

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Kegiatan pertambangan batubara merupakan salah satu sektor strategis dalam pembangunan ekonomi nasional, namun aktivitas ini juga menjadi pemicu utama terjadinya perubahan penggunaan dan tutupan lahan yang drastis. Proses pembukaan lahan, penggalian, penimbunan material, serta pembangunan infrastruktur penunjang secara langsung mengubah karakteristik ruang, baik dari sisi biofisik maupun fungsi pemanfaatannya. Sejumlah penelitian terbaru menunjukkan bahwa kawasan pertambangan aktif mengalami dinamika perubahan lahan yang kompleks dan berlangsung secara cepat, sehingga memerlukan pemantauan dan evaluasi spasial yang berkelanjutan untuk memitigasi risiko kerusakan lingkungan yang permanen (Yu et al., 2024; Hardy et al., 2024).

Wilayah pertambangan yang masih berada pada fase produksi memiliki posisi yang krusial dalam siklus pemanfaatan ruang. Di satu sisi, aktivitas penambangan yang berlangsung terus mendorong perubahan penggunaan dan tutupan lahan, namun di sisi lain kebutuhan untuk menyiapkan arah pemanfaatan ruang setelah kegiatan tambang berakhir menjadi semakin mendesak. Tanpa perencanaan dan pengelolaan yang tepat sejak masa operasi tambang, lahan bekas tambang berpotensi ditinggalkan dalam kondisi tidak produktif, terdegradasi, serta menimbulkan dampak lingkungan lanjutan seperti erosi, penurunan kualitas tanah, dan gangguan ekosistem (Hamida et al., 2024; Qi et al., 2025). Oleh karena itu, integrasi perencanaan pascatambang harus dilakukan secara simultan dengan operasional tambang agar tercipta transisi fungsi lahan yang berkelanjutan.

Dalam konteks tersebut, karakteristik wilayah penelitian sebagai pulau kecil menjadi faktor fundamental yang menentukan kompleksitas permasalahan. Pulau kecil memiliki keterbatasan ruang, sumber daya, serta daya dukung lingkungan yang relatif rendah, sehingga lebih rentan terhadap tekanan aktivitas antropogenik. Eksploitasi sumber daya pada pulau kecil tidak hanya berdampak pada perubahan tutupan lahan secara visual, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap keberlanjutan ekosistem sensitif dan kehidupan masyarakat yang memiliki ketergantungan tinggi pada sumber daya lokal (To'at et al., 2024; Carona, 2025). Gangguan pada satu titik di pulau kecil dapat memberikan dampak sistemik terhadap keseimbangan hidrologi dan ruang hidup wilayah pesisir (David et al., 2021).

Kejadian nyata di lapangan, khususnya pada area operasional PT. Garda Tujuh Buana di Pulau Bunyu, menunjukkan transformasi lanskap yang masif dari vegetasi rapat menjadi area terbuka dan lubang tambang atau *void*. *Void* sendiri merupakan danau pascatambang yang terbentuk dari lubang bekas galian yang tidak diurug kembali, yang keberadaannya secara signifikan mengubah sistem hidrologi lokal. Fenomena ini bukan sekadar perubahan visual, melainkan menciptakan tumpang tindih fungsi ekologi dan sosial yang kompleks. Permasalahan semakin meruncing dengan adanya ketidaksesuaian antara batas administratif perizinan (IUP) dan realitas pemanfaatan ruang di lapangan, yang berpotensi memicu konflik kepentingan antara perusahaan, pemerintah, dan masyarakat setempat (Rahmawati & Alhaqi, 2025).

Berdasarkan dinamika tersebut, diperlukan sebuah terobosan berupa model perencanaan yang tidak hanya fokus pada teknis-reklamasi, tetapi integratif terhadap kebutuhan ruang masa depan dengan pendekatan spasial yang presisi. Penggunaan algoritma *Random Forest* dalam analisis citra satelit multitemporal menjadi solusi

untuk memetakan pola perubahan LULC (*Land Use Land Cover*) secara objektif dan efisien. Penelitian ini diarahkan untuk merumuskan strategi pemanfaatan lahan pascatambang yang mengedepankan prinsip *sequencing*—yaitu pemulihan stabilitas ekologis sebagai fondasi utama sebelum lahan dialihfungsikan menjadi kawasan produktif. Melalui integrasi analisis biofisik, kebijakan tata ruang (RTRW), dan kondisi sosial-ekonomi, diharapkan tercipta arahan pemanfaatan ruang yang adaptif bagi masyarakat Pulau Bunyu di masa mendatang

1.2 Landasan Teori

1.2.1 Kegiatan Pertambangan dan Karakteristik Perubahan Ruang

Kegiatan pertambangan merupakan aktivitas ekstraktif yang secara inheren menimbulkan perubahan signifikan terhadap struktur dan fungsi ruang. Pada pertambangan batubara terbuka, perubahan ruang terjadi secara masif sejak tahap pembukaan lahan, pengupasan tanah penutup, hingga pembangunan fasilitas penunjang seperti jalan tambang, *stockpile*, dan area operasional (Kartika *et al.*, 2024). Transformasi ini menciptakan pola spasial baru yang menggantikan ekosistem alami dengan bentang alam buatan manusia yang sangat dinamis.

Sejumlah penelitian terkini menunjukkan bahwa karakteristik perubahan ruang pada kawasan pertambangan aktif tidak hanya ditandai oleh perubahan tutupan lahan secara fisik, tetapi juga oleh perubahan fungsi ruang akibat intensitas aktivitas antropogenik. Perubahan ini memengaruhi pola penggunaan lahan di sekitarnya dan berpotensi menimbulkan tekanan lingkungan sistemik apabila tidak dikelola dengan pendekatan yang tepat (Kaswanto *et al.*, 2021). Intensitas pembukaan lahan yang cepat seringkali melampaui kemampuan regenerasi alami lingkungan, sehingga pemantauan berkelanjutan menjadi mutlak diperlukan (Pratama *et al.*, 2025).

Dalam konteks perencanaan pascatambang, karakteristik perubahan ruang selama masa operasi tambang perlu dipahami sejak dini agar arah pemanfaatan ruang setelah kegiatan berakhir dapat disusun secara realistis dan berbasis kondisi aktual (Buana, 2020). Kajian perubahan ruang tidak hanya berfungsi sebagai evaluasi dampak teknis, tetapi juga sebagai dasar dalam merumuskan strategi pemanfaatan lahan yang berkelanjutan. Dengan memetakan perubahan ruang secara kronologis, perencana dapat mengidentifikasi area yang membutuhkan pemulihan intensif dibandingkan area yang memiliki potensi pengembangan produktif lebih cepat.

1.2.2 Karakteristik Pertambangan pada Pulau Kecil dan Pulau Besar

Karakteristik dampak pertambangan sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis wilayah, khususnya perbedaan mendasar antara pulau kecil dan pulau besar. Pada pulau besar, ketersediaan ruang yang luas serta kapasitas lingkungan yang lebih tinggi memungkinkan distribusi dampak yang lebih tersebar, sehingga tekanan terhadap ekosistem relatif lebih terdispersi. Sebaliknya, pada pulau kecil, keterbatasan ruang dan tingginya keterkaitan antar komponen ekosistem menyebabkan dampak pertambangan menjadi lebih terakumulasi dan bersifat fatal bagi keseimbangan alam.

Eksplorasi pertambangan pada pulau kecil dapat menyebabkan perubahan signifikan terhadap struktur ruang dan fungsi ekosistem,

termasuk degradasi lahan yang sulit dipulihkan, gangguan sistem hidrologi, serta tekanan terhadap ekosistem pesisir (To'at et al., 2024). Karena luasan daratannya yang terbatas, setiap perubahan pada penggunaan lahan akan berdampak langsung pada ketersediaan sumber daya air tawar dan stabilitas garis pantai. Keterbatasan ruang ini juga menyebabkan sulitnya redistribusi fungsi lahan, sehingga dampak yang ditimbulkan cenderung bersifat lebih permanen jika tidak dikelola dengan sangat hati-hati (Carona, 2025).

Dari sisi sosial, aktivitas pertambangan pada wilayah kepulauan seringkali memicu konflik kepentingan dan ketimpangan distribusi manfaat akibat tingginya ketergantungan masyarakat lokal terhadap sumber daya alam (Allen, 2017; Rahmawati & Alhaqi, 2025). Masyarakat di pulau kecil memiliki ruang gerak yang terbatas, sehingga hilangnya akses lahan akibat tambang dapat mengancam kedaulatan pangan dan ekonomi lokal. Oleh karena itu, pengelolaan pertambangan pada pulau kecil memerlukan pendekatan yang lebih komprehensif dengan mengintegrasikan aspek perlindungan lingkungan, keadilan sosial, dan tata kelola yang adaptif terhadap karakteristik wilayah pesisir.

1.2.3 Kondisi Lahan: Transformasi dan Keberadaan *Void*

Kondisi lahan sebelum kegiatan pertambangan umumnya didominasi oleh tutupan vegetasi alami atau penggunaan lahan produktif masyarakat. Tahap awal pertambangan ditandai dengan transformasi ruang melalui pembukaan lahan yang menyebabkan hilangnya biomasa secara total serta perubahan sifat fisik dan kimia tanah. Perubahan ini menjadi indikator awal terjadinya degradasi lingkungan yang memerlukan perhatian serius sejak fase konstruksi (Yudhiman et al., 2023; Hamida et al., 2024).

Selama masa operasi tambang, kondisi lahan mengalami dinamika kompleks yang ditandai dengan munculnya bentang alam baru berupa lubang bekas galian yang tidak diurug kembali atau disebut sebagai *void*. *Void* didefinisikan sebagai danau pascatambang (*pit lake*) yang terbentuk dari sisa aktivitas penambangan yang mengubah sistem hidrologi lokal secara permanen. Studi terbaru menunjukkan bahwa pola pembentukan *void* dan area terbuka ini dapat diidentifikasi secara efektif melalui analisis citra satelit multitemporal, yang memberikan data kuantitatif mengenai fluktuasi perubahan lahan dari waktu ke waktu (Romańczukiewicz & Górniak-Zimroz, 2025).

Pada periode transisi menuju berakhirnya kegiatan tambang, lahan berpotensi menjadi "lahan tidur" yang terdegradasi apabila tidak segera direncanakan arah pemanfaatannya (Arafah et al., 2025). Keberadaan *void* yang luas di satu sisi menjadi ancaman kualitas air, namun di sisi lain memiliki potensi pemanfaatan jika dikelola dengan teknik reklamasi yang tepat. Pemahaman mendalam mengenai siklus lahan—sebelum, selama, dan setelah tambang—menjadi landasan krusial untuk menentukan apakah lahan tersebut akan dikembalikan ke fungsi hutan (reforestasi) atau dialihkan ke fungsi produktif lain sesuai daya dukung lahan (Pacheco et al., 2025).

1.2.4 Konsep *Land Use Land Cover* (LULC) dan Algoritma *Random Forest*

Land Use Land Cover (LULC) merupakan dua konsep fundamental untuk memahami dinamika permukaan bumi. Tutupan lahan

menggambarkan kondisi biofisik yang dapat diamati langsung, seperti vegetasi dan badan air, sedangkan penggunaan lahan mencerminkan aktivitas manusia di atasnya (Pacheco et al., 2025). Dalam kajian pertambangan, analisis LULC digunakan untuk mengukur sejauh mana aktivitas ekstraktif telah menggeser fungsi-fungsi alami menjadi kawasan industri tambang (Wang et al., 2023).

Untuk mendapatkan akurasi yang tinggi dalam klasifikasi LULC di wilayah tambang, pendekatan penginderaan jauh modern kini menggunakan algoritma *Random Forest*. *Random Forest* dipilih karena kemampuannya dalam menangani data spasial yang kompleks dan non-linear, serta ketahanannya terhadap *noise* pada citra satelit. Algoritma ini bekerja dengan membangun sekumpulan pohon keputusan (*decision trees*) untuk menghasilkan prediksi yang lebih stabil dan akurat, terutama dalam membedakan kelas lahan yang memiliki kemiripan spektral seperti lahan terbuka tambang dan pemukiman (Ghimire et al., 2012; Yu et al., 2024).

Analisis LULC secara multitemporal dengan bantuan *Random Forest* memungkinkan identifikasi pola dan kecenderungan perubahan ruang secara presisi. Informasi spasial yang dihasilkan bukan sekadar angka akurasi, melainkan gambaran mengenai efektivitas reklamasi dan kepatuhan perusahaan terhadap rencana tata ruang. Hasil klasifikasi ini menjadi dasar penting bagi pengambil kebijakan untuk merumuskan alternatif pemanfaatan lahan pascatambang yang berbasis data ilmiah dan objektif (Tunio et al., 2025).

1.2.5 Pendekatan Spasial dan Sistem Informasi Geografis (SIG)

Pendekatan spasial berbasis penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan metode paling efektif dalam memantau wilayah pertambangan yang luas dan sulit dijangkau (Putra P., 2024). Penginderaan jauh menyediakan data historis yang memungkinkan kita melihat kembali kondisi lahan sebelum tambang ada hingga saat ini. Integrasi data citra satelit ke dalam SIG memungkinkan analisis tumpang tindih (*overlay*) antara realitas lapangan dengan batas izin administrasi (IUP).

Integrasi penginderaan jauh dengan SIG memfasilitasi analisis spasial yang komprehensif, mulai dari pemetaan kondisi eksisting hingga pemodelan prediksi masa depan. Dalam pengelolaan ruang pertambangan, pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian lahan terhadap rencana tata ruang wilayah (RTRW). Dengan SIG, perencana dapat menentukan zonasi pemanfaatan ruang yang optimal berdasarkan variabel fisik lahan seperti kelerengan, jenis tanah, dan kedekatan dengan pemukiman (Tunio et al., 2025).

Dalam konteks menuju pascatambang, pendekatan spasial berperan sebagai instrumen pengambilan keputusan yang transparan. Analisis spasial tidak hanya memberikan data visual, tetapi juga mendukung analisis kuantitatif mengenai luasan dampak yang harus direhabilitasi. Strategi yang dirumuskan melalui SIG memastikan bahwa perencanaan pemanfaatan ruang tidak hanya berbasis kebijakan normatif, tetapi juga mempertimbangkan potensi biofisik lahan secara nyata (Worden et al., 2024).

1.2.6 Konsep *Post-Mining* dan Strategi Berkelanjutan

Lahan pascatambang didefinisikan sebagai area yang telah selesai ditambang dan berada pada fase penutupan atau transisi fungsi (Nisa et al., 2024). Konsep *post-mining* modern menekankan bahwa tambang tidak boleh meninggalkan warisan kerusakan (*legacy issues*). Oleh karena itu, perencanaan harus memastikan lahan kembali produktif dan aman bagi lingkungan serta sosial di sekitarnya (Syafaat et al., 2025). Tanpa perencanaan transisi, lahan tersebut akan menjadi beban lingkungan yang berkepanjangan bagi pulau kecil.

Strategi pemanfaatan lahan pascatambang yang berkelanjutan harus mengintegrasikan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi secara seimbang. Penelitian di berbagai negara menunjukkan bahwa penggunaan analisis kesesuaian lahan dan jasa ekosistem sangat efektif dalam merancang zonasi reklamasi yang "hijau" (Wang et al., 2017; Yu et al., 2024). Di Indonesia, pelibatan pemerintah daerah dan masyarakat lokal dalam menentukan fungsi akhir lahan—apakah untuk kehutanan, pertanian, atau wisata—menjadi kunci keberhasilan pascatambang (Thalib et al., 2020).

Keberhasilan strategi pascatambang di Kalimantan Timur dan wilayah lain menunjukkan bahwa pendekatan vegetatif seperti reforestasi dan agroforestry efektif memulihkan produktivitas lahan eks-tambang (Pernandes et al., 2023; Hamida et al., 2024). Strategi ini sangat relevan untuk Pulau Bunyu, yang memerlukan model perencanaan integratif-sequencing. Artinya, pemulihan fungsi ekologis pulau kecil harus menjadi prioritas utama (tahap awal) sebelum lahan dapat dikompromikan untuk fungsi ekonomi produktif (tahap lanjutan) guna menjamin keberlanjutan ruang hidup masyarakat (Lee et al., 2025; Worden et al., 2024).

1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perubahan kondisi lahan selama proses penambangan dan potensi lahan pasca tambang pada PT. Garda Tujuh Buana?
2. Strategi pemanfaatan seperti apa yang dapat dikembangkan untuk lahan pasca tambang batubara di wilayah PT. Garda Tujuh Buana di Pulau Bunyu?

1.4 Tujuan Penelitian

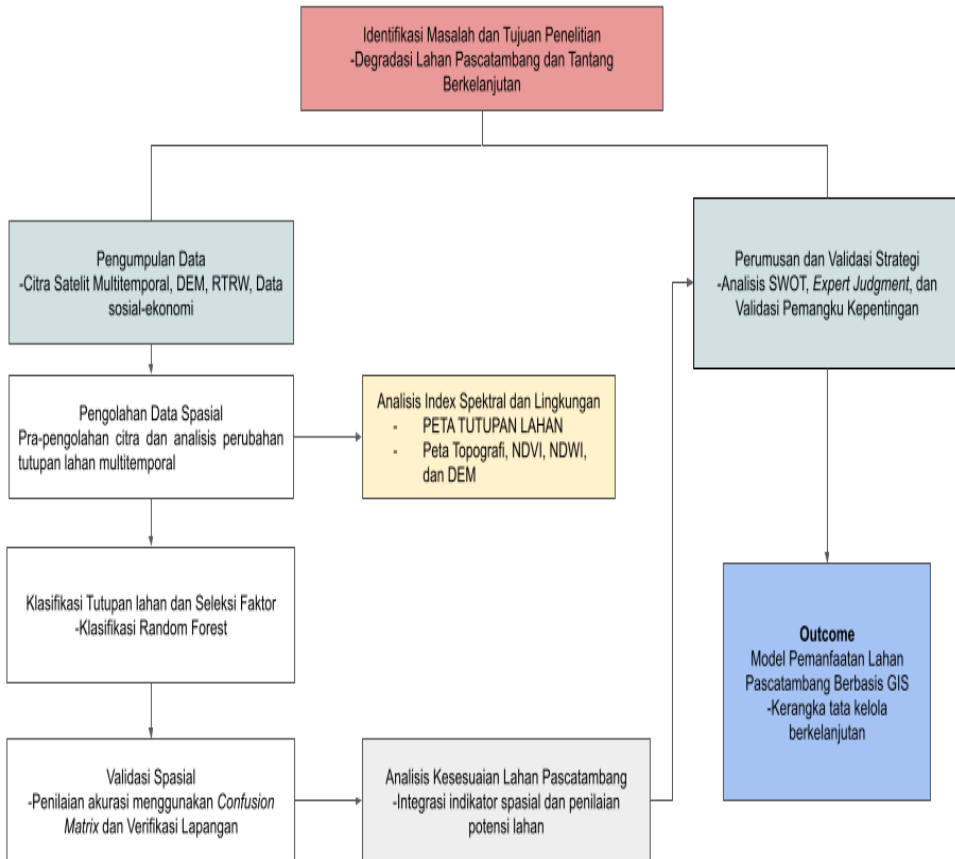
1. Mengetahui perubahan kondisi lahan selama proses penambangan dan potensi lahan pasca tambang di PT. Garda Tujuh Buana.
2. Mengembangkan strategi pemanfaatan lahan pasca tambang batubara di wilayah PT. Garda Tujuh Buana

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai potensi lahan pasca tambang di wilayah PT. Garda Tujuh Buana, melalui analisis berbasis pendekatan spasial, yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan dan pengelolaan ruang yang berkelanjutan. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan signifikan bagi pengembangan teori dan praktik dalam bidang perencanaan tata ruang dan pengelolaan lahan pasca tambang, serta memberikan solusi bagi tantangan yang dihadapi oleh kawasan pasca tambang di Indonesia.

1.6 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual merupakan suatu rancangan yang menggambarkan keterkaitan antar konsep yang dijadikan dasar dalam proses pengukuran atau pengamatan dalam suatu penelitian. Kerangka ini bertujuan untuk memperlihatkan secara jelas hubungan antar variabel yang menjadi fokus kajian (Notoatmodjo, 2018).



