

Integrasi Metode *Random Forest* dan *Spectral Similarity Indeks* pada Citra Landsat untuk Identifikasi Area Tambang di Kota Samarinda dan Sekitarnya

Angger Putri Mahanani^{1)*}, M. Dio Ridlo Febrian¹⁾, Ajeng Diah Pramesti¹⁾, Destia Amandha¹⁾, Panggea Ghiyats Sabrian¹⁾

¹⁾ Fakultas Teknik /Program Studi Teknik Geologi, Universitas Mulawarman

E-mail: anggerpmahanani@gmail.com

ABSTRAK

Pertumbuhan aktivitas pertambangan batubara di Kota Samarinda menyebabkan perubahan tutupan lahan yang cepat dan berdampak pada kondisi lingkungan dan geologi permukaan. Penginderaan jauh menjadi metode yang efisien untuk memantau perubahan tersebut karena mampu menyediakan data spasial luas dan konsisten secara temporal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan pendekatan pemetaan area tambang yang lebih akurat melalui integrasi algoritma *Random Forest* (RF) dan Analisis Kesamaan Indeks Spektral pada citra Landsat 9 tahun 2024. Tahap pertama menggunakan RF untuk memetakan lima kelas utama tutupan lahan, yaitu hutan, tanaman pangan, urban, badan air, dan lahan terbuka. Algoritma RF menunjukkan performa tinggi dengan Akurasi Keseluruhan 94,7% dan Koefisien Kappa 0,92. Namun, kelas lahan terbuka masih menunjukkan spectral confusion dengan area tambang karena kemiripan reflektansi pada kanal merah-SWIR. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, tahap kedua menerapkan analisis berbasis NDVI, NDBI, dan BSI khusus pada area lahan terbuka untuk membedakan tambang aktif dari permukaan non-tambang. Logika spektral NDVI rendah ($<0,25$), BSI tinggi, dan $BSI > NDBI$ terbukti efektif dalam mengidentifikasi karakteristik overburden dan permukaan tambang yang kering. Hasil integrasi kedua metode ini meningkatkan konsistensi pemetaan dan menghasilkan Akurasi Keseluruhan 91,7% pada proses validasi. Pemetaan akhir menunjukkan luas area tambang yang teridentifikasi pada tahun 2024 mencapai 4.246,26 hektar atau sekitar 5,9% dari total luas administrasi Kota Samarinda. Distribusi tambang terkonsentrasi pada bagian timur, selatan, dan sebagian barat kota, merefleksikan intensitas aktivitas pertambangan pada litologi Formasi Balikpapan dan Pulau Balang. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan hibrida RF dan Indeks Spektral mampu meningkatkan ketelitian pemisahan area tambang dan dapat dijadikan dasar untuk pemantauan spasial tambang secara berkelanjutan.

Kata Kunci: *Random Forest, Spectral Index, Mining, Landsat, Samarinda*

ABSTRACT

The growth of coal mining activity in Samarinda City has led to rapid land cover changes, impacting environmental conditions and surface geology. Remote sensing is an efficient method for monitoring these changes because it provides extensive spatial and temporally consistent data. This research aims to develop a more accurate mining area mapping approach by integrating the Random Forest algorithm and Spectral Index Similarity Analysis on Landsat 9 imagery from 2024. The first phase used Random Forest to map five main land cover classes: forests, crops, urban areas, water bodies, and bare land. The Random Forest algorithm demonstrated high performance with an Overall Accuracy of 94.7% and a Kappa Coefficient of 0.92. However, the bare land class still exhibited spectral confusion with mining areas due to similar reflectance in the red-SWIR channel. To address this limitation, the second phase applied NDVI, NDBI, and BSI-based analysis specifically to bare land areas to distinguish active mines from non-mining surfaces. The spectral logic of low NDVI (<0.25), high BSI, and $BSI > NDBI$ has proven effective in identifying overburden characteristics and dry mining surfaces. The final mapping showed that the identified mining area in 2024 reached 4,246.26 hectares, or approximately 5.9% of the total administrative area of Samarinda City. Coal mines are concentrated in the eastern, southern, and partly western parts of the city, reflecting the intensity of mining activity in the Balikpapan Formation and Pulau Balang Formation lithologies. These findings demonstrate that the hybrid Random Forest and Spectral Index approach can improve the accuracy of mining area separation and can serve as a basis for continuous coal mining spatial monitoring.

