomor 7). Selain itu, di bagian timur laut yang jauh, disarankan untuk menggunakan tiang pengukuran meteorologis (nomor 6).



Gambar 51. Lokasi tiang pengukuran meteorologis yang direkomendasikan.

- **Penggunaan lahan dan perizinan:** Seperti disebutkan dalam Subbagian 2.2.5, PLTB direncanakan kira-kira 50/50 di antara Kawasan Hutan (Kawasan Hutan Produksi dan Kawasan Hutan Produksi Terbatas) dan Kawasan Pertanian Lahan Kering. Untuk area pertama, pengembang ke depannya wajib mendapatkan persetujuan dan izin khusus dari pihak berwenang; sedangkan untuk area berikutnya, kesepakatan perlu dicapai dengan pemilik lahan untuk memperoleh atau menyewakan tanah. Mempertimbangkan tindakan yang diperlukan ini, penting juga bagi pengembang untuk menilai penggunaan / kepemilikan lahan secara lebih rinci sejak awal dalam proses pengembangan. Pengembang disarankan untuk terlebih dahulu berkonsultasi dengan pihak berwenang tentang kesiadaan 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 Dumai adalah yang paling cocok sebagai titik awal untuk transportasi melalui darat. Untuk memastikan bahwa pelabuhan di Dumai cocok untuk membongkar dan menyimpan komponen turbin angin, penilaian yang lebih luas perlu dilakukan di pelabuhan yang dapat memerlukan konsultasi dengan pemilik pelabuhan. Selain itu, sebagian besar jalan menuju lokasi dalam kondisi baik dan digunakan sehari-hari dengan lalu lintas yang padat.



Diharapkan untuk sebagian besar jalan raya dari Dumai ke Kota Pinang akan dibangun dalam waktu dekat (pada tahun-tahun mendatang). Namun, perencanaan yang tepat belum tersedia, sehingga memerlukan penyelidikan lebih lanjut pada tahap berikutnya. Selain itu, perlu dilakukan pemeriksaan apakah penggunaan jembatan lama yang dikombinasikan dengan jalan berkelok-kelok yang ada di dekatnya di atas Aek Sihapas secara teknis layak (~1,5 km di barat laut Bandara Aek Godang). 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 tersebut 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 daerah padat penduduk, akan ada dampak visual pada area tersebut karena penggunaan turbin angin dengan ketinggian ujung 200 m. Kehadiran PLTB ini dapat menimbulkan tentangan dari pemangku kepentingan lokal dan kelompok lingkungan pada 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. Selain itu, PLTB yang dibayangkan terletak 3-5 km dari Bandara Aek Godang. Mengingat kedekatan ini, pemeriksaan menyeluruh dengan otoritas bandara akan diperlukan apakah navigasi penerbangan di bandara dapat terganggu oleh keberadaan PLTB yang dibayangkan.
- **Flora dan fauna:** Meskipun tidak ada spesies yang terancam yang diamati di hutan, pembangunan masih akan berpengaruh pada keanekaragaman hayati. Selain itu, pendanaan internasional untuk pembangunan di dalam hutan 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:** Ladang angin dirancang untuk dihubungkan ke jaringan PLN. Hal ini mengasumsikan bahwa jaringan dapat mengintegrasikan 312 MW energi angin (dengan keluaran yang bersifat variabel), dan gardu induk di Padang Sidempuan cocok untuk memfasilitasi koneksi jaringan PLTB. Asumsi ini 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.