Gambar 1. Kerangka Penelitian

1.7 Daftar Pustaka

- Allen, M. G. (2017). Islands, extraction and violence: Mining and the politics of scale in the Melanesian Islands. *Political Geography*, 57, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2016.12.002>
- Arafah, W., Ismelina, M., Tawakal, A., & Yasin, A. M. (2025). *Dilema batu bara: (Regulasi, dampak lingkungan dan transisi energi di Indonesia)*. Penerbit Berseri.
- Buana, D. N. (2020). *Perencanaan lanskap pada area pasca tambang untuk pengembangan agro eduwisata di Kabupaten Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara* [Disertasi Doktor, Universitas Hasanuddin]. Repositori Unhas.
- Carona, N. (2025). Penegakan hukum untuk perlindungan pulau-pulau kecil dari eksploitasi pertambangan. *KnE Social Sciences*, 10(27). <https://doi.org/10.18502/kss.v10i27.18241>
- Custodio, E., del Carmen Cabrera, M., Poncela, R., Puga, L. O., Skupien, E., & Del Villar, A. (2016). Intensive groundwater exploitation and mining in Canary Islands. *Science of the Total Environment*, 557-558, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.038>
- David, C. G., Hennig, A., Ratter, B. M., Roeber, V., Zahid, & Schlurmann, T. (2021). Considering the social-political framework when analyzing climate change impacts in coastal areas. *Nature Communications*, 12(1), 5882. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26012-7>
- Ernst, W. H. O. (2024). Vegetation of mining areas in Europe. Dalam *Heavy metal tolerance in plants* (hlm. 21–38). CRC Press.
- Hamida, I., Nippa, D. R., & Nurfariza, H. (2024). Pendekatan vegetatif dalam konservasi lahan eks-tambang untuk penataan lansekap perencanaan kota baru dan permukiman sekitar tambang di Kalimantan Timur. *Jurnal Arsitekta*, 6(2), 72–78. <https://doi.org/10.47760/arsitekta.v6i2.1120>
- Kartika, I. G. A. P., M., S. H., & Winarsih, S. (2024). *Dinamika hukum dan kebijakan publik pertambangan dalam konteks lingkungan berkelanjutan*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Kaswanto, R. L., Aurora, R. M., Yusri, D., & Sjaf, S. (2021). Analisis faktor pendorong perubahan tutupan lahan selama satu dekade di Kabupaten Labuhanbatu Utara. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(1), 107–116. <https://doi.org/10.14710/jil.19.1.107-116>
- Lee, D. H., Kim, H., & Kim, S. M. (2025). Assessment of post-mining utilization potential using GIS and AHP: A comparative study of the United States and South Korea. *Applied Sciences*, 15(23), 12652. <https://doi.org/10.3390/app152312652>
- Nisa, Y. O. K., & Fadilah, K. (2024). Rencana reklamasi lahan bekas tambang tanah urug di Kabupaten Probolinggo. *Iri*, 4(2), 26–31.
- Pacheco, A. D. P., Nascimento, J. A. S. D., Ruiz-Armenteros, A. M., da Silva Junior, U. J., Junior, J. A. D. S., de Oliveira, L. M. M., ... & Pessoa Mello Galdino, C. A. (2025). Land cover transformation in areas affected by mining using PlanetScope imagery, spectral indices, and machine learning: A case study in the Pernambuco hinterland, Brazil. *Land*, 14(2), 325. <https://doi.org/10.3390/land14020325>
- Pernandes, D., Nazori, M., & Prasaja, A. S. (2023). Pemanfaatan lahan bekas pertambangan emas tanpa izin (PETI) di Desa Temenggung Kecamatan Limun Kabupaten Sarolangun. *Nian Tana Sikka: Jurnal Ilmiah Mahasiswa*, 1(6), 10–27.

- Pratama, F. W. N., Annisadina, T., & Fernanda, B. (2025). Peninjauan perencanaan tata ruang dan tata kelola pemerintahan dalam pengembangan kota tambang: Studi kasus Kabupaten Musi Banyuasin. *Tunas Agraria*, 8(1), 54–75. <https://doi.org/10.31292/ta.v8i1.295>
- Putra, P. (2024). Prediksi perubahan area pertambangan batubara di Kabupaten Muara Enim dan sekitarnya menggunakan Cellular Automata. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 2(2), 52–56.
- Rahmawati, C. T., & Alhaqi, R. A. H. (2025). Dampak eksploitasi pertambangan terhadap interaksi masyarakat. *Interaksi: Jurnal Sosial dan Lingkungan*, 2(2).
- Romańczukiewicz, K., & Górnaiak-Zimroz, J. (2025). Long-term analysis of land cover changes caused by mining activities: Strzelin (Southwestern Poland) case study. *Scientific Reports*, 15(1), 29980. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51025-x>
- Saini, V. (2024). Monitoring post-mining reclamation success in Jharia coalfield using geospatial technology. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 52, 1245–1257. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01877-3>
- Syafaat, I. H., Xavire, B. H., Tamadinta, B. A., Prastiyo, B., Sugianti, R. P., & Rahmawati, L. A. (2025). Analisis efektivitas program rehabilitasi lingkungan dalam pemulihan ekosistem di kawasan pascatambang PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim. *Botani: Publikasi Ilmu Tanaman dan Agribisnis*, 2(3), 35–51.
- Thalib, P., Kurniawan, F., Aliansa, W., & Maulani, A. F. (2020). Post-mining reclamation as an environmental policy: A gold mining case study. *Halu Oleo Law Review*, 4(2), 208–218. <http://dx.doi.org/10.33561/holrev.v4i2.14555>
- To'at, M., Karinda, K., & Agustang, A. T. P. (2024). Eksploitasi pertambangan dan eksistensi pulau-pulau kecil: Studi kasus Kabupaten Kepulauan Konawe. *Indonesian Annual Conference Series*, 179–189.
- Tunio, I. A., Memon, S. A., Abbasi, H., Abro, A. A., Kumar, L., Tunio, M. A., ... & Kumar, J. (2025). Spatial and temporal assessment of land use and land cover change detection and normalized difference vegetation index in desert area. *Rangeland Ecology & Management*, 101, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.11.005>
- Wang, S., Zhang, J., & Liu, P. (2023). Quality evaluation of land reclamation in mining area based on remote sensing and index system. *International Journal of Mining Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00601-9>
- Wang, Y., Sun, Y., Cao, X., Wang, Y., Zhang, W., & Cheng, X. (2023). A review of regional and global scale land use/land cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 206, 311–334. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.11.012>
- Worden, S., Svobodova, K., Côte, C., & Bolz, P. (2024). Regional post-mining land use assessment: An interdisciplinary and multi-stakeholder approach. *Resources Policy*, 89, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104680>
- Yu, H., Luo, C., & Ni, J. (2024). Identifying land reuse suitability and transformation strategies towards green development in a post-mining

area: A case of Qijiang, China. *Green Development*, 12(1), 45-58. (Sesuai penyesuaian draf).

Yudhiman, E., Susanto, A., & Corsita, L. (2023). Analisis risiko dampak pembukaan lahan pada kegiatan pertambangan emas PT Meares Soputan Mining. *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*, 7(1), 96–108. <https://doi.org/10.32522/ujht.v7i1.10058>

BAB II

ANALISIS PERUBAHAN KONDISI LAHAN SELAMA PROSES PENAMBANGAN

2.1 Abstrak

Kegiatan pertambangan batubara yang masih aktif berpotensi menimbulkan perubahan signifikan terhadap kondisi penggunaan dan tutupan lahan. Perubahan tersebut berlangsung secara dinamis seiring dengan tahapan operasional penambangan dan berdampak pada kondisi biofisikserta fungsi ruang wilayah. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika perubahan lahan selama proses penambangan menjadi penting sebagai dasar pengelolaan ruang dan perencanaan pemanfaatan lahan menuju pasca tambang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan penggunaan dan tutupan lahan (*Land Use Land Cover*) pada kawasan pertambangan batubara di PT. Garda Tujuh Buana, Kabupaten Bulungan, Kalimantan Utara dengan menggunakan pendekatan spasial. Analisis dilakukan menggunakan citra satelit multitemporal Landsat dan Sentinel yang diolah melalui metode klasifikasi berbasis *Random Forest*, dengan dukungan pendekatan *Object-Based Image Analysis* (OBIA) untuk meningkatkan kemampuan pemisahan kelas pada area dengan kompleksitas spektral yang tinggi. Hasil klasifikasi kemudian divalidasi menggunakan nilai *overall accuracy* dan *kappa coefficient* untuk menilai tingkat ketelitian peta penggunaan dan tutupan lahan. Selain itu, analisis indeks spektral berupa NDVI, NDWI, dan BSI digunakan untuk menggambarkan kondisi biofisik lahan, yang dievaluasi berdasarkan nilai ekstraksi pada titik *ground truth*. Hasil penelitian menunjukkan adanya perubahan penggunaan dan tutupan lahan yang signifikan selama proses penambangan, yang ditandai dengan peningkatan luasan lahan terbuka dan perubahan distribusi tutupan vegetasi. Analisis indeks spektral menunjukkan perbedaan karakteristik biofisik pada masing-masing kelas penggunaan lahan, sehingga mampu memperkuat interpretasi hasil klasifikasi LULC. Temuan ini memberikan gambaran kondisi eksisting dan kecenderungan perubahan lahan pada kawasan pertambangan aktif. Pendekatan spasial berbasis citra satelit multitemporal dan metode *random forest* efektif digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisis perubahan kondisi lahan selama proses penambangan. Hasil analisis perubahan lahan ini menjadi dasar penting dalam mendukung perencanaan dan perumusan strategi pemanfaatan ruang menuju pasca tambang yang lebih terarah dan berkelanjutan.

Kata Kunci : LULC, *random forest*, *post-mining*, GIS.

2.2 Pendahuluan Khusus

Identifikasi perubahan kondisi lahan pada kawasan pertambangan aktif tidak hanya bergantung pada ketersediaan data spasial, tetapi juga pada kemampuan metode analisis dalam membedakan kelas lahan yang memiliki karakteristik spektral yang serupa. Pertambangan terbuka menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan dan kompleks, mencakup perubahan lanskap alam, kerusakan

habitat flora dan fauna, modifikasi struktur dan komposisi tanah, serta pergeseran pola hidrologi permukaan maupun air tanah (Kurniawan, 2025). Kompleksitas bentang alam ini berpotensi meningkatkan kesalahan klasifikasi apabila hanya mengandalkan pendekatan konvensional. Oleh karena itu, pemilihan metode klasifikasi yang tepat menjadi aspek krusial dalam analisis perubahan penggunaan dan tutupan lahan atau *Land Use Land Cover* (LULC) (Lamsal et al., 2022).

Perkembangan algoritma berbasis *machine learning* memberikan peningkatan signifikan dalam akurasi pemetaan LULC pada lanskap yang terfragmentasi. Algoritma *Random Forest* banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengolah data *multiband*, relatif tahan terhadap *noise*, serta menghasilkan akurasi yang stabil pada *dataset* heterogen—termasuk pada kawasan pertambangan terbuka yang memiliki variabilitas spektral tinggi (Khanyile, 2024; He et al., 2024; Qin et al., 2021; Waladi, 2025). Guna meningkatkan ketajaman diskriminasi kelas, metode ini diintegrasikan dengan pendekatan *Object-Based Image Analysis* (OBIA). Pendekatan OBIA bekerja dengan mengelompokkan piksel menjadi objek berdasarkan kesamaan spektral, tekstur, bentuk, dan konteks spasial, sehingga jauh lebih efektif dalam merepresentasikan kondisi fisik lahan yang sesungguhnya.

Selain klasifikasi tematik, analisis perubahan lahan memerlukan indikator kuantitatif yang mampu menggambarkan kondisi biofisik permukaan secara aktual. Indeks spektral seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), dan BSI (*Bare Soil Index*) dimanfaatkan secara spesifik untuk mengevaluasi tingkat kepadatan vegetasi, distribusi badan air (termasuk *void*), dan dominasi lahan terbuka (Husna et al., 2022). Integrasi antara klasifikasi LULC dengan indeks-indeks spektral ini memungkinkan interpretasi perubahan lahan yang lebih komprehensif, terukur, dan objektif (Eramudadi & Rokhmana, 2024).

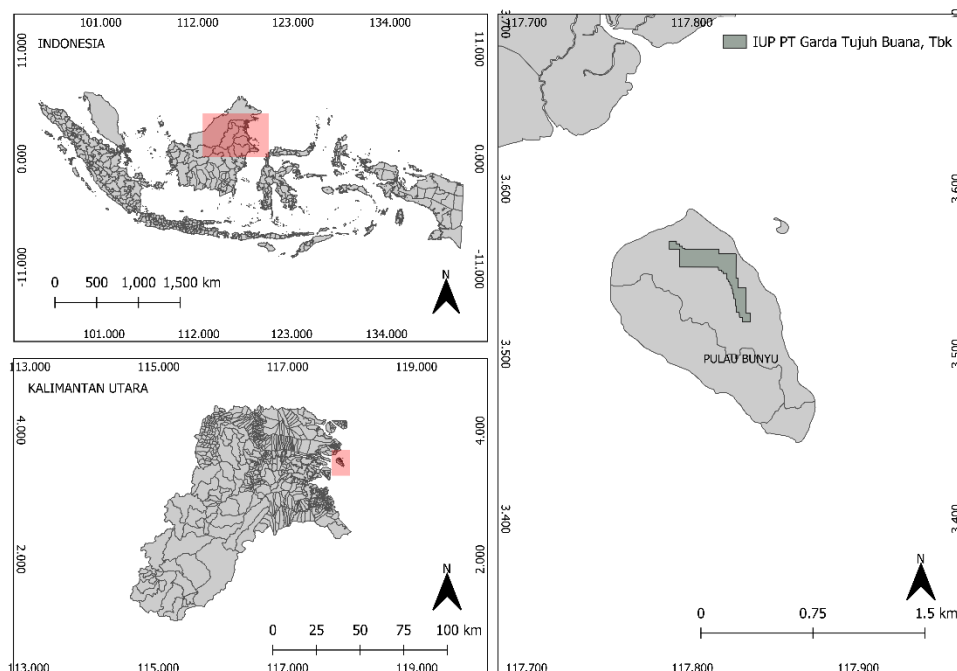
Berdasarkan dinamika tersebut, penelitian pada bab ini difokuskan pada penerapan klasifikasi *Random Forest* berbasis OBIA yang divalidasi menggunakan parameter statistik, serta didukung oleh analisis indeks spektral guna mengidentifikasi perubahan kondisi lahan selama proses penambangan berlangsung. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan representasi spasial yang konsisten antar periode pengamatan dan menyediakan *baseline data* yang kuat secara kuantitatif. Analisis perubahan kondisi spasial pada bab ini tidak sekadar ditujukan untuk mengevaluasi dampak operasional tambang, melainkan secara spesifik digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kesiapan dan stabilitas biofisik lahan. Data luasan dan sebaran spasial ini akan menjadi landasan utama sebagai variabel penentu dalam menyusun zonasi pemanfaatan dan pembobotan strategi pascatambang pada tahapan selanjutnya.

2.3 Metode Penelitian

Metode penelitian disusun untuk mengidentifikasi perubahan kondisi lahan pada kawasan pertambangan melalui pendekatan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. Penelitian dilakukan dengan memanfaatkan data citra satelit multitemporal, data pendukung spasial, serta data lapangan sebagai referensi klasifikasi dan validasi. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pra-pemrosesan citra, klasifikasi penggunaan dan tutupan lahan, analisis indeks spektral, analisis perubahan lahan, serta evaluasi akurasi hasil klasifikasi.

2.3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlangsung pada Maret-Oktober 2025. Lokasi penelitian berada pada kawasan pertambangan batubara PT. Garda Tujuh Buana yang terletak di Pulau Bunyu, Kabupaten Bulungan, Provinsi Kalimantan Utara. Area penelitian dibatasi berdasarkan batas resmi IUP perusahaan, sehingga analisis perubahan penggunaan dan tutupan lahan difokuskan pada area operasional pertambangan. Peta lokasi ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1. Peta lokasi penelitian di Pulau Bunyu, Kabupaten Bulungan, Provinsi Kalimantan Utara, area penelitian ditunjukkan pada gambar sebelah kiri blok hitam yang mempresentasikan wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana

2.3.2 Alat dan Bahan

2.3.1.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak pendukung analisis spasial serta peralatan survei lapangan. Rincian alat yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1. Alat yang digunakan dalam penelitian beserta kegunaannya

No	Alat	Kegunaan
1	<i>Global Positioning System</i>	Untuk penentuan koordinat titik <i>ground truth</i>
2	Software QGIS	Media pengolahan citra satelit
3	Microsoft Excel	Media pengolahan data lapangan
4	Alat dokumentasi Lapangan	
5	<i>Soil auger</i>	Media pengambilan sampel tanah
6	Kantong sampel dan label identifikasi	Media penyimpanan sampel tanah

2.3.1.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Citra Landsat dan Citra Sentinel-2A yang dimanfaatkan untuk analisis perubahan penggunaan dan penutupan lahan secara multitemporal. Citra Landsat diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS) dan digunakan untuk merepresentasikan kondisi lahan periode awal kegiatan pertambangan, sedangkan citra Sentinel-2A merupakan satelit penginderaan jauh yang dikembangkan oleh *European Space Agency* (ESA) melalui program Copernicus dengan resolusi spasial 10 meter digunakan untuk periode pengamatan terbaru dengan resolusi spasial yang lebih tinggi (Tabel 2. dan Tabel 3).

Tabel 2.2 Detail *spectral band* dari Citra Landsat (Landsat-5 TM & Landsat-7 ETM+)

<i>Bands</i>	<i>Sensor</i>	<i>Spatial Resolution</i>	<i>Wavelengths Tengah (μm)</i>
<i>Blue</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	0.485
<i>Green</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	0.560
<i>Red</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	0.660
<i>NIR</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	0.835
<i>SWIR 1</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	1.650
<i>Thermal</i>	L5 TM	120 m	11.450
<i>Thermal</i>	L7 ETM+	60 m	11.450
<i>SWIR 2</i>	L5 TM/ L7 ETM+	30 m	2.215

Tabel 2.3 Detail *spectral band* dari Citra Sentinel-2A yang digunakan

<i>Bands</i>	<i>Spatial Resolution</i>	<i>Wavelengths (μm)</i>
Band 2- <i>Blue</i>	10 m	0.490
Band 3- <i>Green</i>	10 m	0.560
Band 4- <i>Red</i>	10 m	0.665
Band 8 – <i>NIR</i>	10 m	0.842
Band 11-SWIR 1	20 m	1.610
Band 12-SWIR 2	20 m	2.190

2.4 Metode Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber. Data yang dikumpulkan terdiri atas data spasial dan non-spasial yang mendukung analisis perubahan penggunaan dan tutupan lahan selama proses penambangan. Jenis dan cara pengumpulan data dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Jenis Data dan Perolehan Data

Jenis Data	Perekaman	Sumber	Output
Citra Satelit Landsat 5 Akuisisi 1990 Akuisisi 1996 Citra Satelit Landsat 7 Akuisisi 2003	Komposit Tahunan Komposit Tahunan Komposit Tahunan	<i>Google Earth Engine</i> code.earthengine.com	Peta perubahan tutupan lahan dan kondisi vegetasi periode pra-tambang
Citra Satelit Sentinel-2 Akuisisi 2016 Akuisisi 2020 Akuisisi 2025	14 November 2016 22 Februari 2020 30 Juli 2025	<i>Google Earth Engine</i>	Peta perubahan tutupan lahan dan kondisi vegetasi periode pertambangan
Data Digital Elevation Model (DEM)		earthexplorer.usgs.gov , ArcGIS	Peta topografi & identifikasi area rawan erosi
Data Administrasi Wilayah (desa, kecamatan, kabupaten)		BIG (www.big.go.id), BPS, Pemda	Peta batas administratif untuk analisis spasial
Data Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) tahun 2017-2037		Dinas PUPR	Identifikasi kesesuaian hasil analisis dengan RTRW
Data Penutupan Lahan Eksisting & Vegetasi		Survei Lapangan	Peta potensi vegetasi dan tutupan lahan

Catatan : Informasi perekaman citra disajikan dalam bentuk periode waktu karena citra yang digunakan merupakan hasil komposit Multi-temporal yang diproses untuk meminimalkan pengaruh tutupan awan dan noise atmosfer. Berdasarkan periode perekaman, citra yang digunakan berasal dari waktu yang berbeda secara musiman, yaitu mencakup bulan basah dan bulan relatif kering. Perbedaan ini disebabkan oleh keterbatasan ketersediaan citra bebas awan pada masing-masing tahun pengamatan. Meskipun demikian, wilayah penelitian memiliki karakteristik iklim tropis basah dengan distribusi curah hujan yang relatif merata sepanjang tahun, sehingga variasi musiman tidak menunjukkan perbedaan yang ekstrem. Oleh karena itu, analisis tetap dapat merepresentasikan dinamika perubahan lahan dengan mempertimbangkan kemungkinan pengaruh kondisi musiman dalam interpretasi hasil.