Keyword: *Random Forest, Spectral Index, Mining, Landsat, Samarinda*

1. Pendahuluan

Pertambangan merupakan salah satu sektor yang berperan penting dalam pembangunan ekonomi daerah, termasuk di wilayah Kalimantan Timur, khususnya Kota Samarinda. Namun, aktivitas pertambangan juga menimbulkan perubahan signifikan terhadap lingkungan, terutama terhadap tutupan lahan, vegetasi, dan kondisi permukaan tanah (1). Salah satu metode yang digunakan dalam pemantauan aktivitas pertambangan, baik pada tahap eksplorasi, eksploitasi, maupun pascatambang, adalah teknologi penginderaan jauh. Penginderaan jauh merupakan ilmu dan seni dalam memperoleh informasi tentang objek, daerah, atau gejala dengan menganalisis data yang diperoleh melalui alat tanpa kontak langsung terhadap objek tersebut (2).

Pemanfaatan citra satelit dalam kajian pertambangan sangat penting karena mampu memberikan informasi spasial yang luas dan temporal, sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan lahan tambang dari waktu ke waktu. Dengan berkembangnya teknologi cloud computing, analisis citra satelit kini dapat dilakukan secara efisien melalui platform *Google Earth Engine* (GEE), yang menyediakan akses terhadap berbagai dataset penginderaan jauh seperti Landsat dan Sentinel (3). Metode *machine learning* merupakan pendekatan komputasional yang saat ini banyak digunakan dalam klasifikasi citra penginderaan jauh. Salah satu algoritma yang populer adalah *Random Forest* (RF), yang bekerja dengan membangun banyak pohon keputusan (*decision tree*) dan menghasilkan keputusan akhir berdasarkan suara mayoritas dari seluruh pohon (4). Penginderaan jauh memerlukan pemilihan metode klasifikasi yang tepat agar hasilnya akurat. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah pengklasifikasi *Random Forest*, yang mampu mengatasi masalah *nonlinieritas*, ketidakseimbangan data, serta tingginya dimensi variabel, sehingga menghasilkan klasifikasi tutupan lahan yang andal dan efisien (5). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode RF mampu memberikan hasil yang sangat baik pada klasifikasi tutupan lahan tambang. Misalnya dalam penelitian sebelumnya memperoleh nilai akurasi keseluruhan sebesar 92,38 % dan koefisien Kappa 0,90 dalam pemetaan kawasan tambang menggunakan kombinasi parameter spektral dan tekstural (6).

Samarinda adalah ibu kota provinsi Kalimantan Timur dan pusat kegiatan ekonomi serta sosial. Samarinda terletak di Kutai Basin. Kutai Basin adalah salah satu cekungan sedimen terbesar di Indonesia dengan aktivitas pertambangan paling aktif. Kota Samarinda berada di cekungan ini sehingga memiliki dinamika spasial yang kompleks akibat pertambangan batu bara. Kutai Basin terdiri dari beberapa formasi, yaitu Formasi Pamaluan, Formasi Babuluh, Formasi Pulau Balang, Formasi Balikpapan, dan Formasi Kampung Baru (7). Dari formasi-formasi tersebut, formasi yang mengandung batu bara secara spesifik adalah Formasi Pulau Balang, Formasi Balikpapan, dan Formasi Kampung Baru. Ketiga formasi tersebut membentuk litologi wilayah Samarinda, yang membuat kota ini sering berinteraksi dengan kegiatan pertambangan batu bara, yang menyebabkan perubahan penggunaan lahan dan dampak lingkungan yang signifikan (8).