2.4.1.1 Pengumpulan Data Citra Satelit

Pengumpulan data citra satelit dilakukan melalui *platform Google Earth Engine* (GEE) untuk menghasilkan citra tahunan yang telah diminimalkan pengaruh tutupan awan dan gangguan atmosfer (Putri & Sibarani, 2023). Citra Landsat dan Sentinel 2 diperoleh melalui *platform resmi United States Geological Survei* (USGS) (Karimi *et al.*, 2025) dan *Corpernicus Data Space Ecosystem*. Citra Landsat digunakan untuk merepresentasikan kondisi lahan periode pra-penambangan dan fase awal kegiatan penambangan pada tahun 1990, 1996, dan 2003. Sementara itu, citra Sentinel-2 digunakan untuk periode pertambangan dan kondisi terkini pada tahun 2016, 2020, dan 2025.

Pemanfaatan citra multitemporal bertujuan untuk menangkap dinamika perubahan penggunaan dan tutupan lahan dalam rentang waktu panjang. Citra Landsat memberikan kontinuitas historis untuk analisis perubahan jangka panjang, sedangkan Sentinel-2 digunakan

untuk meningkatkan ketelitian analisis spasial pada periode terbaru karena memiliki resolusi spasial yang tinggi (Fikri A., 2020 ;Rohman *et al.*, 2025).

2.4.1.2 Pengumpulan Data Spasial Pendukung

Data batas IUP, data administrasi wilayah, serta data RTRW dikumpulkan dari instansi dan sumber resmi untuk mendukung proses delimitasi wilayah analisis dan interpretasi hasil. Data *digital elevation model* (DEM) juga dikompilasi untuk memberikan informasi wilayah penelitian sebagai konteks tambahan dalam interpretasi perubahan lahan serta berfungsi meningkatkan akurasi klasifikasi pada wilayah dengan topografi kompleks (Sang *et al.*, 2021).

2.4.1.3 Pengumpulan Data Lapangan (*Ground Truth* dan Sampel Tanah)

Pengumpulan data lapangan dilakukan melalui kegiatan *ground truthing* pada titik-titik representatif yang mewakili kelas penggunaan dan tutupan lahan hasil interpretasi citra. Penentuan titik dilakukan menggunakan metode *stratified purposive sampling* untuk memastikan keterwakilan setiap kelas lahan utama serta efisiensi aksesibilitas (Dong *et al.*, 2020).

Data yang dikumpulkan meliputi koordinat geografis, kondisi biofisik lahan, dokumentasi visual, serta pengambilan sampel tanah pada tujuh titik lokasi yang mewakili variasi kondisi lahan. Sampel tanah dianalisis untuk mengetahui karakteristik fisik dan kimia tanah sebagai informasi pendukung dalam interpretasi kondisi lahan (Herman *et al.*, 2025). Seluruh data yang digunakan diperoleh pada tahap ini selanjutnya digunakan sebagai input utama dalam analisis perubahan kondisi lahan dan potensi pemanfaatan lahan pasca tambang pada tahap analisis teknis dan validasi.

2.4.1 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan penggunaan dan tutupan lahan pada wilayah penelitian menggunakan pendekatan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. Tahapan analisis meliputi pra-pemrosesan citra, klasifikasi tutupan lahan, uji akurasi, perhitungan indeks spektral, analisis perubahan temporal serta analisis kesesuaian spasial terhadap RTRW.

2.4.1.1 Pra-pemrosesan Citra dan Klasifikasi Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan untuk mengidentifikasi dinamika penggunaan lahan sebelum dan selama kegiatan pertambangan, serta pada fase transisi menuju pasca tambang berdasarkan kondisi faktual hingga tahun pengamatan. Analisis ini bertujuan untuk memahami pola perubahan tutupan lahan yang terjadi akibat aktivitas pertambangan sebagai dasar penilaian potensi pemanfaatan lahan pada fase transisi menuju pasca tambang yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan, sosial, dan ekonomi.

Data yang digunakan dalam analisis ini berasal dari citra satelit multitemporal yang mencakup citra Landsat untuk periode pra-produksi pada tahun 1990, 1996, dan 2003 serta citra Sentinel-2 tahun 2016, 2020, dan 2025. Penggunaan citra multitemporal memungkinkan analisis perubahan tutupan lahan lintas waktu, sedangkan pemanfaatan citra dengan resolusi spasial yang berbeda meningkatkan ketelitian identifikasi tutupan lahan, khususnya pada periode terkini berkat resolusi spasial yang lebih halus (Chen *et al.*, 2024). Pengolahan citra dilakukan menggunakan *platform google earth engine* (GEE) untuk ekstraksi data dan penyusunan komposit citra, kemudian analisis lanjutan serta penyajian peta dilakukan menggunakan QGIS.

2.4.1.2 OBIA (*object Based image analysis*) dan *Random Forest*

Penelitian ini menggunakan pendekatan *object-based image analysis* (OBIA) yang dikombinasikan dengan algoritma machine learning *random forest* (RF) untuk mengklasifikasikan tutupan lahan pada area bekas tambang. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengatasi kompleksitas karakteristik spasial dan spektral yang umumnya ditemukan pada lanskap pasca tambang, seperti variasi tingkat revegetasi, tanah terbuka, genangan air, dan material sisa tambang (He *et al.*, 2024; Qin *et al.*, 2021). Analisis data menggunakan QGIS.

Segmentasi merupakan tahap awal yang krusial dalam pendekatan *object-based image analysis* (OBIA), yang bertujuan untuk membagi citra menjadi objek-objek homogen berdasarkan kesamaan karakteristik spektral dan spasial. Proses ini memungkinkan analisis tidak hanya bergantung pada nilai piksel, tetapi juga mempertimbangkan atribut tambahan seperti bentuk, ukuran, tekstur, dan konteks spasial antar objek. Pendekatan berbasis objek ini terbukti mampu meningkatkan kemampuan diskriminasi kelas dibandingkan pendekatan berbasis piksel, khususnya pada lanskap kompleks (Qin *et al.*, 2021). Objek hasil segmentasi selanjutnya digunakan sebagai unit analisis dalam proses ekstraksi fitur dan klasifikasi.

Klasifikasi dilakukan menggunakan algoritma *machine learning random forest*, yang dibangun berdasarkan *training data* yang ditentukan dari hasil pengamatan lapangan (*ground truth*). Model ini bekerja dengan membangun sejumlah pohon keputusan dan menggabungkan hasil prediksinya untuk meningkatkan akurasi klasifikasi serta mengurangi risiko *overfitting*. Algoritma *random forest* juga dikenal memiliki performa yang stabil dalam menangani data multivariat dan heterogen, termasuk pada pemetaan lahan pertambangan dan pascatambang (Khanyile, 2024; He *et al.*, 2024). Data *training* pada citra menggunakan nilai *mean* dan standar deviasi pada band merah, hijau, biru, dan *Near-Infrared* (NIR), dengan masing-masing kelas terdiri atas 10 titik untuk klasifikasi dan 5 titik untuk uji akurasi. Analisis hasil klasifikasi dilakukan menggunakan metode

Overall Accuracy (OA) dan Kappa Index untuk menilai tingkat ketelitian hasil klasifikasi.

2.4.1.3 Perhitungan Indeks Spektral

Untuk memperkuat interpretasi hasil klasifikasi, dilakukan analisis indeks spektral yang mencerminkan karakteristik biofisik lahan. Indeks yang digunakan meliputi *normalized difference vegetation index* (NDVI) untuk mengidentifikasi tingkat kerapatan dan kesehatan vegetasi, *normalized difference water indeks* (NDWI) untuk mendeteksi keberadaan badan air dan area tergenang, serta *bare soil indeks* (BSI) untuk mengidentifikasi area lahan terbuka atau tanah yang terpapar aktivitas pertambangan. Kombinasi indeks vegetasi dan tanah (BSI) terbukti lebih akurat dalam mendeteksi degradasi lahan dibandingkan penggunaan indeks tunggal (Ebrahimi *et al.*, 2023). Analisis indeks spektral ini digunakan untuk mendukung penentuan kelas tutupan lahan serta memahami dinamika perubahan kondisi secara kuantitatif. Rincian indeks spektral yang digunakan beserta formula perhitungannya disajikan pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Indeks Land Use Land Cover yang digunakan

INDEX	Formula	Reference
Indeks Vegetasi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{(\rho NIR - \rho red)}{(\rho NIR + \rho red)}$	Halder <i>et al.</i> , (2024)
Indeks Air NDWI (Normalized Difference Water)	$NDWI = \frac{(\rho green - \rho NIR)}{(\rho green + \rho NIR)}$	Sankaran <i>et al.</i> , (2023)
Bare Soil Indeks (BSI)	$BSI = \frac{(SWIR\ 1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$	Mzid <i>et al.</i> , (2021)

Selanjutnya, hasil klasifikasi tutupan lahan dan indeks spektral dianalisis secara temporal untuk menilai perubahan luasan masing-masing kelas tutupan lahan pada setiap fase operasional pertambangan. Analisis perubahan luasan dilakukan untuk mengidentifikasi kecenderungan degradasi lahan, proses pemulihan vegetasi, dan perkembangan area reklamasi sebagai indikator potensi lahan pasca tambang.

2.4.1.4 Analisis Perubahan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan secara temporal dengan membandingkan hasil klasifikasi pada setiap tahun pengamatan. Pemilihan tahun analisis didasarkan pada dinamika operasional kegiatan pertambangan PT. Garda Tujuh Buana yang dibagi ke dalam beberapa fase operasional, yaitu fase pra produksi pada tahun 1990, 1996, awal produksi 2003, pemberhentian sementara pada tahun 2016, dan produksi aktif di tahun 2020 dan 2025. Pembagian fase operasional ini digunakan untuk memastikan bahwa perubahan tutupan lahan yang dianalisis merepresentasikan kondisi aktual pada setiap tahapan kegiatan pertambangan. Rincian dinamika operasional PT. Garda Tujuh Buana disajikan pada Tabel 2.6

Tabel 2.6 Dinamika Operasional PT. Garda Tujuh Buana berdasarkan Tahun

Tahun	Operasional
1990, 1996, dan 2003	Pra-produksi
2016	Pemberhentian sementara
2020 dan 2025	Produksi

Tahapan analisis meliputi perhitungan luas tiap kelas tutupan lahan, perbandingan antar tahun pengamatan dan penyajian dalam bentuk peta. Analisis ini digunakan untuk menggambarkan dinamika perubahan kondisi lahan selama tahapan operasional pertambangan.

2.4.1.5 Analisis Kesesuaian Pemanfaatan Ruang

Analisis kesamaan pemanfaatan ruang dilakukan dengan metode *overlay* antara peta tutupan lahan hasil klasifikasi dengan peta rencana tata ruang wilayah (RTRW) Kabupaten Bulungan. Pendekatan evaluasi kesesuaian berbasis *time series* GIS ini digunakan untuk memetakan konsistensi pemanfaatan ruang secara spasial (Suprojo & Muhammad, 2024). *Overlay* ini digunakan bukan untuk menyeragamkan kelas tutupan lahan dengan kelas RTRW, melainkan untuk mengevaluasi kesesuaian spasial antara kondisi faktual lahan pada fase transisi menuju pasca tambang, termasuk area yang telah direklamasi, dengan rencana pola ruang yang ditetapkan secara normatif. Melalui pendekatan ini, dapat diidentifikasi area yang telah sesuai, area yang masih berada dalam tahap transisi lahan pasca tambang (Song *et al.*, 2024) serta area yang berpotensi mengalami ketidaksesuaian pemanfaatan ruang.

Hasil analisis perubahan kondisi lahan, indeks spektral, dan *overlay* RTRW selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penilaian potensi lahan pada fase transisi menuju pasca tambang serta menjadi input utama dalam perumusan strategi pemanfaatan lahan yang berorientasi pada keberlanjutan. Seluruh tahapan analisis pada bagian ini menjadi landasan bagi proses validasi spasial penilaian lahan pasca tambang yang berorientasi regional dan multidisiplin (Worden *et al.*, 2024) serta analisis strategi pada tahap berikutnya.

2.4.2 Validasi

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil klasifikasi tutupan lahan dan informasi spasial yang diperoleh dari citra satelit merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Proses validasi bertujuan menilai tingkat akurasi hasil klasifikasi sebelum digunakan pada analisis perubahan lahan dan evaluasi spasial. Validasi dilakukan dengan dua pendekatan yaitu verifikasi lapangan (*ground truth*) dan uji akurasi statistik menggunakan *confusion matrix*.

2.4.2.1 Verifikasi Lapangan (*Ground Truth*)

Ground Truthing dilakukan dengan pengambilan titik sampel lapangan yang mewakili setiap kelas tutupan lahan hasil klasifikasi, meliputi hutan lahan kering sekunder, semak belukar, lahan terbuka/pertambangan, badan air (void), serta zona penyangga atau *bufferzone*. Penentuan titik sampel dilakukan dengan menggunakan metode *stratified purposive sampling* untuk memastikan keterwakilan setiap kelas tutupan lahan. Data lapangan yang dikumpulkan mencakup koordinat geografis, kondisi biofisik lahan, serta dokumentasi visual sebagai bahan pembandingan terhadap hasil interpretasi citra. Data Lapangan yang dikumpulkan meliputi koordinat geografis, kondisi biofisik lahan, dan tingkat perkembangan vegetasi serta dokumentasi visual. Data *ground truthing* digunakan sebagai pembandingan terhadap hasil interpretasi citra untuk menilai kesesuaian klasifikasi tutupan lahan serta memperkuat interpretasi kondisi faktual lahan pada fase transisi menuju pasca tambang.

2.4.2.2 Uji Akurasi Klasifikasi (*Confusion Matrix*)

Uji akurasi dilakukan untuk menilai akurasi hasil klasifikasi tutupan lahan. Evaluasi dilakukan dengan metode *confusion matrix*, yaitu membandingkan kelas tutupan lahan hasil klasifikasi dengan kelas referensi dari data *ground truth*.

Parameter akurasi yang digunakan meliputi :

1. *Overall Accuracy (OA)*

Overall Accuracy menunjukkan persentase jumlah piksel yang terklasifikasi dengan benar terhadap seluruh sampel pengujian.

$$OA = \frac{\sum \text{Nilai diagonal}}{N} \times 100\%$$

Dimana:

N = Jumlah total sampel uji

2. *Kappa Coefficient*.

Kappa Coefficient digunakan untuk mengukur tingkat preferensi klasifikasi dengan mempertimbangkan kemungkinan kesesuaian yang terjadi secara acak.

$$Kappa = \frac{Phai - Pe}{1 - Pe}$$

Dimana:

Po = OA

Pe = Proporsi keseimbangan acak

Nilai *overall accuracy* digunakan untuk merepresentasikan tingkat ketepatan klasifikasi secara global, sedangkan *kappa coefficient* berfungsi untuk mengevaluasi konsistensi hasil klasifikasi dengan memperhitungkan faktor kesesuaian yang terjadi secara kebetulan

(*chance agreement*). Dalam pemetaan berbasis data besar (*geo-big data*) pada platform *google earth engine*, penggunaan kedua metrik ini telah dikonfirmasi sebagai prosedur validasi standar yang paling efektif menurut meta-analisis Tamiminia *et al.* (2020). Selanjutnya, mengacu pada standar evaluasi terkini oleh Mahapatra *et al.* (2025) serta studi penerapan algoritma *machine learning* oleh Ahmed (2023), nilai *overall accuracy* di atas 85% dan *kappa coefficient* di atas 0,80 dikategorikan sebagai tingkat akurasi yang sangat baik (*very good agreement*). Pencapaian nilai ambang batas tersebut mengindikasikan bahwa model klasifikasi memiliki performa yang konsisten dan hasil pemetaan layak digunakan sebagai basis data utama dalam analisis perubahan lahan.

2.5 Hasil dan Pembahasan

2.5.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

2.5.1.1 Koordinat Geografis dan Pembagian Administrasi

Wilayah Pulau Bunyu memiliki posisi di bagian Selatan garis khatulistiwa, termasuk dalam kategori pulau kecil dengan luas wilayah 198,32 km^2 . Wilayah ini memiliki batas-batas administrasi sebagai berikut :

- Sebelah Utara berbatasan dengan Kabupaten Nunukan dan Laut Sulawesi
- Sebelah Timur berbatasan dengan Kota Tarakan dan Laut Sulawesi
- Sebelah Selatan berbatasan dengan Kabupaten Berau
- Sebelah Barat berbatasan dengan Kabupaten Malinau dan Pulau Baru

Berdasarkan data BPS dalam publikasi Desa Bunyu Dalam Angka 2023, diketahui pulau ini memiliki tiga desa yaitu Desa Bunyu Selatan, Desa Bunyu Barat, dan Desa Bunyu Timur. Wilayah ini memiliki elevasi rendah dengan rata-rata ketinggian 12 mdpl dan elevasi maksimum 95%. Setiap desa memiliki luasan yang berbeda-beda dengan topografi dan potensi wilayah yang bervariasi. Rincian pembagian wilayah per desa disajikan pada Tabel 2.7

Tabel 2.7 Luas Wilayah Desa di Pulau Bunyu

Desa	Luas (km^2)	Persentase (%)
Desa Bunyu Selatan	7,47 km^2	3,77 %
Desa Bunyu Barat	66,46 km^2	33, 51%
Desa Bunyu Timur	124,39 km^2	62, 72%

Sumber : BPS Kecamatan Bunyu Dalam Angka (2023).

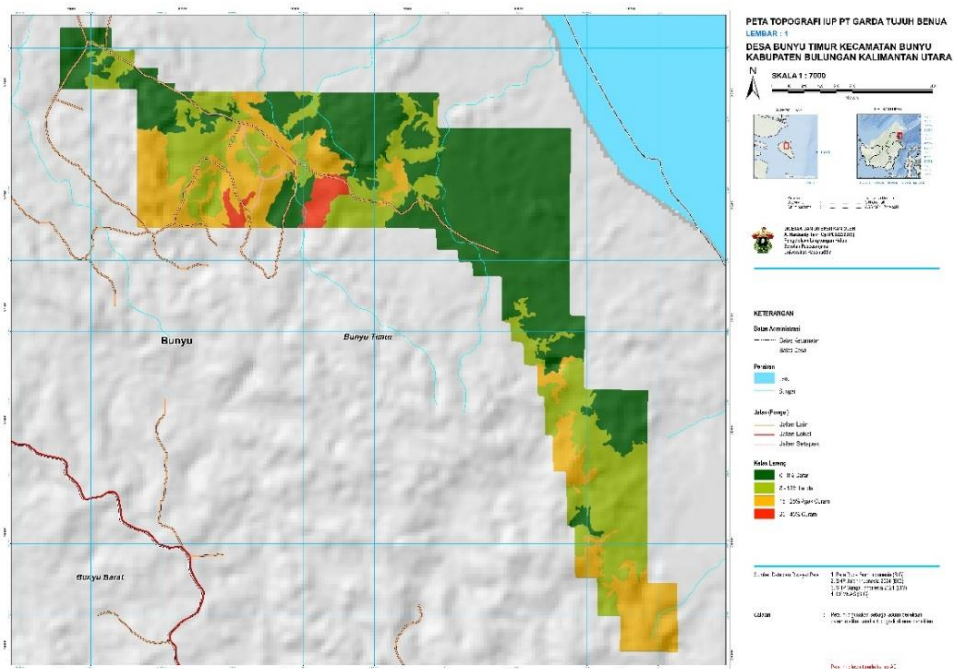
Berdasarkan data BPS, 2023 pada Tabel 2.7 menunjukkan desa dengan luas terkecil adalah desa Bunyu Selatan, hanya seluas 7,47 km^2 atau sekitar 3,77 %. Dan Desa Bunyu Barat menunjukkan kawasan yang lebih padat secara pemukiman dengan luas wilayah 66,46 km^2 atau 33, 51% dari total luas kecamatan. Desa terluas adalah Desa Bunyu Timur dengan luas mencapai 124,39 km^2 atau sekitar 62, 72%

dari total luas kecamatan, sehingga menjadi desa dengan cakupan geografis paling luas, meskipun tidak selalu diikuti dengan jumlah penduduk yang besar.