Salah satu tantangan dalam perencanaan dan pengelolaan lingkungan serta perencanaan tata ruang adalah perubahan dinamis penggunaan lahan. Remote sensing menyediakan pengamatan multitemporal dan area luas yang sangat berguna: arsip resolusi menengah seperti Landsat (yang kini dilanjutkan dengan produk Landsat-9) banyak digunakan untuk pemantauan LULC karena rekam jejaknya yang panjang dan pita spektral yang konsisten (9). Platform berbasis *cloud* seperti *Google Earth Engine* (GEE) memungkinkan pemrosesan cepat dan skala besar LULC serta alur klasifikasi berbasis pembelajaran mesin (10). Masalah ilmiah yang berkelanjutan adalah kebingungan spektral; bahan permukaan yang berbeda (misalnya timbunan tambang terbuka, tanah aluvial kering, dan beberapa permukaan buatan yang terang seperti atap atau beton) dapat menunjukkan reflektansi yang serupa, sehingga klasifikator berbasis piksel sering bingung membedakannya (11).

Aturan berbasis indeks spektral (contoh indeks yang menonjolkan tanah kosong atau permukaan terbangun) dapat membantu memisahkan kelas, tetapi jika digunakan sendiri mungkin menghasilkan positif palsu (misalnya, atap yang terang atau tanah kering yang salah teridentifikasi sebagai area tambang) (12). Oleh karena itu, studi terkini mengombinasikan RF dengan fitur spektral tambahan, informasi temporal, segmentasi, atau penapisan pasca berbasis indeks untuk meningkatkan diskriminasi antara lahan tambang dan bukan tambang yang tandus (13)(8). Dengan mempertimbangkan hal tersebut, studi ini mengajukan alur kerja hibrida dua tahap: 1) menggunakan *Random Forest* sebagai filter konteks kasar untuk memetakan kelas dominan (vegetasi, air, perkotaan) dan mengisolasi piksel lahan tandus ambigu ke dalam satu kelas tunggal "*Barren*"; dan 2) menerapkan analisis kesamaan indeks spektral yang transparan (aturan kotak kaca menggunakan indeks seperti NDVI / NDBI / BSI secara logika) hanya dalam masking lahan tandus ambigu untuk membedakan secara andal area tambang sebenarnya dari permukaan tandus lain. Pendekatan RF kemudian Kesamaan

Spektral ini memanfaatkan kekuatan RF dalam pemisahan kontekstual sekaligus mempertahankan interpretabilitas melalui aturan spektral eksplisit, yang memungkinkan pemantauan yang dapat direproduksi dan berjalan seri waktu di lanskap pertambangan yang dinamis.

2. Metode Penelitian

Tahap pertama menggunakan RF untuk memetakan lima kelas utama tutupan lahan, yaitu hutan, tanaman pangan, urban, badan air, dan lahan terbuka. Namun, kelas lahan terbuka masih menunjukkan spectral confusion dengan area tambang karena kemiripan reflektansi pada kanal merah–SWIR. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, tahap kedua menerapkan analisis berbasis NDVI, NDBI, dan BSI khusus pada area lahan terbuka untuk membedakan tambang aktif dari permukaan non-tambang.

A. Data dan Wilayah Studi

Sub-Bab Penelitian ini menggunakan citra Landsat 9 Collection 2 Level 2 Tier 1 tahun 2024 (1 Januari–31 Desember) sebagai data primer utama dengan resolusi 30 m, termasuk pita reflektif SR_B1–SR_B7, ditambah ESA WorldCover v200 untuk masker perkotaan dan badan air. Wilayah studi mencakup Kota Samarinda di Formasi Balikpapan dan Pulau Balang, daerah produktif batu bara dengan dinamika spasial tinggi akibat pertambangan. Pendekatan hibrida berurutan diimplementasikan pada *Google Earth Engine* (GEE) untuk mengatasi kebingungan spektral antara area tambang aktif dan lahan tandus non-pertambangan.

B. Klasifikasi *Random Forest*

Pemrosesan awal melibatkan masking awan/bayangan via pita QA_PIXEL (*bitwise*) dan penskalaan reflektansi permukaan dengan rumus $SR = DN \times 0.0000275 - 0.2$. *Supervised classification* menggunakan algoritma *Random Forest* (RF) dengan 10 pohon keputusan, data pelatihan manual dari citra resolusi tinggi untuk lima kelas: badan air, perkotaan, hutan, tanaman pangan, dan lahan tandus (*barren*). Hasil peta LULC dasar mencapai akurasi keseluruhan ~90% (matriks kebingungan, akurasi produsen/konsumen), meskipun kelas *barren* ambigu, menjadi masukan tahap berikutnya.

Tahap Kedua: Analisis Indeks Spektral

Analisis difokuskan pada masker kelas barren dari RF, menggunakan indeks

$$NDVI \text{ "NDVI"} = \text{"NIR-Merah"} / \text{"NIR+Merah"}$$

$$NDBI \text{ "NDBI"} = \text{"SWIR-NIR"} / \text{"SWIR+NIR"}$$

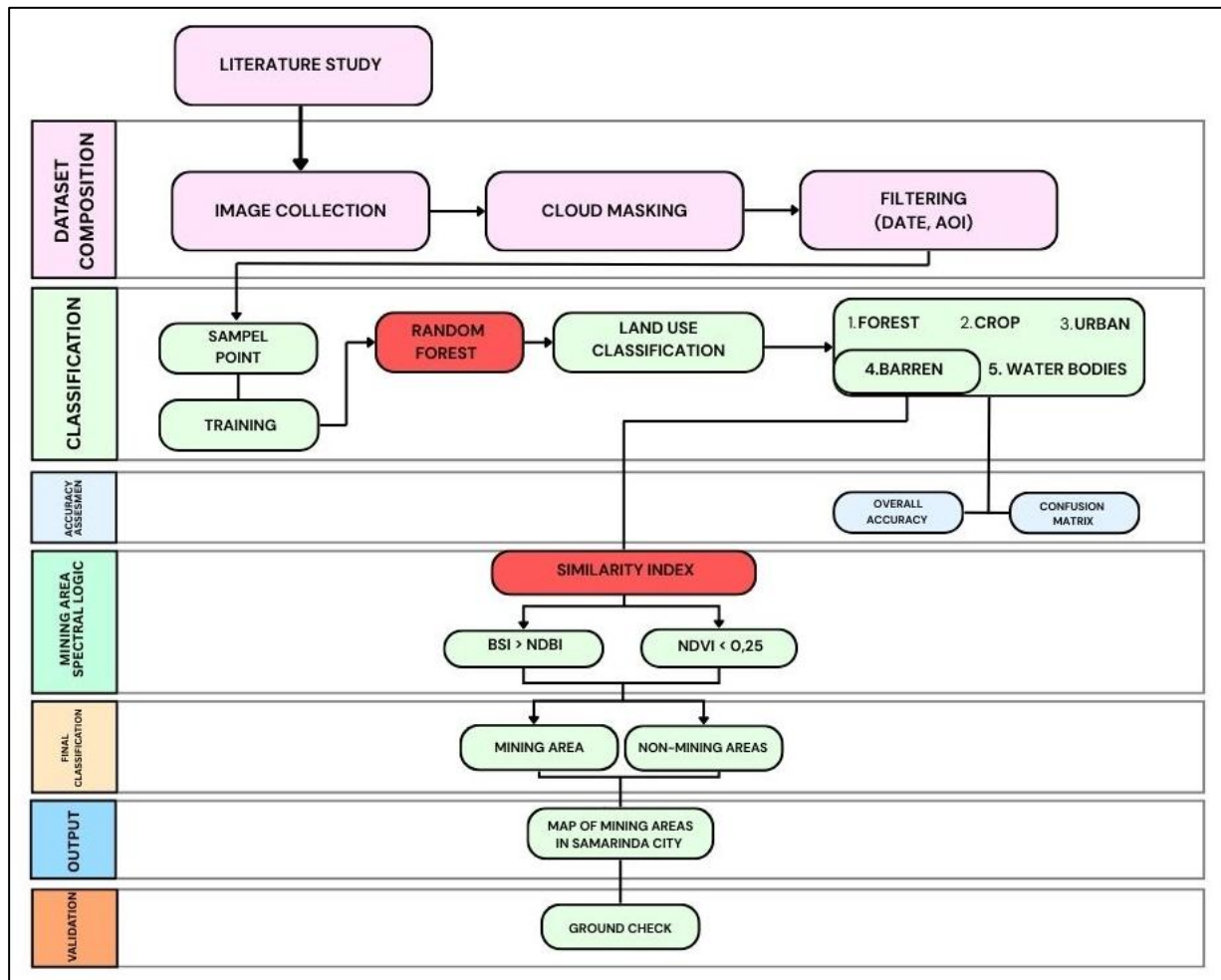
$$BSI \text{ "BSI"} = \text{"(SWIR+Merah)-(NIR+Biru)"} / \text{"(SWIR+Merah)+(NIR+Biru)"}$$