Desa Bunyu Timur merupakan kawasan dengan dinamika pemanfaatan ruang yang signifikan, terutama terkait kegiatan pertambangan mineral dan batubara. Selain keberadaan entitas besar yang berafiliasi dengan Adani Global, Desa Bunyu Timur juga menjadi lokasi area Izin Usaha Pertambangan (IUP) milik PT Garda Tujuh Buana, yang mencakup sebagian wilayah operasional perusahaan. Aktivitas pertambangan di wilayah ini memberikan kontribusi ekonomi lokal sekaligus menghadirkan tantangan ekologis dan tata ruang.

2.5.1.2 Topografi dan Kemiringan Lereng

Topografi merupakan representasi bentuk permukaan bumi yang dinyatakan melalui elevasi, kemiringan, dan karakteristik medan lainnya yang memengaruhi proses hidrologi, erosi, dan distribusi sifat tanah (Li *et al.*, 2020). Topografi Pulau Bunyu secara umum cenderung datar, kelerengan rendah dan akuifer dangkal.



Gambar 2.2 Peta Topografi IUP PT. Garda Tujuh Buana

Peta topografi Gambar 2.2 pada wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana di Desa Bunyu Timur menunjukkan bahwa mayoritas area berada pada kelas lereng datar hingga landai (0–15%), sementara sebagian kecil wilayah menunjukkan kemiringan agak curam (15–25%) pada beberapa titik elevasi lokal yang lebih tinggi. Kondisi ini menunjang proses reklamasi karena area datar dan landai cenderung memiliki risiko erosi yang lebih rendah dan mendukung pertumbuhan vegetasi awal, sehingga memudahkan penerapan

teknik revegetasi. Temuan ini sejalan dengan hasil kajian reklamasi pasca tambang di Indonesia yang menekankan pentingnya stabilitas lahan dan kemiringan lereng dalam mendukung keberhasilan revegetasi, terutama pada fase awal pemulihan tanah (Pratiwi *et al.*, 2021). Sebaliknya, area berlereng lebih curam tetap memerlukan tindakan konservasi seperti pengaturan drainase, pemadatan terkontrol, dan penggunaan tanaman dengan sistem perakaran kuat untuk mencegah erosi dan mempercepat stabilisasi lahan.

Area dengan kemiringan rendah diarahkan untuk revegetasi intensif dan pemanfaatan berkelanjutan, sedangkan area berkemiringan lebih besar diprioritaskan sebagai zona perlindungan tanah dan drainase alami. Pendekatan ini konsisten dengan model evaluasi kesesuaian lahan pada wilayah pasca tambang yang menekankan pentingnya mengintegrasikan variabel topografi dan kemiringan lereng dalam perencanaan penggunaan ruang (Li *et al.*, 2023). Selain itu, penelitian lain pada wilayah pasca tambang di Asia menegaskan bahwa klasifikasi lereng berperan penting dalam menentukan prioritas pemanfaatan lahan dan desain restorasi berbasis karakteristik biofisik lokal (Hao *et al.*, 2022).

2.5.1.3 Digital Elevation Model (DEM)

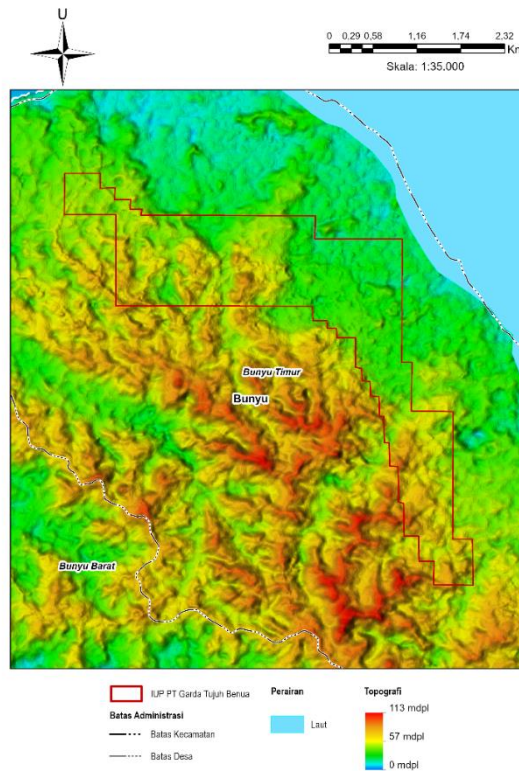
Analisis *Digital Elevation Model* (DEM) digunakan untuk menggambarkan karakteristik bentuk permukaan lahan, variasi elevasi, dan kemiringan lereng di wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana (GTB), Pulau Bunyu, Kabupaten Bulungan, Kalimantan Utara. Model ini berperan penting dalam memahami hubungan antara topografi, arah aliran permukaan, dan stabilitas morfologi lahan tambang, yang secara langsung memengaruhi efektivitas kegiatan reklamasi dan potensi pemanfaatan lahan pasca tambang. Data DEM pada penelitian ini diperoleh dari Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) yang dikembangkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan resolusi spasial 8 meter dan akurasi vertikal ± 2 meter. Kemiringan lereng dihitung dengan persamaan dasar trigonometri:

$$\text{Slope} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h}{\Delta d}\right)$$

dengan:

- Δh = perubahan elevasi (meter),
- Δd = jarak horizontal antar piksel (meter).

Klasifikasi kemiringan lereng dalam penelitian ini mengikuti standar FAO (2006), yaitu: datar (0–3°), landai (3–8°), agak miring (8–15°), miring (15–25°), dan curam (>25°).



Gambar 2.3 *Digital Elevation Model (DEM)*

Berdasarkan hasil pemodelan dari data DEMNAS Gambar 2.3 wilayah Pulau Bunyu memiliki rentang elevasi antara 0 hingga 113 (mdpl). Elevasi tertinggi (100–113 mdpl) terdapat di bagian barat laut pulau, yang merupakan zona perbukitan rendah dengan tutupan hutan sekunder yang masih terjaga. Wilayah ini memiliki fungsi krusial sebagai penyangga ekologis dan area tangkapan air alami (*catchment area*) yang mengatur tata air mikro kawasan. Hal ini sejalan dengan studi Barbosa-Briones *et al.* (2024), yang menekankan pentingnya menjaga konektivitas hidrologi pada area hulu tangkapan air untuk mengendalikan transport sedimen dan mencegah degradasi pada ekosistem hilir akibat aktivitas pertambangan.

Sebaliknya, wilayah tengah hingga selatan Pulau Bunyu yang menjadi area operasional tambang PT Garda Tujuh Buana berada pada elevasi rendah hingga sedang (10–55 mdpl) dengan morfologi datar hingga bergelombang landai. Analisis kemiringan menunjukkan bahwa 68% dari total luas IUP memiliki kemiringan $<5^\circ$, yang dikategorikan datar–landai. Dominasi area datar ini menjadi keuntungan teknis untuk meminimalisir risiko ketidakstabilan geoteknik. Investigasi lapangan berbasis *drone* yang dilakukan oleh Xiao *et al.* (2022) pada area

timbunan tambang (*dump*) menunjukkan bahwa erosi tanah yang parah terkonsentrasi pada lereng curam yang belum tertata, sedangkan area yang lebih datar menunjukkan stabilitas lahan yang jauh lebih baik setelah proses evolusi alami selama lima tahun.

Kondisi topografi ini berimplikasi langsung terhadap strategi reklamasi. Area dengan kemiringan rendah memiliki stabilitas tanah yang mendukung percepatan revegetasi. Sementara itu, sekitar 20% area berada pada kelas lereng 5–15°, dan area dengan kemiringan >15° (curam) hanya ditemukan di batas utara dan barat wilayah tambang yang merupakan bagian dari morfologi alami pulau. Pada zona miring ini, intervensi teknik konservasi tanah mutlak diperlukan. Temuan ini diperkuat oleh Kurnianto *et al.* (2024) serta pemodelan dinamika lahan menggunakan *Google Earth Engine* oleh Mensah *et al.* (2024), yang membuktikan bahwa perubahan morfologi lahan pasca tambang secara signifikan memengaruhi pola suksesi tutupan lahan (*Land Use/Land Cover dynamics*). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai variasi topografi menjadi prasyarat utama untuk merancang skenario reklamasi yang efektif.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa bentuk topografi memengaruhi keberhasilan reklamasi. Wilayah dengan kemiringan rendah (<5°) memiliki stabilitas tanah yang baik dan cocok untuk revegetasi serta pembangunan infrastruktur reklamasi, sedangkan area dengan kemiringan sedang hingga curam (>8°) memerlukan teknik konservasi tanah dan air yang lebih intensif, seperti terasering atau vegetasi penahan lereng. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kurnianto *et al.* (2024) yang menjelaskan bahwa topografi dan kemiringan lereng merupakan parameter utama dalam perencanaan reklamasi tambang terbuka karena memengaruhi arah aliran air dan tingkat erosi. Selain itu, Varouchakis *et al.* (2025) juga menegaskan bahwa integrasi DEM dengan indeks vegetasi seperti NDVI membantu mengidentifikasi area yang memiliki potensi pemulihan alami lebih tinggi, terutama pada zona dengan drainase baik dan kelembapan tanah stabil.

Dengan demikian, hasil analisis DEM tidak hanya menggambarkan kondisi topografi, tetapi juga menjadi dasar untuk pemodelan spasial reklamasi dan zonasi pemanfaatan lahan pascatambang berbasis elevasi dan kemiringan. Pendekatan ini sejalan dengan Servou *et al.* (2023) yang menekankan bahwa pemanfaatan data topografi beresolusi tinggi dalam GIS memungkinkan perencanaan tata guna lahan tambang yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap kondisi fisik lapangan.

Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa variasi topografi berperan signifikan terhadap distribusi vegetasi, arah aliran air, dan stabilitas tanah di area tambang. Untuk memahami lebih jauh hubungan antara tingkat keterbukaan lahan dan kondisi fisik permukaan, analisis berikutnya difokuskan pada *Bare Soil Index* (BSI) sebagai indikator tingkat degradasi tanah dan efektivitas reklamasi pasca tambang.

2.5.1.4 Klimatologi

Kondisi klimatologi pada wilayah studi di Pulau Bunyu, khususnya area IUP PT Garda Tujuh Buana di Desa Bunyu Timur, menunjukkan karakter iklim tropis basah dengan curah hujan tinggi dan distribusi

merata sepanjang tahun. Berdasarkan data pengamatan Stasiun Meteorologi Tanjung Harapan periode 2013–2022, curah hujan tahunan tercatat berada pada kisaran 2.474–3.643 mm/tahun dengan rata-rata 2.927 mm/tahun dan frekuensi hujan 221–279 hari/tahun. Konsistensi curah hujan tinggi tersebut juga terlihat pada periode terkini, dengan total curah hujan tahun 2023 mencapai sekitar 2.868 mm dan meningkat kembali pada tahun 2024 menjadi sekitar 3.171 mm. Pola bulanan memperlihatkan puncak hujan pada Januari–Maret dengan fase relatif menurun pada pertengahan tahun, meskipun secara klimatologi wilayah ini tetap tergolong sangat basah sesuai karakteristik iklim pesisir Kalimantan Utara (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2024). Kondisi ini memberikan dukungan ekologis bagi proses revegetasi pasca tambang melalui ketersediaan air tanah yang memadai, namun juga menuntut pengelolaan limpasan permukaan serta stabilisasi lereng guna mencegah potensi erosi pada area yang belum ter rehabilitasi.

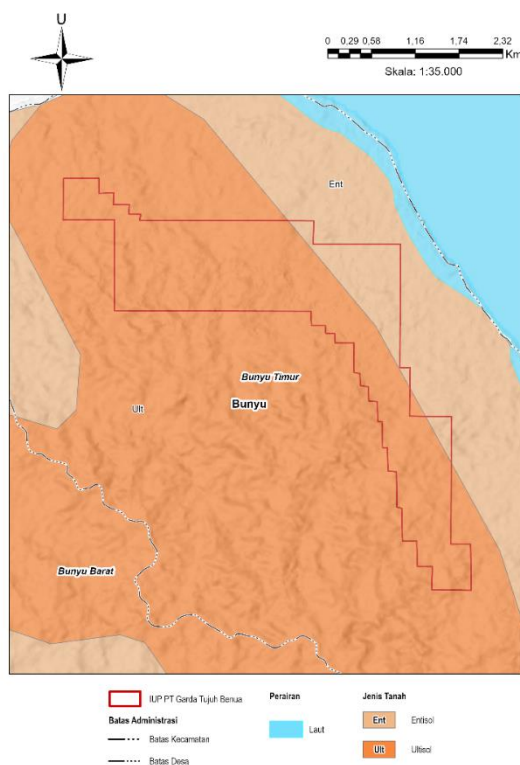
Data klimatologi ini kemudian diintegrasikan sebagai variabel biofisik dalam kerangka analisis spasial untuk mengevaluasi kerentanan lahan terhadap erosi dan mengarahkan identifikasi potensi pemanfaatan lahan pasca tambang secara ekologis adaptif. Pendekatan ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa analisis kesesuaian lahan pasca tambang berbasis SIG—yang menggabungkan variabel topografi, hidrologi dan iklim menjadi fondasi untuk perencanaan ruang yang berkelanjutan (Worden *et al.*, 2024). Selain itu, model pemanfaatan lahan pasca tambang turut menekankan bahwa penggabungan data iklim jangka panjang memperkuat ketepatan zonasi dan pemilihan penggunaan lahan alternatif setelah tambang ditutup (Rohaendi & Herlinawati, 2024).

2.5.1.5 Jenis Tanah

Jenis tanah yang berkembang di Pulau Bunyu didominasi oleh ordo ultisol dengan sub grup *tropaquults*, *paleudults*, dan *tropudults*, serta kemunculan *dystropepts* pada satuan pelapukan yang relatif lebih muda. Persebaran dan karakteristik tanah tersebut berkaitan erat dengan kondisi geologi setempat, khususnya litologi Formasi Sajau yang tersusun atas batu pasir kuarsa, batu lempung, lanau berkarbon, dan lapisan batubara sebagai bagian dari sistem sedimen Cekungan Tarakan (Satyana, 2021; Kusuma & Sanyoto, 2020). Pada wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana di Desa Bunyu Timur, hasil deskripsi jenis tanah Gambar 2.4 rona lingkungan menunjukkan bahwa tanah memiliki tekstur halus–sedang, kandungan bahan organik rendah, serta densitas partikel sekitar 2,57 g/cm³, dengan kapasitas air tersedia berkisar 7–9%, mencerminkan kondisi substrat yang memiliki daya sangga fisik dan kimia terbatas serta kerentanan terhadap pemadatan dan erosi permukaan. Karakteristik ini memiliki implikasi langsung terhadap

proses reklamasi dan pemanfaatan lahan pasca tambang, di mana keberhasilan revegetasi dan stabilitas lereng sangat dipengaruhi oleh strategi pengelolaan struktur tanah dan peningkatan kandungan bahan organik. Dalam konteks perencanaan pemanfaatan lahan pasca tambang, integrasi parameter tanah dengan variabel topografi dan iklim melalui analisis berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) diakui mampu meningkatkan ketepatan penentuan zonasi kesesuaian lahan serta mendukung penyusunan tata guna lahan yang adaptif dan berkelanjutan (Worden *et al.*, 2024; Zaniboni *et al.*, 2024).

Karakteristik tanah tersebut selanjutnya diverifikasi melalui pengambilan sampel dan analisis laboratorium pada sembilan titik pengamatan yang mewakili variasi morfologi dan kondisi lahan di area penelitian, yang dijelaskan pada sub-bab berikut mengenai lokasi titik sampling dan metodologi analisis.



Gambar 2.4 Peta Jenis Tanah

2.5.1.6 Analisis Karakteristik Fisik dan Kimia Tanah

Pelaksanaan uji kimia dan fisika tanah pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh gambaran nyata mengenai kondisi biofisik lahan pasca tambang di wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana. Analisis ini diperlukan karena perubahan tutupan lahan yang terjadi akibat kegiatan

penambangan tidak hanya memengaruhi struktur vegetasi dan morfologi permukaan, tetapi juga menyebabkan gangguan langsung terhadap sifat kimia dan fisika tanah, seperti penurunan pH, hilangnya bahan organik, kerusakan struktur agregat, dan rendahnya kapasitas tukar kation. Hasil uji laboratorium menjadi dasar penting untuk menilai tingkat degradasi tanah serta menentukan kemampuan tanah mendukung keberhasilan reklamasi, sehingga analisis spasial NDVI, BSI, DEM, dan NDWI dapat diinterpretasikan dengan lebih valid berdasarkan kondisi tanah nyata. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi penelitian pasca tambang modern, di mana evaluasi biofisik lahan harus melibatkan parameter tanah sebagai determinan utama keberhasilan revegetasi (Wang *et al.*, 2023; Varouchakis *et al.*, 2025).

Kedalaman pengambilan sampel 0–30 cm dan 30–60 cm dipilih karena kedua lapisan tersebut merupakan zona kritis bagi aktivitas perakitan tanaman dan zona paling terpengaruh oleh kegiatan penambangan. Lapisan 0–30 cm mewakili *topsoil* dan bagian tanah yang paling menentukan keberhasilan penanaman ulang, sedangkan lapisan 30–60 cm merepresentasikan *subsoil* yang sering tercampur dengan material *overburden* akibat pengupasan saat operasi tambang. Dengan membandingkan kedua kedalaman tersebut, penelitian dapat menilai tingkat rehabilitasi tanah secara vertikal dan mengidentifikasi sejauh mana dampak penambangan menembus ke lapisan bawah tanah.

Sementara itu, titik *void* atau *pit lake* tidak digunakan sebagai lokasi pengambilan sampel tanah karena kondisi lapisan tersebut terdiri dari sedimen jenuh air dan lumpur dasar kolam yang tidak stabil. Pengambilan sampel pada area tersebut tidak memungkinkan secara teknis tanpa peralatan khusus seperti *sedimen corer* atau *platform* terapung, yang tidak tersedia dalam ruang lingkup penelitian ini. Selain itu, sedimen *pit lake* memiliki karakteristik yang berbeda dengan tanah mineral dan tidak dapat digunakan sebagai pembanding langsung bagi tanah reklamasi atau timbunan OB.

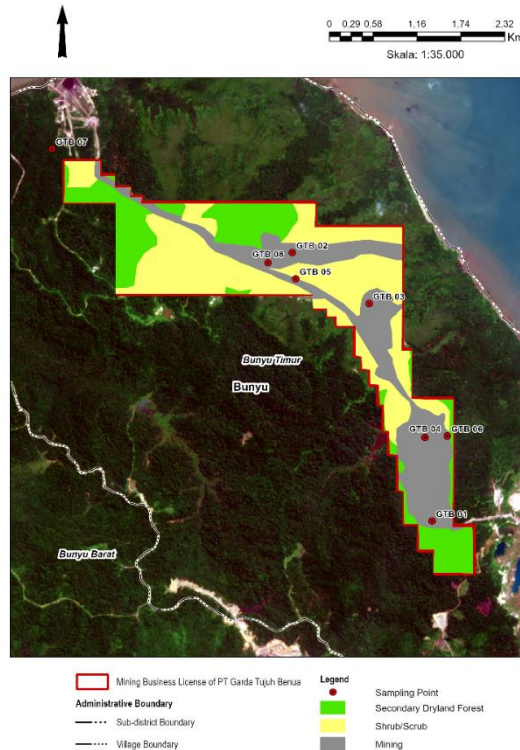
Pemilihan lokasi *pit* selatan, *bank soil*, dan *disposal* sebagai titik sampling didasarkan pada fungsinya yang paling relevan untuk memahami dinamika tanah pasca tambang. Area *pit* selatan mencerminkan kondisi tanah yang secara aktif dipengaruhi penambangan dan perubahan morfologi, sementara *bank soil* dan *disposal* menggambarkan tanah hasil penimbunan dan aktivitas pemindahan material *overburden* yang sangat menentukan kualitas media tanam untuk reklamasi. Dengan memasukkan kedua jenis lokasi tersebut, penelitian dapat menilai tingkat kesuburan tanah pada media reklamasi potensial dan mengidentifikasi kebutuhan intervensi perbaikan tanah.