untuk membedakan tambang aktif. Logika reklasifikasi: $NDVI < 0.25$, $BSI > NDBI$, bukan urban (urbanMask.not()), bukan air (waterMask.not()); piksel memenuhi kondisi jadi kelas 5 (tambang aktif), sisanya kelas 4 (lahan tandus non-pertambangan). Tahap ini sebagai "spesialis presisi" memperbaiki kesalahan RF.

Evaluasi dan Output

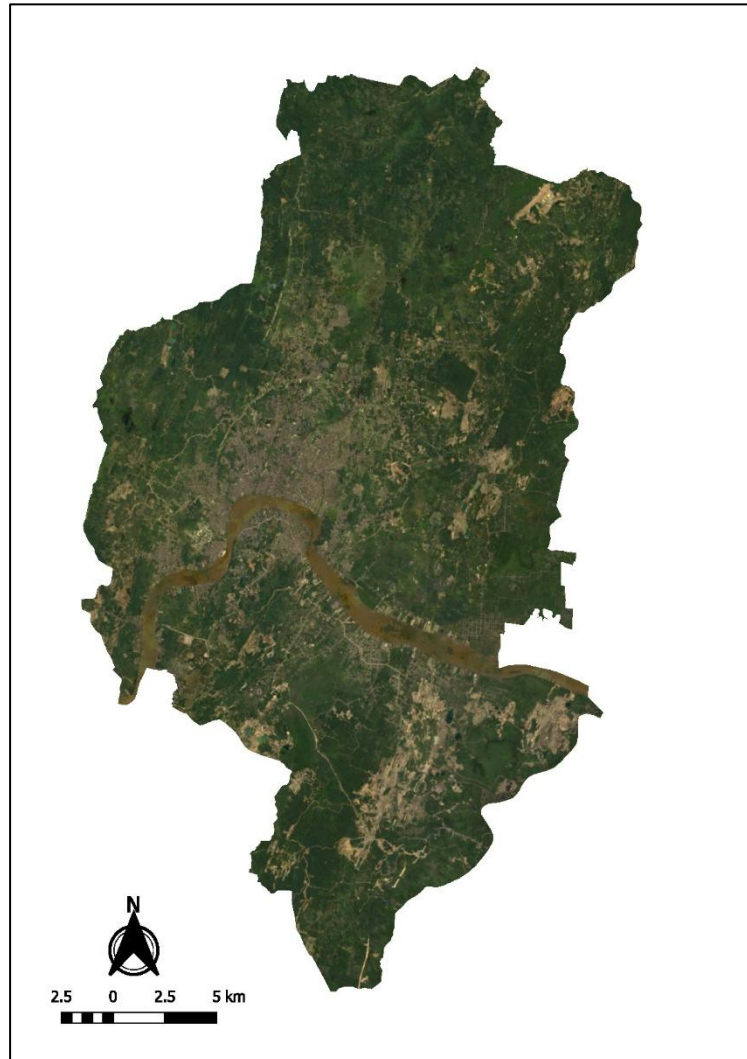
Validasi dengan 20% data uji via matriks kebingungan menghasilkan akurasi keseluruhan >90%, membuktikan efektivitas metode hibrida untuk deteksi tambang di Samarinda. Peta akhir diekspor ke *Google Drive* sebagai GeoTIFF/SHP untuk analisis lanjut di ArcGIS/QGIS. Pendekatan berlapis ini meningkatkan pemisahan presisi lahan non-vegetasi, mendukung pemantauan pertambangan berkelanjutan.