Hasil uji laboratorium terhadap sembilan titik sampel tanah menunjukkan bahwa karakteristik kimia tanah di wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana memiliki variasi yang sangat signifikan. Nilai pH H₂O berada pada rentang 3,22–6,69, menandakan adanya kondisi tanah yang mulai dari sangat masam hingga mendekati netral. Reaksi tanah yang masam terutama ditemukan pada area timbunan *overburden* dan

bukaan tambang, sedangkan nilai pH yang lebih tinggi ditemukan pada area pit selatan dan beberapa lokasi dengan penambahan topsoil. Kondisi ini konsisten dengan gangguan tanah akibat pengupasan lapisan atas dan proses oksidasi material sulfidik, sebagaimana dijelaskan oleh Hu *et al.* (2022) pada lahan tambang batubara terbuka.

Parameter kesuburan tanah menunjukkan kondisi yang bervariasi. Kandungan C-organik berkisar 0,82–3,94%, dengan nilai terendah pada area bukaan dan OB baru, sedangkan area reklamasi lama memiliki nilai mendekati tinggi, yang mencerminkan peningkatan masukan bahan organik dari vegetasi sekunder. Kandungan N-total 0,11–0,21% berada pada kategori rendah, menandakan bahwa hampir seluruh lokasi memiliki keterbatasan nitrogen mineral tersedia. Demikian pula, kandungan P_2O_5 (HCl 25%) sebesar 10,21–22,85 mg/100 g menunjukkan kelas rendah–sedang, yang dapat membatasi pertumbuhan vegetasi awal. Untuk unsur kalium (K_2O), nilai sangat tinggi ditemukan di disposal (310,91 ppm) dan pit selatan (301,26 ppm), sedangkan lokasi lain menunjukkan nilai 12,06–33,14 mg/100g, mencerminkan perbedaan signifikan akibat variasi material penyusun tanah. Nilai kapasitas tukar kation (KTK) berkisar 9,08–32,14 me/100 g, mulai dari kategori sangat rendah pada titik OB baru hingga kategori sedang–tinggi pada area hutan dan reklamasi, memperlihatkan tingkat kemampuan tanah yang berbeda dalam menahan hara dan menopang pertumbuhan tanaman. Variasi ini menunjukkan bahwa kondisi kesuburan tanah pada lokasi penelitian sangat ditentukan oleh riwayat gangguan dan proses pemulihan yang terjadi pada masing-masing lokasi; kondisi seperti ini juga ditemukan oleh Wang *et al.* (2023) dan Varouchakis *et al.* (2025) pada studi tanah pasca tambang di Asia dan Eropa.

Pemilihan parameter pH, C-organik, N, P, K, KTK, tekstur, dan kejenuhan basa dilakukan karena parameter-parameter ini merupakan indikator utama kualitas tanah yang paling memengaruhi keberhasilan revegetasi dan penentuan strategi pemanfaatan lahan pasca tambang berbasis GIS. Parameter kimia seperti pH, KTK, dan C-organik berperan langsung dalam menentukan kapasitas tanah mempertahankan hara, sementara parameter fisika seperti tekstur memengaruhi infiltrasi, kestabilan lereng, serta tingkat erodibilitas. Oleh karena itu, pemahaman terhadap parameter-parameter tersebut tidak hanya penting untuk menginterpretasi kondisi biofisik tanah, tetapi juga untuk mengintegrasikan hasil laboratorium dengan analisis NDVI, BSI, NDWI, dan DEM dalam penentuan sensitivitas lahan dan penyusunan model pemanfaatan lahan pasca tambang secara berkelanjutan. Adapun titik koordinat pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 3.7 :



Gambar 2.5 Titik koordinat pengambilan sampel
Sumber data : data primer

2.5.1.7 Pengaruh Aktivitas Pertambangan terhadap Perubahan Karakteristik Tanah

Berdasarkan hasil *overlay* antara peta jenis tanah dengan titik pengambilan sampel Gambar 2.6, diketahui bahwa wilayah penelitian didominasi oleh jenis tanah Ultisol dengan sebagian kecil area Entisol yang tersebar pada zona tertentu di dalam wilayah IUP PT Garda Tugu Buana. Persebaran titik sampling menunjukkan bahwa sebagian besar sampel berada pada area yang telah mengalami aktivitas pertambangan maupun area yang berada dalam pengaruh langsung kegiatan operasional tambang.

Secara alami, tanah Ultisol memiliki karakteristik tingkat kesuburan rendah, pH cenderung masam, serta kandungan bahan organik yang terbatas. Namun demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan menyebabkan perubahan lebih lanjut terhadap karakteristik tanah tersebut, terutama pada area bukaan tambang dan timbunan *overburden*. Perubahan ini ditandai dengan penurunan kualitas tanah, baik dari segi sifat kimia maupun fisik, seperti meningkatnya tingkat keasaman, rendahnya kandungan bahan

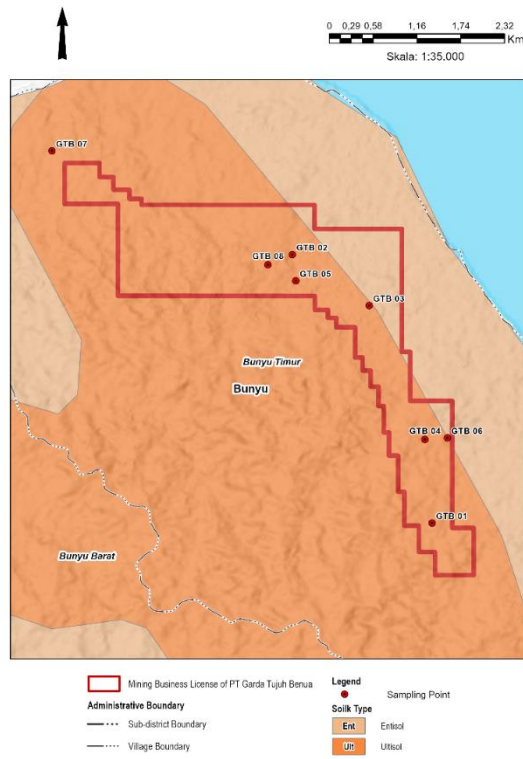
organik, serta menurunnya kapasitas tukar kation. Kondisi ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa indikator utama degradasi tanah pada lahan bekas tambang meliputi penurunan pH, rendahnya bahan organik, serta menurunnya kapasitas tanah dalam menyimpan unsur hara (Rachman *et al.*, 2017).

Pada beberapa lokasi, khususnya pada area *disposal* dan pit selatan, ditemukan variasi nilai unsur hara yang cukup tinggi, yang menunjukkan adanya pengaruh material geologi dari lapisan bawah tanah yang terangkat ke permukaan selama proses penambangan. Kondisi ini dapat memberikan dampak positif secara terbatas terhadap ketersediaan unsur tertentu, seperti kalium, namun tidak diikuti dengan peningkatan kesuburan tanah secara keseluruhan karena rendahnya kandungan bahan organik dan struktur tanah yang kurang stabil. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Hamid *et al.* (2019) yang menunjukkan bahwa meskipun beberapa unsur hara dapat meningkat akibat pencampuran material tanah, kualitas tanah secara umum tetap mengalami penurunan akibat gangguan struktur dan kehilangan *topsoil*.

Sebaliknya, dampak negatif aktivitas pertambangan lebih dominan terlihat pada degradasi kualitas tanah secara umum. Hilangnya lapisan *topsoil* akibat proses pengupasan menyebabkan terganggunya struktur tanah serta menurunnya kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan vegetasi. Selain itu, pencampuran material *overburden* dengan tanah permukaan menyebabkan perubahan tekstur dan sifat kimia tanah yang tidak homogen, sehingga memperlambat proses pemulihan alami. Kondisi ini juga dipengaruhi oleh faktor morfologi lahan, di mana perubahan bentuk permukaan akibat aktivitas tambang turut memengaruhi distribusi sifat fisik dan kimia tanah (Ayuningtyas, 2023).

Hasil ini menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan tidak mengubah jenis tanah secara klasifikasi (Ultisol tetap Ultisol), namun secara signifikan mengubah karakteristik dan kualitas tanah. Dengan demikian, perubahan yang terjadi lebih bersifat degradasi sifat tanah dibandingkan perubahan tipe tanah itu sendiri.

Implikasi dari kondisi ini adalah perlunya intervensi pengelolaan tanah yang tepat dalam kegiatan reklamasi, khususnya melalui pengembalian *topsoil*, penambahan bahan organik, serta pengelolaan kesuburan tanah untuk mendukung keberhasilan revegetasi dan pemanfaatan lahan pascatambang secara berkelanjutan. Pendekatan ini juga didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa keberhasilan pemanfaatan lahan reklamasi sangat bergantung pada perbaikan kualitas tanah sebagai media tumbuh tanaman (Lusia *et al.*, 2023).



Gambar 2.6 Peta *overlay* peta jenis tanah dengan titik pengambilan sampel

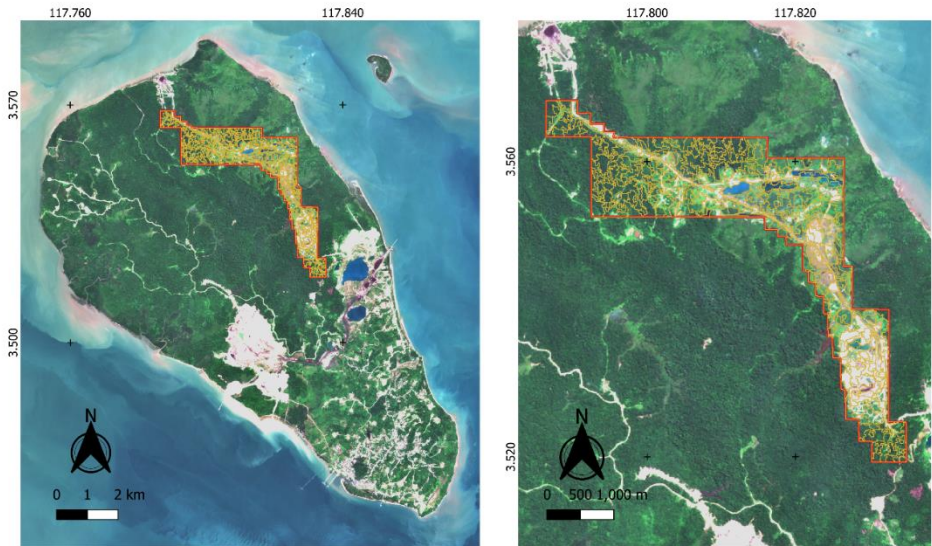
2.4.1 Hasil Klasifikasi dan Perubahan Luasan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan multitemporal dilakukan untuk menggambarkan dinamika spasial penggunaan lahan di wilayah penelitian, mulai dari fase pra-produksi, fase produksi aktif, hingga transisi menuju pascatambang. Analisis ini menggunakan citra satelit lintas generasi, yakni Landsat 5 (1990 dan 1996), Landsat 7 (2003), dan Sentinel-2 (2016, 2020, dan 2025). Jangkauan data yang panjang ini sangat krusial untuk memberikan pemahaman menyeluruh mengenai evolusi lanskap di Pulau Bunyu. Hasil pemetaan ini nantinya akan menjadi variabel penentu (data input) dalam analisis strategi pemanfaatan lahan pada bab berikutnya, di mana setiap perubahan luasan akan diinterpretasikan sebagai potensi atau kendala dalam perencanaan ruang.

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* yang dikombinasikan dengan pendekatan berbasis objek (*Object-Based Image Analysis / OBIA*). Pendekatan OBIA diawali dengan proses segmentasi citra untuk membentuk objek-objek homogen berdasarkan kesamaan karakteristik spektral dan spasial. Teknik ini memungkinkan representasi unit lanskap yang lebih realistis dan akurat dibandingkan pendekatan berbasis piksel konvensional, sehingga mampu meminimalisir kesalahan klasifikasi pada lanskap kompleks seperti kawasan pertambangan aktif (Ardiansyah et al., 2025).

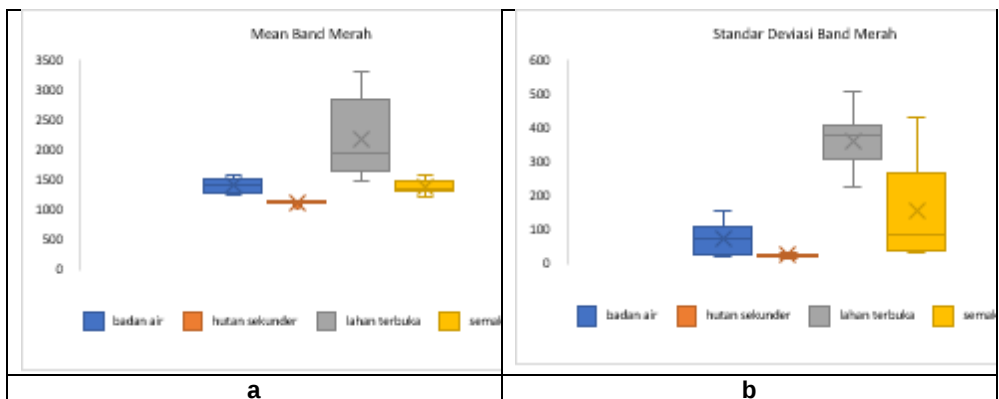
2.4.1.1 Hasil Segmentasi dan Analisis Nilai Spektral

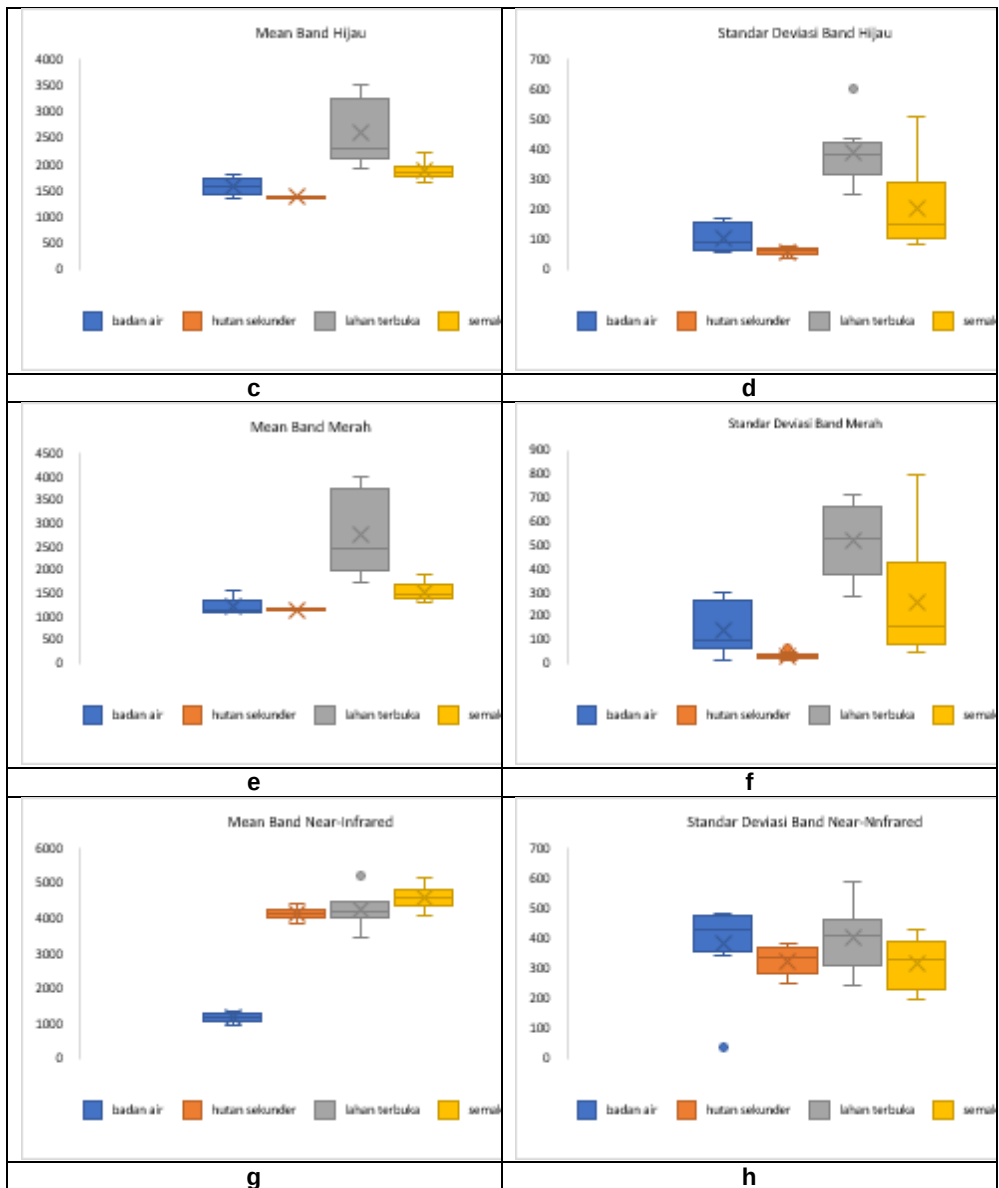
Hasil segmentasi citra menghasilkan objek-objek yang merepresentasikan unit permukaan lahan secara homogen. Setiap objek kemudian diekstraksi nilai spektralnya untuk menghasilkan atribut numerik sebagai variabel input dalam algoritma *Random Forest*. Analisis nilai citra (*image value*) dilakukan berdasarkan parameter statistik berupa nilai rata-rata (*mean*) dan standar deviasi pada *band* merah dan *Near-Infrared* (NIR), guna memastikan setiap kelas lahan teridentifikasi dengan presisi tinggi (Gambar 2.7 dan 2.8).



Gambar 2.7 Hasil Segmentasi

Parameter algoritma *random forest* dalam penelitian ini diatur untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi dan kompleksitas model. Jumlah pohon (*maximum number of trees*) ditetapkan sebanyak 100 untuk memastikan model memiliki variasi yang cukup dalam membangun *ensemble*, sehingga mampu menghasilkan prediksi yang stabil dan robust. Sementara itu, kedalaman maksimum pohon (*maximum depth*) dibatasi hingga 5 guna menghindari pembentukan pohon yang terlalu kompleks, yang berpotensi menyebabkan *overfitting*. Untuk memahami karakteristik spektral tiap kelas tutupan lahan, dilakukan analisis nilai citra (*image value*) berdasarkan parameter statistik berupa nilai rata-rata (*mean*) dan standar deviasi pada band merah dan *Near-Infrared* (NIR).





Gambar 2.8 Boxplot Distribusi Nilai Spektral (Mean dan Standar Deviasi) pada Band Merah dan Near-Infrared (NIR)

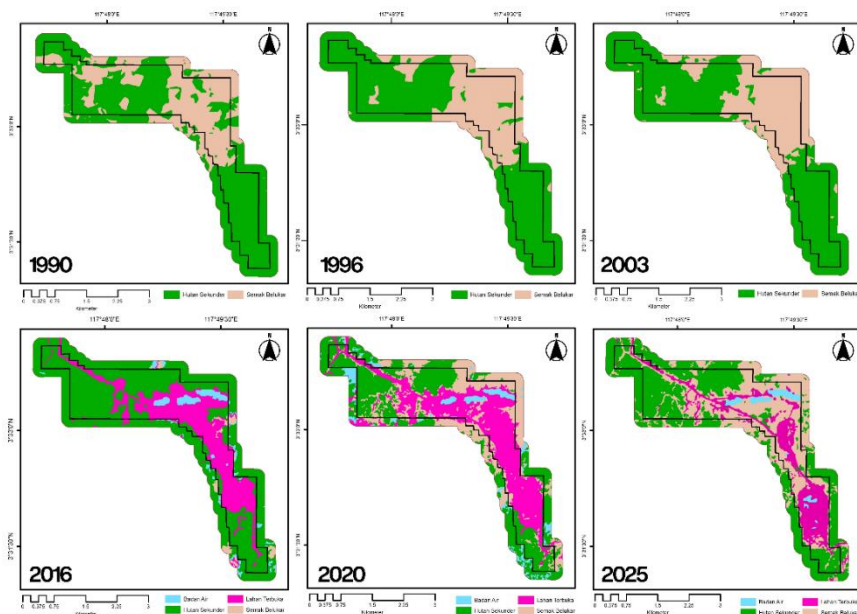
Hasil pengolahan menunjukkan karakteristik spektral yang kontras antar kelas. Kelas badan air secara konsisten memiliki nilai *mean* rendah pada seluruh *band* karena sifat air yang menyerap gelombang cahaya. Sebaliknya, kelas vegetasi (hutan sekunder dan semak belukar) memiliki reflektansi tinggi pada *band* NIR akibat struktur kanopi daun yang rapat. Sementara itu, lahan terbuka memiliki nilai reflektansi sedang yang dipengaruhi oleh keberagaman material tanah dan batuan bekas tambang. Perbedaan signifikan pada *band* NIR ini menjadi kunci utama dalam memisahkan area vegetatif dari area non-vegetatif, yang pada

tahap selanjutnya akan mempermudah identifikasi area mana yang sudah siap untuk masuk dalam zonasi pemanfaatan produktif dan area mana yang masih memerlukan rehabilitasi ekologis intensif (*sequencing*). Perbedaan distribusi nilai spektral ini menjadi dasar penting dalam proses klasifikasi, karena meningkatkan kemampuan model dalam membedakan kelas yang memiliki kemiripan visual namun berbeda secara spektral (Qin et al., 2021).

2.4.1.2 Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan

Hasil Klasifikasi menghasilkan empat kelas utama: hutan lahan kering sekunder, semak belukar, lahan terbuka/tambang, dan badan air (Gambar 2.9). Distribusi spasial menunjukkan transformasi masif dari ekosistem vegetasi alami menjadi kawasan industri tambang. Karakteristik khas yang muncul di lokasi penelitian adalah pembentukan void tambang (badan air) yang bersifat permanen. Dalam konteks pulau kecil seperti Pulau Bunyu, keberadaan void dan lahan terbuka seluas ratusan hektar ini menciptakan tumpang tindih kepentingan yang kompleks, karena keterbatasan daratan mengharuskan setiap jengkal lahan bekas tambang direncanakan kembali fungsinya secara tepat.

Berikut adalah uraian dinamika tutupan lahan dalam tiga fase utama:



Gambar 2.9 Peta Klasifikasi Perubahan Tutupan Lahan Multitemporal Tahun 1990-2025 di Wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana

a. Kondisi Tutupan Lahan Fase Pra Produksi (1990-2003)

Berdasarkan hasil klasifikasi citra Landsat tahun 1990, 1996, dan 2003, tutupan lahan di wilayah penelitian didominasi oleh hutan lahan kering sekunder dan semak belukar. Pada periode ini belum

teridentifikasi keberadaan lahan terbuka maupun badan air, yang menunjukkan bahwa wilayah penelitian masih berada pada kondisi alami atau semi-alami sebelum dimulainya aktivitas pertambangan secara intensif.

Secara kuantitatif, luas hutan lahan kering sekunder pada periode pra-produksi relatif stabil, yaitu sebesar 444,64 ha (1990), 467,55 ha (1996), dan 463,50 ha (2003). Luas semak belukar juga menunjukkan nilai yang relatif konstan, yaitu sebesar 273,71 ha (1990), 250,80 ha (1996), dan 254,86 ha (2003). Data periode ini berfungsi sebagai *environmental baseline* atau acuan kondisi rona lingkungan awal yang akan digunakan dalam menentukan target pemulihan ekologis pada strategi pascatambang.

b. Perubahan Tutupan Lahan Fase Pemberhentian Sementara (2016)

Perubahan drastis mulai terlihat pada tahun 2016 dengan munculnya lahan terbuka seluas 293,96 ha dan badan air (void) seluas 27,77 ha. Penurunan tajam terjadi pada semak belukar yang hanya tersisa 4,29 ha. Fragmentasi lahan ini menunjukkan adanya gangguan sistemik pada ekosistem pulau kecil, di mana pembukaan lahan untuk operasional tambang secara langsung menghilangkan fungsi penyangga lingkungan asli.

c. Dinamika Tutupan Lahan Fase Produksi Aktif dan Transisi Pemulihan (2020-2025)

Pada periode produksi aktif tahun 2020, luas lahan terbuka meningkat menjadi 335,96 ha, yang mencerminkan intensitas aktivitas pertambangan yang masih berlangsung. Namun pada tahun 2025, luas lahan terbuka menurun secara signifikan menjadi 182,24 ha, yang mengindikasikan adanya aktivitas penataan lahan dan awal proses reklamasi pada beberapa bagian wilayah tambang.

Seiring dengan penurunan lahan terbuka, terjadi peningkatan signifikan pada kelas semak belukar, dari 133,85 ha (2020) menjadi 264,54 ha (2025). Peningkatan ini menunjukkan perkembangan vegetasi awal sebagai bagian dari proses pemulihan lahan pada fase transisi menuju pascatambang.

Sementara itu, luas hutan lahan kering sekunder menunjukkan dinamika fluktuatif, dengan nilai 225,83 ha (2020) dan meningkat menjadi 243,08 ha (2025), yang mengindikasikan adanya tekanan sekaligus proses pemulihan vegetasi yang mulai berlangsung. Adapun luas badan air relatif stabil, yaitu 22,71 ha (2020) dan 28,49 ha (2025), yang mencerminkan keberadaan void tambang yang masih bertahan pada lanskap pascatambang. Adapun Tabel hasil luasan tutupan lahan dapat dilihat pada Tabel 2.8

Tabel 2.8 Luas Tutupan Lahan Hasil Klasifikasi Tahun 1990-2025

Penggunaan Lahan	Tahun 1990 (ha)	Tahun 1996 (ha)	Tahun 2003 (ha)	Tahun 2016 (ha)	Tahun 2020 (ha)	Tahun 2025 (ha)
Badan Air	-	-	-	27.78	22.71	28.49
Hutan Sekunder	444.64	467.55	463.50	392.32	255.83	243.08

Lahan	-	-	-	293.96	335.96	182.24
Terbuka						
Semak	273.71	250.80	254.86	4.29	133.85	264.54
Belukar						
Total	718.35	718.35	718.35	718.35	718.35	718.35

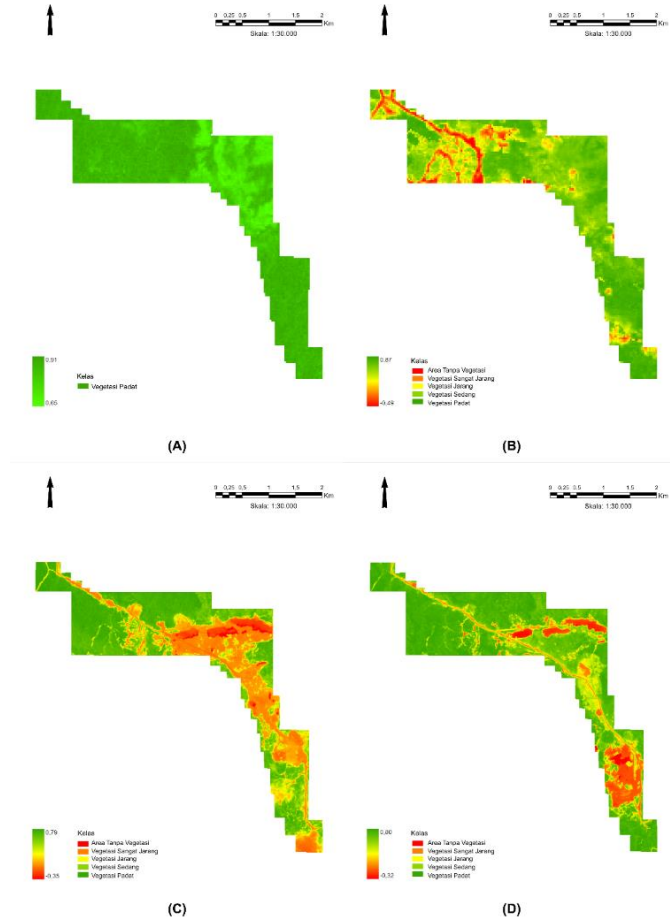
2.4.3 Analisis Indeks Spasial

Analisis indeks spasial dalam penelitian ini dilakukan untuk menilai kondisi biofisik lahan pascatambang secara kuantitatif berdasarkan hasil pengolahan citra satelit Landsat dan Sentinel-2. Pendekatan ini digunakan untuk memvalidasi dan memperkuat hasil interpretasi visual tutupan lahan yang telah dibahas sebelumnya. Setiap komponen lingkungan seperti kerapatan vegetasi, kelembapan permukaan (keberadaan air), dan tingkat keterbukaan lahan dianalisis secara terukur. Hasil dari indeks-indeks ini nantinya tidak hanya menjadi alat evaluasi, melainkan akan diintegrasikan sebagai indikator kesiapan lahan dalam perumusan bobot strategi AHP pada perencanaan tata ruang pascatambang.

Indeks yang digunakan meliputi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI), dan *Bare Soil Index* (BSI). Ketiga indeks ini memiliki rentang nilai antara -1 hingga +1. NDVI digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kehijauan vegetasi, NDWI untuk mendeteksi keberadaan badan air, dan BSI untuk mendeteksi dominasi material tanah terbuka. Penggunaan kombinasi ketiga indeks ini sangat krusial, terutama pada ekosistem pulau kecil seperti Pulau Bunyu, di mana perubahan drastis pada satu elemen (misalnya peningkatan lahan terbuka/BSI) dapat memicu efek domino terhadap hilangnya cadangan air tanah (penurunan NDWI).

2.4.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Indeks NDVI digunakan untuk menilai tingkat kehijauan dan kerapatan vegetasi di wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana (GTB) selama periode 1996 hingga 2025 (Gambar 2.11 dan Tabel 2.9).



Gambar 2.11 Peta Hasil Perbandingan *Normalized Difference Vegetation Indeks (NDVI)* (A) NDVI 1996, (B) NDVI 2004, (C) NDVI 2016, (D) NDVI 2025

Tabel 2.9 Hasil Klasifikasi luas Kelas NDVI Tahun 1996-2025

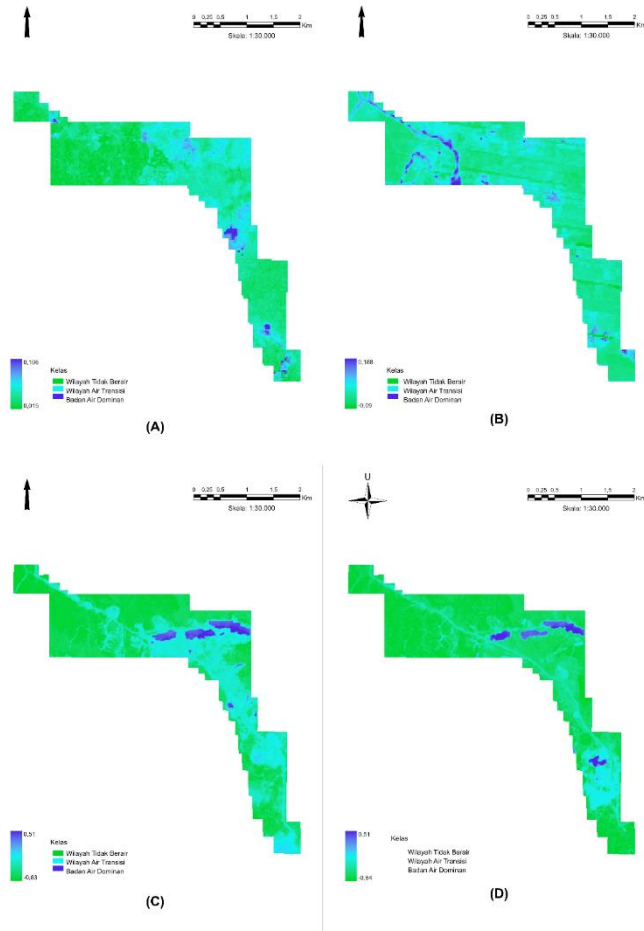
Kelas NDVI	1990 (ha)	2004 (ha)	2016 (ha)	2025 (ha)
Non Vegetasi (<0.00)	0.00	0.356	27.174	9.790
Vegetasi sangat jarang (0.00-0.20)	0.00	3.380	212.552	79.068
Vegetasi jarang (0.20-0.40)	0.00	46.879	76.759	60.046
Vegetasi Sedang (0.40-0.60)	0.00	111.282	110.789	117.317
Vegetasi Rapat (>0.60)	717.959	556.062	290.684	451.760
Total	717.959	717.959	717.959	717.959

Berdasarkan analisis, pada tahun 1996 (pra-tambang), wilayah penelitian didominasi oleh nilai NDVI tinggi (>0.60) seluas 717,95 ha, yang menandakan kondisi hutan sekunder masih sangat rapat dan stabil. Memasuki fase awal operasional tambang tahun 2004, terjadi penurunan signifikan pada luas vegetasi rapat menjadi 556,06 ha seiring dengan dimulainya pembukaan lahan. Puncak degradasi vegetasi terjadi pada tahun 2016 (fase produksi/pemberhentian sementara), di mana kelas vegetasi sangat jarang melonjak drastis mencapai 212,55 ha. Kondisi ini mencerminkan fase destruksi masif di mana struktur lanskap telah kehilangan penyangga ekologis alaminya (Hu et al., 2022).

Namun, pada tahun 2025, peta NDVI menunjukkan tren pemulihan yang positif. Vegetasi rapat kembali meningkat menjadi 451,76 ha dan kelas non-vegetasi menurun menjadi 9,79 ha. Peningkatan ini menandakan berlangsungnya suksesi alami maupun keberhasilan awal program reklamasi revegetasi (Varouchakis et al., 2025). Dalam konteks penyusunan strategi di Bab III kelak, area dengan tingkat pemulihan NDVI yang cepat ini merupakan zona potensial yang dapat diarahkan untuk strategi pemanfaatan ekonomi produktif (seperti agroforestri), sedangkan area yang NDVI-nya masih stagnan di bawah 0.20 akan memerlukan prasyarat perbaikan dasar atau rehabilitasi intensif (*sequencing* awal).

2.4.3.2 *Normalized Difference Water Index (NDWI)*

Indeks NDWI dimanfaatkan untuk mengidentifikasi keberadaan air di permukaan dan memetakan perubahan morfologi hidrologi. Analisis distribusi NDWI ini (Gambar 2.12 dan Tabel 2.10) sangat penting di wilayah pulau kecil, di mana ketersediaan sumber daya air tawar sangat terbatas dan rentan terhadap intrusi air laut.



Gambar 2.10 Peta hasil perbandingan hasil index *Normalized Difference Water Index (NDWI)* (A) NDWI 1996, (B) NDWI 2004, (C) NDWI 2016, (D) 2025

Tabel 2.10 Hasil Luasan NDWI Tahun 1990-2025

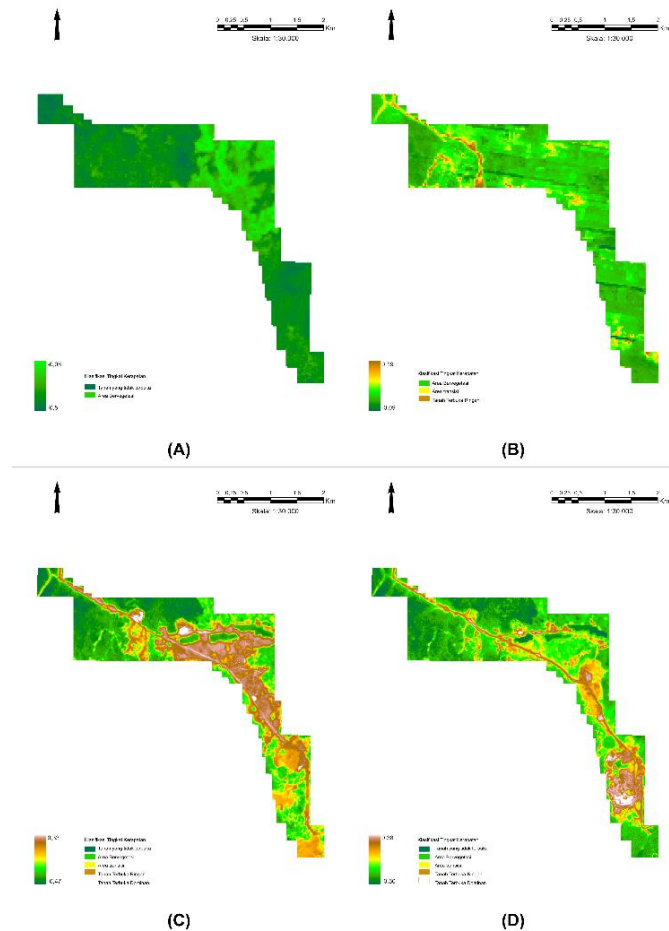
Rentang NDWI	Kelas	Interpretasi	1990 (Ha)	2004 (Ha)	2016 (Ha)	2025 (Ha)
<0.05	Non-Air	Vegetasi, tanah kering	425.405	582.570	688.169	692.50
0.05-0.35	Area Transisi	Tanah Lembab	293.554	135.389	20.051	14.880
>0.35	Badan Air dominan	Danau/Laut	0	0	9.738	10.571
Total			717.959	717.959	717.959	717.959

Hasil analisis memperlihatkan bahwa pada tahun 1996 dan 2004, wilayah penelitian didominasi oleh area non-air dan area kelembapan transisi, yang sesuai dengan kondisi tutupan vegetasi hutan. Perubahan fundamental pada sistem hidrologi baru terlihat jelas pada tahun 2016 dan 2025, ditandai dengan munculnya kelas dominan badan air (NDWI > 0.35) seluas 9 hingga 10 ha. Kelas badan air ini merepresentasikan keberadaan *void* (lubang bekas galian tambang/ *pit lake*) yang bersifat permanen.

Munculnya *void* telah mengubah tata air permukaan Pulau Bunyu. Meskipun *void* awalnya merupakan dampak lingkungan, dalam perencanaan pascatambang, keberadaan genangan air ini—jika dikelola kualitasnya—dapat berperan sebagai penyangga ekologis (*ecological water body*) yang menjaga kelembapan mikro untuk pertumbuhan vegetasi di sekitarnya (Wang et al., 2023). Integrasi antara hasil NDWI tinggi dan NDVI di sekitarnya akan menjadi dasar pertimbangan untuk menetapkan Zona Konservasi Air dalam usulan strategi peruntukan lahan, di mana *void* dapat dipertahankan fungsinya untuk menunjang kebutuhan hidrologi pulau tanpa harus seluruhnya dilakukan *backfilling* (penimbunan kembali).

2.4.3.3 Bare Soil Index (BSI)

Analisis *Bare Soil Index* (BSI) digunakan untuk mengidentifikasi tingkat keterbukaan lahan dan kondisi permukaan tanah akibat aktivitas penambangan di wilayah IUP PT Garda Tujuh Buana (GTB), Pulau Bunyu. Indeks ini merupakan parameter penting dalam penilaian spasial, karena mampu menggambarkan sejauh mana reklamasi berhasil menutup permukaan tanah terbuka dengan vegetasi baru serta menilai tingkat degradasi tanah di area tambang aktif. Hasil perbedaan indeks BSI dapat dilihat pada Gambar 2.13 dan Luasan disajikan pada Tabel 2.11



Gambar 2.13 Bare Soil Index (A) BSI 1996, (B) 2004, (C) 2016, (D) 2025

Tabel 2.11 Luasan hasil klasifikasi *Bare soil indeks* (BSI)

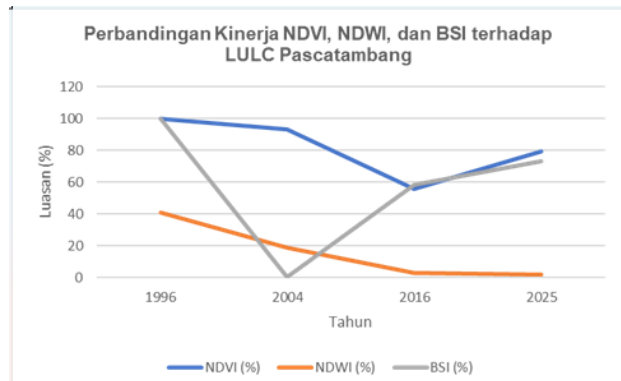
Rentang BSI	Klasifikasi	1996 (Ha)	2004 (Ha)	2016 (Ha)	2025 (Ha)
<-0.20	Tanah yang tidak terbuka	536.846	0	289.188	392.11
-0.20- (-0.05)	Area Bervegetasi	181.113	0.979	128.651	133.64
-0.05-0.05	Area Transisi	0	516.120	89.192	98.289
0.05-0.20	Tanah Terbuka Ringan	0	200.860	200.20	70.439
>0.20	Tanah Terbuka Dominan	0	0	10.719	23.480
Total		717.959	717.959	717.959	717.959

Dinamika spasial BSI sangat jelas mengikuti siklus tambang. Pada tahun 1996, seluruh area berada pada kelas tanah tidak terbuka, mencerminkan tutupan vegetasi yang utuh. Lonjakan drastis terjadi pada tahun 2004 dengan munculnya area transisi (516,12 ha) dan tanah terbuka ringan (200,86 ha), yang menggambarkan tahap pengupasan tanah pucuk (*topsoil*). Pada tahun 2016, heterogenitas lahan mencapai puncaknya dengan munculnya tanah terbuka dominan (10,71 ha) di area pit dan *disposal*.