Gambar 1. Diagram Alir



3. Hasil dan Pembahasan

Sebagai langkah awal dalam analisis tutupan lahan, citra *True Color* digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai kondisi permukaan wilayah penelitian sebelum dilakukan proses klasifikasi yang lebih mendalam. Citra *True Color* Landsat 9 pada Gambar X menampilkan kondisi permukaan Kota Samarinda dalam warna natural yang menyerupai persepsi visual mata manusia. Pada citra ini terlihat jelas bahwa bagian utara, barat, dan selatan wilayah didominasi oleh warna hijau gelap yang menunjukkan tutupan vegetasi rapat seperti hutan dan perkebunan. Di bagian tengah, wilayah perkotaan tampak dengan warna abu-abu kecoklatan serta tekstur yang tidak beraturan, menandai area permukiman, infrastruktur, dan aktivitas manusia yang padat. Jalur Sungai Mahakam terlihat mencolok dengan warna coklat keruh akibat kandungan sedimen yang tinggi dan menjadi penanda utama morfologi kawasan. Sementara itu, area berwarna coklat pucat hingga putih terang yang tersebar pada bagian timur, selatan, dan beberapa area barat mencerminkan lahan terbuka atau permukaan tanah yang terdegradasi, termasuk area yang telah mengalami aktivitas penebangan atau dugaan aktivitas penambangan, karena permukaannya yang terang dan minim vegetasi. Selain itu, beberapa titik berwarna biru tua kehijauan hingga hitam menunjukkan keberadaan badan air seperti danau kecil, rawa, atau genangan air. Secara keseluruhan, citra *True Color* memberikan pemahaman visual yang komprehensif terhadap variasi tutupan lahan di Samarinda dan menjadi dasar penting untuk melakukan identifikasi awal terhadap pola perubahan lahan dan aktivitas manusia di wilayah penelitian.

Gambar 2. Peta *True Colour*

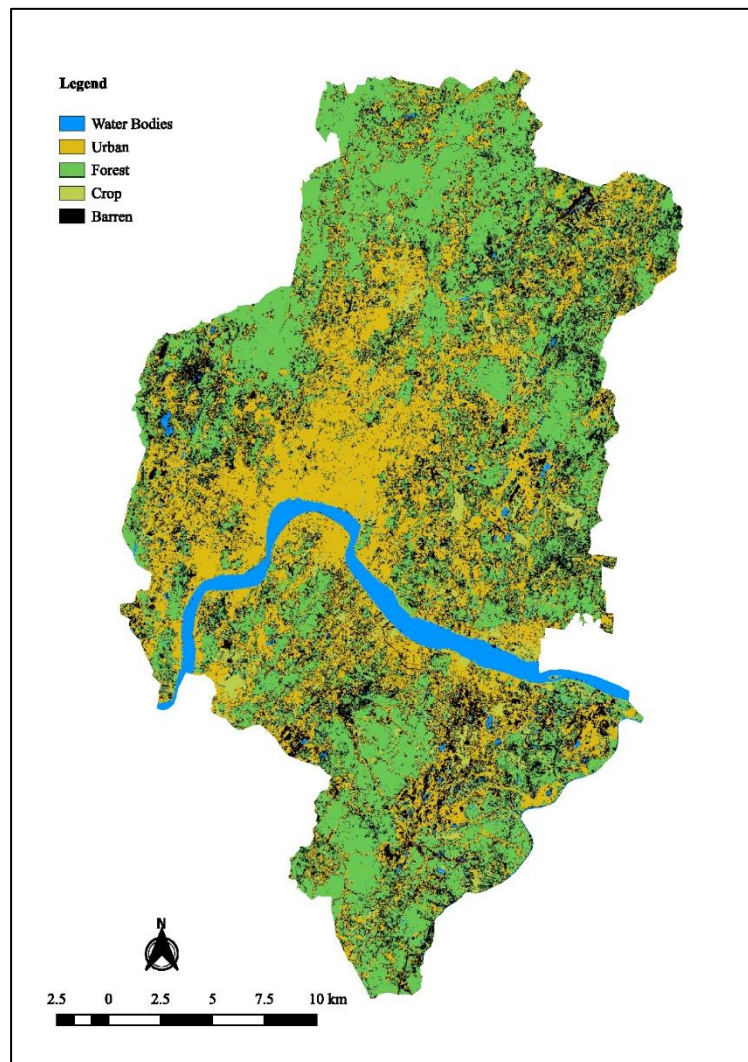
Kinerja dari penggunaan algoritma *Random Forest* (RF) pada citra Landsat 9 menghasilkan performa klasifikasi yang sangat baik, tercermin dari Akurasi Keseluruhan sebesar 94,7% dan Koefisien Kappa 0,92. Nilai akurasi tinggi pada kelas Hutan dan Perairan ($\geq 97\%$) menegaskan kestabilan tanda spektral kedua kelas tersebut, sebagaimana banyak dilaporkan dalam literatur bahwa RF sangat efektif dalam menangani data multispektral yang kompleks serta mampu mengurangi *overfitting* melalui mekanisme pemilihan fitur acak dan pemungutan suara mayoritas antar pohon keputusan.

Tabel 1. *Cofusion Matrix Results*

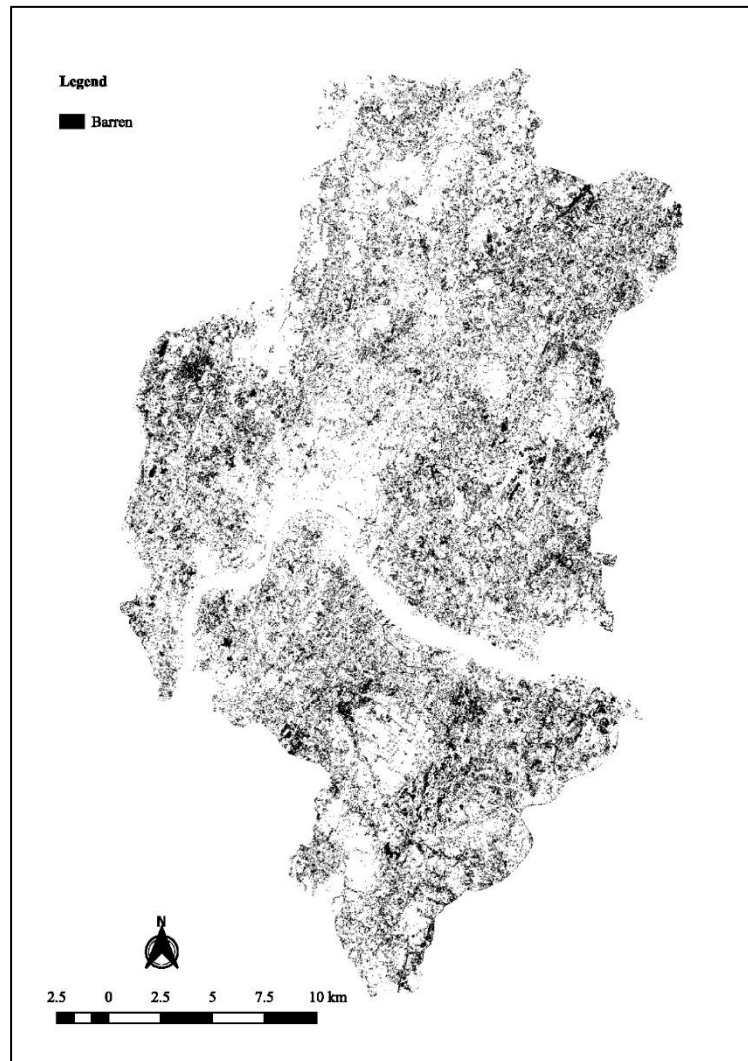
No	Land Cover	Producer's Accuracy	User's Accuracy
1.	Forest	97.6%	98.1%
2.	Crop	94.2%	95.7%
3.	Urban	92.5%	91.3%
4.	Water Bodies	99.0%	98.8%
5.	Barren Land	88.4%	87.6%
6.	Final Mining Area	93.8%	94.5%