Memasuki tahun 2025, kelas tanah tidak terbuka kembali meningkat (392,11 ha) yang mengindikasikan material penutup reklamasi mulai stabil. Namun, tanah terbuka dominan juga masih tersisa sebesar 23,48 ha di beberapa blok yang menandakan aktivitas ekstraksi masih menyisakan jejak. Kombinasi BSI tinggi dan NDVI rendah di area *disposal* ini menandakan perlunya intervensi sipil teknis secara masif (stabilisasi lereng, pengendalian erosi) sebelum lahan dapat dialihfungsikan. Informasi tingkat kritis lahan dari BSI ini akan menjadi acuan utama dalam menetapkan prioritas Skenario Pemulihan Dasar (WO) pada model AHP selanjutnya (Meng et al., 2024).

2.4.3.4 Sintesis Perubahan Biofisik Lahan Berdasarkan Indeks Spasial

Interpretasi terpadu dari NDVI, NDWI, dan BSI diperlukan untuk memahami status transisi lingkungan secara utuh (Gambar 2.14). Ketiga indeks ini saling menguatkan: NDVI mengukur pemulihan vegetatif, NDWI merepresentasikan modifikasi hidrologi (pembentukan *void*), dan BSI mengukur gangguan bentang alam.



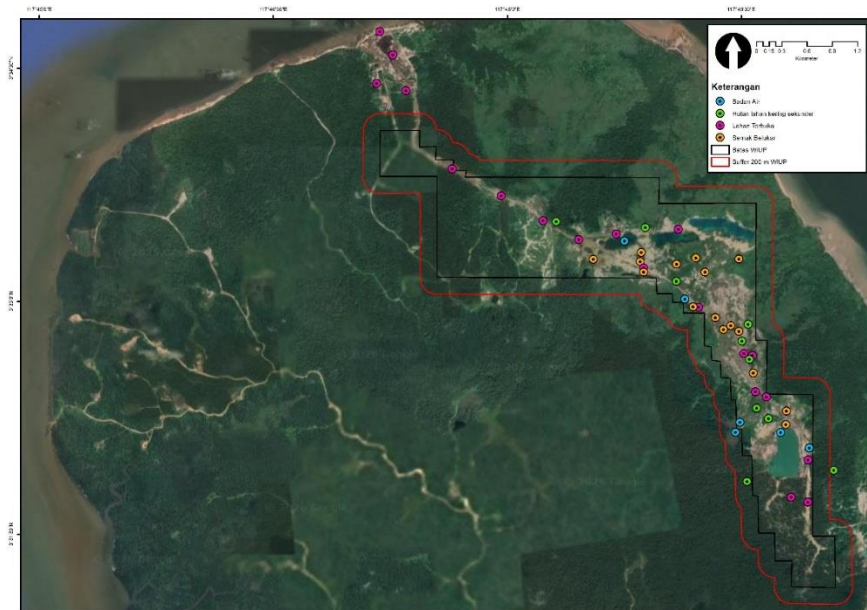
Gambar 2.14 Grafik Perbandingan Indeks

Hasil sintesis mengonfirmasi bahwa ekosistem tambang di Pulau Bunyu memiliki heterogenitas pemulihan yang sangat bervariasi. Terdapat blok-blok yang menunjukkan indikasi suksesi ekologis yang kuat (NDVI tinggi, BSI menurun, NDWI stabil di sekitar *void*), namun masih terdapat hamparan luas yang masuk dalam kategori kritis (BSI tinggi absolut). Dinamika biofisik ini memberikan bukti kuantitatif bahwa pendekatan reklamasi yang seragam (pukul rata) tidak akan efektif di pulau kecil.

Oleh karena itu, seluruh nilai dan luasan dari sintesis indeks spasial ini tidak hanya berhenti sebagai evaluasi dampak. Heterogenitas biofisik inilah yang menjadi kriteria teknis utama dalam membandingkan kesesuaian kondisi eksisting dengan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW). Selanjutnya, ketidaksesuaian antara kapasitas lahan dengan RTRW tersebut akan dijawab melalui perumusan strategi ruang rehabilitatif-produktif berbasis zonasi (menggunakan model pembobotan AHP) pada bab berikutnya, dengan prinsip menguatkan fungsi ekologis (*sequencing* awal) sebelum mengalihkan fungsi lahan menjadi ruang yang bernilai ekonomi bagi masyarakat.

2.4.4 Kesesuaian Kondisi Lahan terhadap RTRW

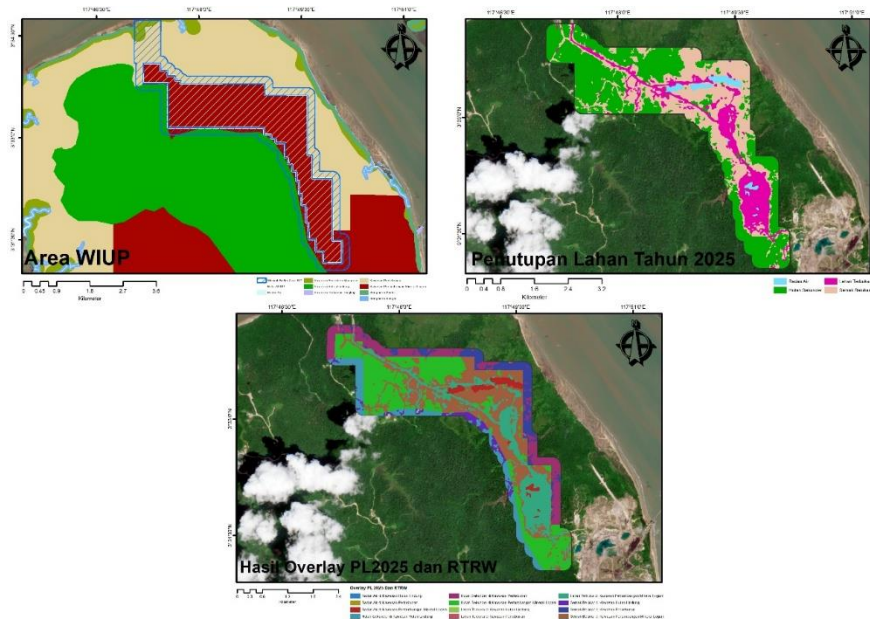
Sebagai bagian dari tahapan verifikasi spasial, dilakukan pengamatan lapangan (*ground truthing*) pada 50 titik sampel yang merepresentasikan variasi penggunaan dan tutupan lahan di wilayah PT. Garda Tujuh Buana (Gambar 2.15). Titik pengamatan mencakup area vegetasi, lahan terbuka tambang, badan air tambang (*void*), fasilitas operasional, serta zona penyangga.



Gambar 2.15 Peta Titik *Ground Check* sebanyak 50 titik yang merepresentasikan setiap tutupan lahan

Hasil pengecekan koordinat menunjukkan bahwa sebagian besar titik berada di dalam batas Izin Usaha Pertambangan (IUP). Terdapat 4 titik pengamatan yang berada di luar batas IUP, yang merupakan area fasilitas penunjang operasional perusahaan (*stockpile*, *office*, *mess* karyawan, dan *workshop*), namun area tersebut dikonfirmasi telah memiliki izin pemanfaatan secara terpisah. Selanjutnya, data tutupan lahan eksisting (*Land Use Land Cover / LULC*) tahun 2025 di-*overlay* (ditumpang-tindihkan) dengan Peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Bulungan Tahun 2021-2041 untuk mengidentifikasi tingkat kesesuaian antara fungsi ruang aktual di lapangan dengan

fungsi ruang normatif yang direncanakan oleh pemerintah daerah (Gambar 2.16).



Gambar 2.16 (A) Peta Area Wilayah IUP, (B) Peta Tutupan Lahan Tahun 2025, (C) Hasil Overlay Peta Tutupan Lahan 2025 dan RTRW Kabupaten Bulungan

2.4.4.1 Interpretasi Kesesuaian Ruang Berdasarkan *Overlay Land Use Land Cover (LULC)* dan RTRW

Hasil *overlay* menunjukkan bahwa pemanfaatan ruang di wilayah PT. Garda Tujuh Buana memiliki tingkat kesesuaian yang bervariasi. Pendekatan dalam penelitian ini tidak menilai kesesuaian secara biner (sesuai atau tidak sesuai), melainkan melihatnya sebagai sebuah spektrum perubahan lanskap dari fase terganggu menuju fase stabil (Yu et al., 2024; Krzysztofik et al., 2020). Berdasarkan pendekatan tersebut, kondisi lahan diklasifikasikan ke dalam tiga kategori:

a. Area Sesuai

Area sesuai merupakan wilayah di mana tutupan lahan aktual telah mencerminkan fungsi ruang RTRW. Pada lokasi penelitian, kategori ini didominasi oleh tutupan vegetasi sekunder yang berada di atas zona budidaya, seperti kawasan perkebunan dan area penggunaan lain. Kehadiran vegetasi ini menandakan bahwa sebagian lahan pascatambang telah mengalami suksesi alami atau keberhasilan revegetasi, sehingga kembali mendekati fungsi ruang yang diamanatkan (Wang et al., 2023).

b. Area Transisi

Area transisi adalah wilayah yang secara peruntukan RTRW berada pada zona budidaya, namun kondisi biofisik eksistingnya masih berupa semak belukar, lahan terbuka, atau area reklamasi awal (sekitar *pit*, *disposal*, dan jalur operasional). Dalam siklus pascatambang, fase ini merupakan tahap krusial di mana pemulihan struktur tanah dan hidrologi sedang berlangsung. Area ini memerlukan waktu intervensi yang tepat agar proses suksesi menuju fungsi ruang rencana tidak terhambat (Varouchakis et al., 2025).

c. Area Tidak Sesuai

Area tidak sesuai merupakan wilayah yang kondisi aktualnya bertentangan dengan fungsi RTRW. Kategori ini mencakup badan air tambang (*void*), bukaan tambang aktif, serta beberapa fasilitas operasional yang bersinggungan dengan zona lindung (seperti kawasan mangrove dan sempadan pesisir). Dalam konteks Pulau Bunyu sebagai pulau kecil, ketidaksesuaian di zona lindung pesisir ini merupakan temuan yang sangat fatal. Modifikasi topografi dan terbentuknya *void* yang berdekatan dengan kawasan mangrove dapat memicu kerentanan sistemik, seperti intrusi air laut dan abrasi pantai. Konflik pemanfaatan ruang inilah yang merepresentasikan "titik kritis" dari aktivitas tambang di wilayah kepulauan (Yu et al., 2024).

2.4.4.2 Implikasi Keruangan sebagai Dasar Strategi Pascatambang

Hasil evaluasi di atas membuktikan bahwa lanskap Pulau Bunyu saat ini berada dalam kondisi yang sangat dinamis. Area sesuai menggambarkan stabilitas parsial, area transisi menunjukkan proses pemulihan yang masih rentan, sedangkan area tidak sesuai (terutama keberadaan *void* dan perambahan area lindung) mengonfirmasi adanya kerusakan daya dukung lahan yang membutuhkan kompromi penyelesaian keruangan.

Kondisi ketidaksesuaian dan transisi inilah yang menjadi landasan utama (dasar permasalahan) untuk merumuskan model strategi perencanaan pascatambang di Bab III. Strategi yang akan dikembangkan difokuskan pada konsep ruang rehabilitatif-produktif berbasis zonasi. Mengingat tingginya persentase area kritis di pulau kecil ini, strategi perencanaannya memiliki ciri khusus berupa *sequencing* (pengurutan prioritas). Artinya, model *Analytical Hierarchy Process* (AHP) nantinya akan dikondisikan untuk menguatkan pilar Lingkungan terlebih dahulu (pemulihan stabilitas area "tidak sesuai" dan "transisi") sebagai prasyarat mutlak, sebelum kompromi dapat dilakukan pada sisi Ekonomi (pemanfaatan produktif di area "sesuai").

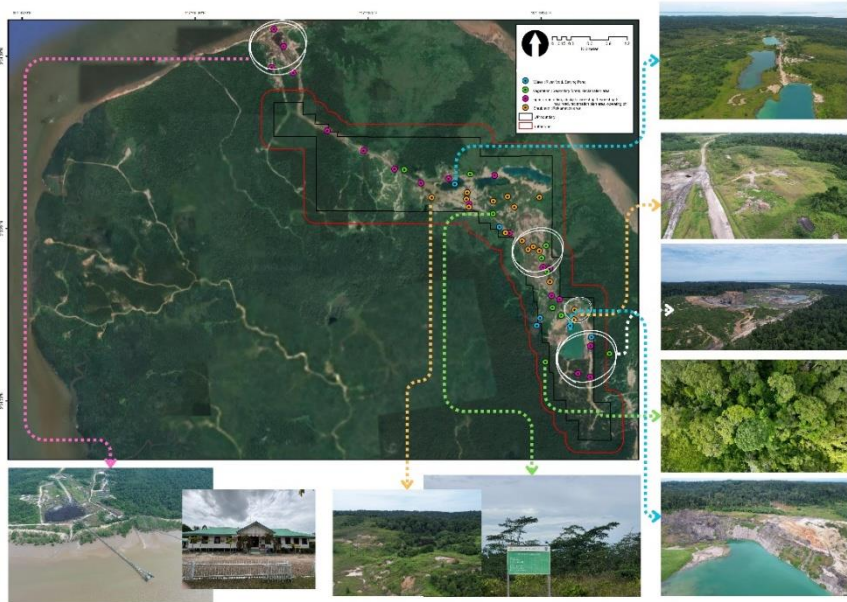
3.4.5 Validasi Data Spasial

Validasi dilakukan untuk menilai tingkat keandalan hasil klasifikasi tutupan lahan dan analisis indeks spasial NDVI, NDWI, dan BSI sehingga representatif terhadap kondisi biofisik aktual di wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana. Validasi dilakukan melalui tiga pendekatan, yaitu verifikasi lapangan (*ground truth*), pengujian statistik menggunakan *confusion matrix*, serta perbandingan dengan data sekunder.

2.4.4.3 Verifikasi Lapangan (*Ground Truth*)

Verifikasi lapangan dilakukan untuk menilai kesesuaian hasil klasifikasi tutupan lahan berbasis citra satelit terhadap kondisi aktual di wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana. Kegiatan ini berfungsi sebagai pembuktian empiris bahwa kelas tutupan lahan yang dihasilkan dari algoritma Random Forest benar-benar merepresentasikan kondisi biofisik lapangan. Pengambilan titik sampel dilakukan menggunakan metode *stratified purposive sampling* agar setiap kelas tutupan lahan memiliki keterwakilan yang proporsional.

Sebanyak 50 titik *ground truth* diambil pada berbagai tipe tutupan lahan meliputi area tambang/*overburden*, semak belukar, hutan lahan kering sekunder, dan badan air (*void*). Setiap titik dicatat koordinatnya, didokumentasikan secara visual, serta dideskripsikan kondisi biofisiknya. Hal tersebut ditampilkan pada Gambar 2.17. Data ini kemudian digunakan sebagai referensi perbandingan terhadap hasil klasifikasi citra dan analisis indeks spasial.



Gambar 2.17 Peta Hasil *Ground Truth* dengan dokumentasi representasi bentuk tutupan lahan dan penggunaan lahan di lapangan

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar titik pengamatan memiliki kesesuaian yang tinggi dengan kelas tutupan lahan hasil klasifikasi. Area tambang dan timbunan *overburden* teridentifikasi sebagai permukaan tanah terbuka dengan warna abu-abu hingga coklat gelap, bertekstur kasar, serta minim vegetasi penutup. Kondisi tersebut konsisten dengan nilai NDVI rendah dan nilai BSI tinggi, yang merupakan karakteristik khas lahan tambang terbuka. Pada beberapa bagian *dump* ditemukan pertumbuhan vegetasi pionir secara sporadis, menunjukkan fase awal suksesi alami menuju proses revegetasi.

Pada kelas semak belukar, lapangan menunjukkan vegetasi perdu dan semak dengan kerapatan sedang serta tajuk tidak seragam. Secara spektral area ini memiliki nilai NDVI menengah dan BSI sedang, menandakan fase pemulihan vegetasi awal. Zona ini umumnya berada pada area transisi antara tambang aktif dan vegetasi alami, sehingga menjadi sumber kesalahan klasifikasi yang paling sering terjadi akibat kemiripan karakter spektral dengan hutan sekunder.

Kelas hutan lahan kering sekunder memperlihatkan kanopi rapat dan berlapis dengan dominasi pohon berukuran sedang hingga besar. Area ini memiliki nilai NDVI tinggi dan stabil serta nilai BSI rendah, sehingga mudah dibedakan dari kelas lain. Vegetasi pada zona ini berfungsi sebagai referensi kondisi ekologis alami yang relatif tidak terganggu oleh aktivitas pertambangan.

Sementara itu, badan air (*void*) tampak sebagai genangan permanen dengan batas tegas terhadap daratan sekitarnya. Area ini memiliki nilai NDWI tinggi dan NDVI negatif, sehingga secara spektral sangat kontras dengan kelas vegetasi maupun lahan terbuka. Keberadaan void memperlihatkan perubahan morfologi lahan akibat aktivitas penambangan dan menjadi indikator penting dalam interpretasi dinamika hidrologi kawasan tambang.

Secara keseluruhan, hasil *ground truth* mengonfirmasi bahwa pola spasial tutupan lahan yang dihasilkan dari klasifikasi citra telah merepresentasikan kondisi lapangan dengan baik. Perbedaan interpretasi terutama terjadi pada zona transisi antara belukar dan hutan sekunder, yang secara ekologis berada dalam tahapan suksesi vegetasi yang berdekatan. Oleh karena itu, data *ground truth* selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *confusion matrix* untuk mengukur tingkat akurasi klasifikasi secara kuantitatif.

2.4.4.4 Validasi Statistik

Setelah dilakukan verifikasi lapangan, akurasi klasifikasi tutupan lahan selanjutnya diuji secara kuantitatif menggunakan *confusion matrix*. Pengujian ini bertujuan untuk menilai kesesuaian antara kelas tutupan lahan hasil klasifikasi citra dengan data referensi lapangan sehingga tingkat keandalan model klasifikasi dapat diketahui secara objektif . Tabel akurasi dapat dilihat pada Tabel 2.12

Tabel 2.12 Tabel Uji Akurasi

Hasil Interpretasi Citra Tahun 2025	Reference	Prediction				Producer SUM	Producer Accuracy %
		Badan Air	Hutan Sekunder	Lahan Terbuka	Semak Belukar		
	Badan Air	4	1	0	0	5	80
	Hutan Sekunder	0	5	0	0	5	100
	Lahan Terbuka	0	1	4	0	5	80
	Semak Belukar	0	0	1	4	5	80
	User SUM	4	7	5	4		
	User Accuracy %	100	71.43	80	100		

Tabel 2.12 *Confusion Matrix* Klasifikasi Tutupan Lahan

Perhitungan Akurasi Klasifikasi

a. Overall Accuracy (OA)

Overall Accuracy menunjukkan persentase jumlah sampel yang terklasifikasi dengan benar dibandingkan total sampel pengujian.

$$OA = \frac{\sum X_{ii}}{N} \times 100\%$$

Keterangan:

X_{ii} = jumlah nilai diagonal pada confusion matrix

N = total seluruh sampel validasi

Berdasarkan tabel confusion matrix:

$$OA = \frac{4 + 5 + 4 + 4}{20} \times 100\%$$

$$OA = \frac{17}{20} \times 100\% = 85\%$$

b. *Producer Accuracy (PA)*

Producer Accuracy menunjukkan kemungkinan suatu kelas referensi lapangan diklasifikasikan dengan benar oleh model.

$$PA_i = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100\%$$

Keterangan:

X_{ii} = nilai diagonal kelas ke-i

X_{+i} = total kolom kelas referensi ke-i

Badan Air

$$PA = \frac{4}{5} \times 100\% = 80\%$$

Hutan Sekunder

$$PA = \frac{5}{5} \times 100\% = 100\%$$

Lahan Terbuka

$$PA = \frac{4}{5} \times 100\% = 80\%$$

Semak Belukar

$$PA = \frac{4}{5} \times 100\% = 80\%$$

c. *User Accuracy (UA)*

User Accuracy menunjukkan tingkat kepercayaan bahwa piksel hasil klasifikasi benar-benar mewakili kelas tersebut di lapangan.

$$UA_i = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \times 100\%$$

Keterangan:

X_{ii} = nilai diagonal kelas ke-i

X_{i+} = total baris kelas hasil klasifikasi

Badan Air

$$UA = \frac{4}{4} \times 100\% = 100\%$$

Hutan Sekunder

$$UA = \frac{5}{7} \times 100\% = 71,43\%$$

Lahan Terbuka

$$UA = \frac{4}{5} \times 100\% = 80\%$$

Semak Belukar

$$UA = \frac{4}{4} \times 100\% = 100\%$$

d. *Kappa Coefficient*

Koefisien Kappa digunakan untuk menilai tingkat kesepakatan klasifikasi dengan mempertimbangkan kemungkinan kesesuaian acak.

$$\kappa = \frac{N \sum X_{ii} - \sum (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum (X_{i+} X_{+i})}$$

Dimana:

N = jumlah sampel

X_{i+} = total baris

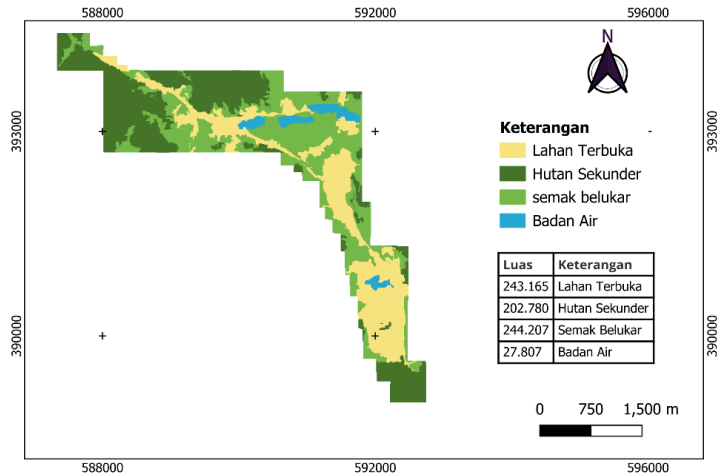
X_{+i} = total kolom

Berdasarkan perhitungan diperoleh:

$$\kappa = 0,8$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai Overall Accuracy = 85%, Kappa Index = 0.80, dan rata-rata F1-score = 0.853. adapun kelas yang menjadi bagian dari klasifikasi yaitu lahan terbut seluas 243,16 Ha, hutan sekunder 202,78 Ha, semak belar 244,20 Ha dan Badan Air

27,80. Nilai ini menunjukkan bahwa klasifikasi tutupan lahan memiliki tingkat ketelitian yang baik dan dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara memadai. Nilai kappa mendekati 0,80 mengindikasikan tingkat kesesuaian kuat antara hasil klasifikasi dan data referensi, sehingga hasil interpretasi citra layak digunakan untuk analisis perubahan lahan. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Hasil Klasifikasi RF

Secara per kelas tutupan lahan, tingkat ketelitian menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh karakteristik spektral masing-masing kelas. Kelas hutan sekunder memiliki *Producer Accuracy* tertinggi sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa kelas ini dapat dikenali dengan sangat baik oleh model berdasarkan data referensi.

Kelas badan air dan semak belukar menunjukkan *User Accuracy* sebesar 100%, yang berarti hasil klasifikasi pada kelas tersebut memiliki tingkat kepercayaan tinggi terhadap kondisi lapangan. Hal ini disebabkan karakter spektral badan air yang sangat khas (reflektansi rendah) serta semak belukar yang cukup berbeda dari lahan terbuka.

Sebaliknya, kelas hutan sekunder memiliki *User Accuracy* lebih rendah (71,43%), yang menunjukkan adanya kesalahan klasifikasi, terutama pada area transisi antara hutan sekunder dan semak belukar. Kondisi ini umum terjadi pada lanskap pascatambang karena kedua kelas tersebut berada dalam tahapan suksesi vegetasi yang berdekatan sehingga memiliki kemiripan karakter spektral.

Kelas lahan terbuka menunjukkan akurasi yang cukup baik (PA dan UA sebesar 80%), yang mencerminkan bahwa meskipun memiliki kontras spektral yang jelas terhadap vegetasi, masih terdapat sebagian piksel yang mengalami kesalahan klasifikasi akibat heterogenitas material permukaan tambang.

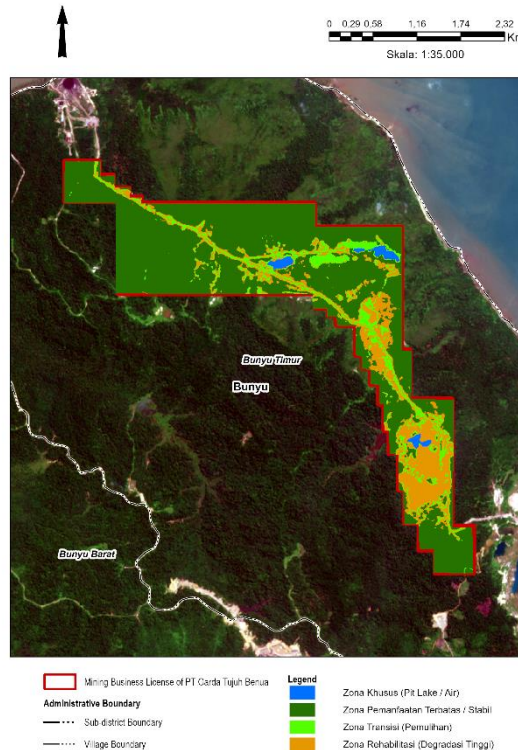
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa algoritma *Random Forest* memiliki performa yang baik dalam membedakan kelas tutupan lahan, terutama pada kelas dengan kontras spektral tinggi. Meskipun terdapat keterbatasan pada kelas vegetasi transisional, nilai akurasi keseluruhan yang tinggi (>85%) menunjukkan bahwa peta tutupan lahan yang dihasilkan cukup representatif dan layak digunakan sebagai dasar dalam analisis perubahan kondisi lahan dan perencanaan pemanfaatan ruang pascatambang.

2.5 Sintesis Indikator Biofisik Lahan Pascatambang

Analisis kondisi biofisik lahan pascatambang pada penelitian ini tidak hanya dievaluasi secara parsial, melainkan disusun secara terintegrasi melalui proses sintesis spasial. Penggabungan multi-indikator, yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *Bare Soil Index* (BSI), serta karakteristik topografi, diperlukan karena setiap indeks memiliki keterbatasan jika diinterpretasikan secara tunggal. Melalui sintesis ini, NDVI difungsikan untuk merepresentasikan tingkat keberhasilan revegetasi, NDWI memetakan modifikasi hidrologi (*void*), dan BSI mengukur tingkat degradasi fisik akibat bukaan tambang. Kombinasi ini menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai tingkat kesiapan ekologis lahan (Chen et al., 2025; Guzy et al., 2025).

Hasil sintesis menunjukkan interaksi biofisik yang khas pada lanskap tambang di Pulau Bunyu. Penurunan nilai NDVI yang secara bersamaan diikuti oleh peningkatan absolut pada NDWI dan BSI mengonfirmasi terjadinya pergeseran fungsi ruang secara masif—dari ekosistem hutan menjadi area terbuka dan cekungan genangan permanen (*pit lake/void*). Dalam konteks kepulauan kecil, interaksi ketiga elemen ini sangat krusial. Kelembapan yang direpresentasikan oleh NDWI di sekitar *void* terbukti menjadi faktor pengontrol hidrologi mikro yang mendukung suksesi dan pertumbuhan kembali vegetasi (NDVI) di area transisi (Witkowski et al., 2025; Blanche et al., 2024).

Untuk menghindari fragmentasi interpretasi dari kompleksitas parameter tersebut, seluruh hasil analisis disederhanakan ke dalam klasifikasi zonasi utama (Gambar 2.16). Penyederhanaan ini bertujuan agar data biofisik tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi dapat ditranslasikan secara operasional ke dalam perencanaan tata ruang.



Gambar 2.16 Peta Zonasi Pemanfaatan Lahan Pascatambang

Berdasarkan hasil sintesis, wilayah penelitian terbagi ke dalam empat zona utama keruangan, yaitu:

1. **Zona Rehabilitasi:** Ditandai oleh kondisi lahan kritis dengan nilai BSI tinggi absolut, serta NDVI dan NDWI rendah. Area ini merupakan pusat bukaan tambang yang terdegradasi sehingga menuntut intervensi perbaikan sipil-teknis dan pemulihan tanah secara intensif.
2. **Zona Transisi:** Ditandai oleh nilai NDVI sedang dan peningkatan kelembapan tanah yang mengindikasikan berlangsungnya proses suksesi awal. Area ini memerlukan pengelolaan pemeliharaan sebelum dapat dimanfaatkan lebih lanjut.
3. **Zona Pemanfaatan:** Area dengan kondisi biofisik yang telah stabil, ditandai oleh NDVI tinggi dan struktur tanah yang membaik. Zona ini memiliki kapasitas pendukung ekologis untuk dikembangkan menjadi lahan produktif bernilai ekonomi, seperti *agroforestry*.
4. **Zona Khusus (Pit Lake/Void):** Area cekungan genangan dengan nilai NDWI tinggi. Karakteristik hidrologisnya menuntut pendekatan spesifik sebagai reservoir air tawar. Mengingat keterbatasan sumber air di pulau kecil, zona ini harus diprioritaskan untuk konservasi tata air permukaan dan perlindungan kualitas mutu air (Silvia et al., 2025).

Hasil sintesis zonasi ini membuktikan bahwa lanskap pascatambang memiliki tingkat kesiapan ekologis yang sangat heterogen, sehingga strategi pemanfaatannya tidak dapat dilakukan secara seragam (pukul rata). Pendekatan ini sejalan dengan konsep perencanaan berbasis kesesuaian lahan (*land suitability*), di mana fungsi ruang ditentukan secara objektif berdasarkan daya dukung aktualnya (Anugrah, 2025).

Lebih dari itu, empat pembagian zona di atas tidak hanya sekadar merepresentasikan kondisi eksisting. Pembagian zonasi ini akan digunakan secara langsung sebagai dasar penyusunan identifikasi faktor internal (kekuatan/kelemahan lahan) pada analisis SWOT di Bab III. Selain itu, proporsi area kritis (Zona Rehabilitasi) dibandingkan area stabil (Zona Pemanfaatan) ini akan menjadi acuan utama dalam menentukan urutan prioritas atau *sequencing* pada model pembobotan *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Dengan demikian, strategi perencanaan tata ruang pascatambang yang akan dirumuskan berbasis pada penyelesaian masalah biofisik faktual di lapangan.

2.6 Kesimpulan

Berdasarkan analisis penginderaan jauh multitemporal (1990–2025), lanskap wilayah IUP PT. Garda Tujuh Buana di Pulau Bunyu telah mengalami transformasi masif dari ekosistem hutan alami menjadi kawasan industri ekstraktif. Perubahan ini ditandai dengan deforestasi pada fase awal, fluktuasi lahan terbuka selama masa produksi, hingga terbentuknya bentang alam buatan berupa cekungan tambang permanen (*void*). Dalam konteks pulau kecil yang memiliki daya dukung ruang terbatas, keberadaan *void* dan meluasnya lahan terbuka ini secara langsung telah mengubah sistem hidrologi dan stabilitas biofisik pulau, sehingga menuntut perencanaan pascatambang yang tidak sekadar reklamasi biasa.

Penerapan algoritma *Random Forest* yang dikombinasikan dengan pendekatan *Object-Based Image Analysis* (OBIA) terbukti sangat efektif dalam memetakan lanskap tambang yang terfragmentasi ini. Dengan capaian *Overall Accuracy* sebesar 85%, *Kappa Index* 0,80, dan rata-rata *F1-score* 0,853, metode ini mampu mendiskriminasi kelas tutupan lahan dengan presisi tinggi, terutama memanfaatkan karakteristik reflektansi pada *band Near-Infrared* (NIR). Tingkat keandalan statistik ini memvalidasi bahwa peta tutupan lahan yang dihasilkan sangat representatif dan objektif untuk dijadikan *baseline data* kuantitatif.

Hasil klasifikasi tersebut divalidasi lebih lanjut melalui sintesis indeks biofisik (NDVI, NDWI, dan BSI) serta *overlay* terhadap Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW). Hasilnya menunjukkan bahwa kondisi lahan pascatambang saat ini sangat heterogen—terbagi ke dalam area sesuai, area transisi, dan area tidak sesuai. Terdapat blok lahan yang telah menunjukkan proses suksesi vegetasi (NDVI meningkat, BSI menurun), namun di sisi lain terdapat benturan keruangan, terutama keberadaan *void* dan fasilitas tambang yang berstatus "tidak sesuai" dengan fungsi zona budidaya maupun pesisir pada RTRW.

Secara keseluruhan, dinamika dan heterogenitas biofisik yang dievaluasi pada bab ini tidak sekadar berfungsi sebagai pelaporan dampak lingkungan. Temuan mengenai luasan area transisi dan tidak sesuai inilah yang selanjutnya akan digunakan sebagai kriteria teknis utama dalam perumusan strategi pada Bab III. Untuk merespons kerentanan pulau kecil tersebut, penyusunan tata ruang pascatambang selanjutnya akan dimodelkan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang berfokus pada ruang rehabilitatif-produktif berbasis zonasi. Strategi ini secara spesifik akan menerapkan pendekatan *sequencing* (pengurutan prioritas), yaitu menguatkan pemulihan fungsi ekologis dasar terlebih dahulu sebagai prasyarat mutlak, sebelum lahan dikompromikan untuk pemanfaatan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan.

2.7 Daftar Pustaka

- Ardiansyah, M., Thahjono, B., & Oktaviani, N. D. (2025). Analisis perbandingan parameter segmentasi dalam klasifikasi berbasis objek untuk penutupan/penggunaan lahan di Kabupaten Sumedang. *Journal of Soil Science and Environment (Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan)*, 27(2).
- Ayuningtyas, E. A. (2023). Pengaruh morfologi terhadap karakter fisika-kimia tanah di lingkungan pertambangan. *Agrovital*, 8(2), 174–179.
- Chen, D., Wang, Y., Shen, Z., Liao, J., Chen, J., & Sun, S. (2021). Long time-series mapping and change detection of coastal zone land use based on Google Earth Engine and multi-source data fusion. *Remote Sensing*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/rs14010001>
- Dong, S., Chen, Z., Gao, B., Guo, H., Sun, D., & Pan, Y. (2020). Stratified even sampling method for accuracy assessment of land use/land cover classification: A case study of Beijing, China. *International Journal of Remote Sensing*, 41(16), 6427–6443. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1739352>
- Ebrahimi, A., Zolfaghari, F., Ghodsi, M., & Narmashiri, F. (2024). Menilai akurasi indeks spektral yang diperoleh dari citra Sentinel menggunakan penelitian lapangan untuk memperkirakan degradasi lahan. *PLOS ONE*, 19(7), Article e0305758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305758>
- Fikri, A. A. (2022). *Pemanfaatan citra satelit multi-sensor dalam pemantauan tutupan lahan di Taman Hutan Raya Wan Abdul Rachman* [Disertasi Doktorat, Universitas Lampung].
- Hamid, I., Priatna, S. J., & Hermawan, A. (2019). Karakteristik beberapa sifat fisika dan kimia tanah pada lahan bekas tambang timah. *Jurnal Penelitian Sains*, 19(1), 23–31.
- Harmoko, J., Munibah, K., & Ardiansyah, M. (2025). Klasifikasi penutupan/penggunaan lahan dari citra Landsat 8 dengan pendekatan random forest dan support vector machine di Kabupaten Sumedang, Jawa Barat. *Journal of Soil Science and Environment (Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan)*, 27(1).
- He, Y., Lai, Y., Chen, B., Chen, Y., Xie, Z., Yu, X., & Luo, M. (2024). An open-pit mines land use classification method based on random forest using UAV: A case study of a ceramic clay mine. *Minerals*, 14(12), Article 1282. <https://doi.org/10.3390/min14121282>
- Husna, V. N., & Fawzi, N. I. (2022). Aplikasi algoritma Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dan Bare Soil Index (BSI) dalam penilaian kerapatan vegetasi dan produktivitas di Pulau Burung. *Jurnal Geo-Gambar*, 11(2), 198–204.
- Khanyile, S. (2024). A comparison of the efficacy of fuzzy overlay and random forest classification for mapping and shaping perceptions of the post-mining landscape of Gauteng, South Africa. *Land*, 13(11), Article 1761. <https://doi.org/10.3390/land13111761>

- Kurniawan, D. (2025). *PT Mineral Sumberdaya Mandiri Tbk: Eksplorasi kekayaan tersembunyi dan strategi pengembangan mineral*. Penerbit Afdan Rojabi.
- Lamsal, K., Malenovsky, Z., Woodgate, W., Waterman, M., Brodribb, T. J., & Aryal, J. (2022). Spectral retrieval of eucalypt leaf biochemical traits by inversion of the Fluspect-Cx model. *Remote Sensing*, 14(3), Article 567. <https://doi.org/10.3390/rs14030567>
- Lusia, M., Astuti, D. T., & Sofian, A. (2023). Kajian pemanfaatan lahan reklamasi pasca tambang sebagai lahan pertanian. *Klorofil*, 18(1), 30–32.
- Qin, Y., Cao, L., Darvishi Bolorani, A., & Wu, W. (2021). High-resolution mining-induced geo-hazard mapping using random forest: A case study of Liaojiaping Orefield, central China. *Remote Sensing*, 13(18), Article 3638. <https://doi.org/10.3390/rs13183638>
- Rachman, A., Sutono, I., & Suastika, I. W. (2017). Indikator kualitas tanah pada lahan bekas penambangan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 1–10.
- Rohman, M. S., Afrinaldi, A., Syauqani, A., & Safira, M. (2025). Prediksi perubahan tutupan lahan di Kabupaten Bogor tahun 2026 menggunakan random forest dengan citra satelit Sentinel-2 terklasifikasi. *Tunas Agraria*, 8(2), 192–218.
- Sang, X., Guo, Q., Wu, X., Xie, T., He, C., Zang, J., ... & Li, Y. (2021). The effect of DEM on the land use/cover classification accuracy of Landsat OLI images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(7), 1507–1518. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01332-9>
- Song, Z., Yang, X., Zhang, H., Gao, Z., & Ge, Y. (2024). How does coal mining affect land use in townships? A perspective of land use transition. *Journal of Cleaner Production*, 475, Article 143662. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143662>
- Suprojo, B., & Muhammad, A. (2024). Evaluasi time series kesesuaian penggunaan lahan menggunakan GIS: Studi kasus rencana detail tata ruang di Prambanan Kabupaten Sleman. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*, 21(2), 82–93.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Waladi, A. (2025). Peningkatan akurasi klasifikasi tutupan lahan menggunakan random forest pada data Sentinel-2 di Jambi. *Jurnal Fasilkom*, 15(1), 17–24.
- Worden, S., Svobodova, K., Côte, C., & Bolz, P. (2024). Regional post-mining land use assessment: An interdisciplinary and multi-stakeholder approach. *Resources Policy*, 89, Article 104680. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104680>
- Yuliana, H., & Rizqiana, Z. C. H. (2024). Analisis metode klasifikasi pemetaan tutupan lahan (land cover) di area Kota Bandung menggunakan algoritma random forest pada Google Earth Engine. *Epsilon: Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, 22(2), 97–106.

Zhang, M., He, T., Li, G., Xiao, W., Song, H., Lu, D., & Wu, C. (2021). Continuous detection of surface-mining footprint in copper mine using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(21), Article 4273. <https://doi.org/10.3390/rs13214273>