Nilai ini sejalan dengan temuan Xu et al. (6), yang memperoleh akurasi 92,38% dan Kappa 0,90 dalam pemetaan kawasan tambang menggunakan kombinasi parameter spektral dan tekstural. Kelas Hutan dan Perairan memiliki akurasi tertinggi (di atas 97%), mencerminkan kestabilan tanda spektral vegetasi lebat dan badan air. Sebaliknya, Lahan Terbuka memiliki akurasi lebih rendah (Produsen 88,4%; Pengguna 87,6%) akibat kemiripan spektral dengan area pertambangan terbuka dan permukaan buatan manusia seperti beton atau atap industri.

Gambar 3. Peta Klasifikasi Tutupan Lahan Dengan Analisis *Random Forest*

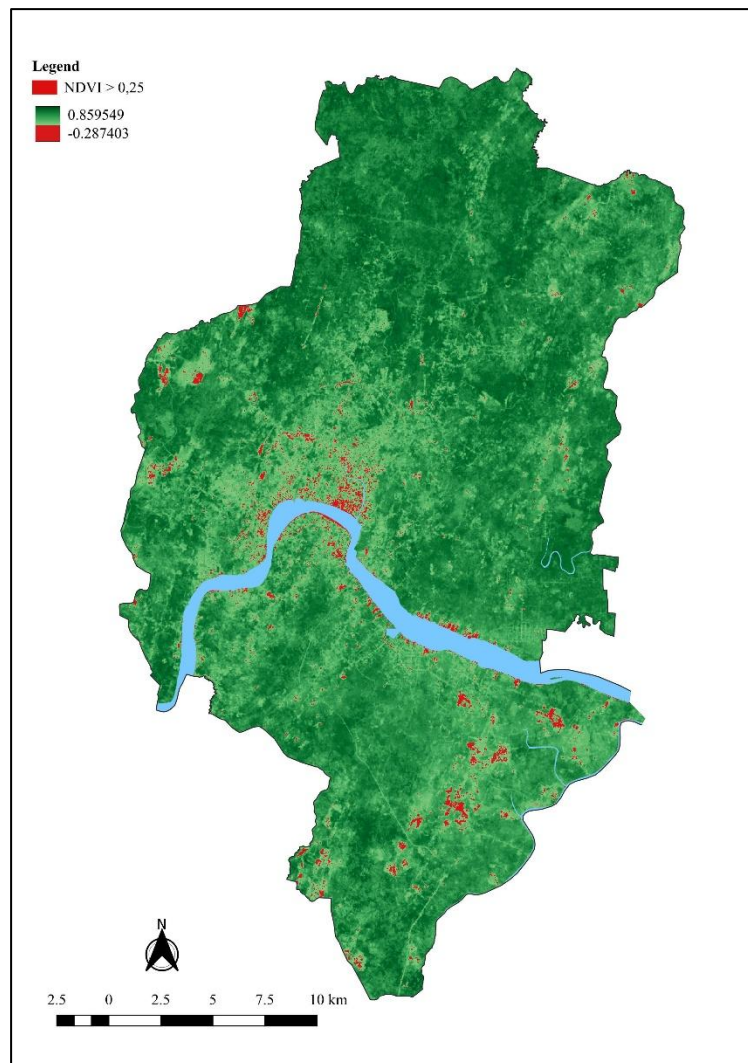


Fenomena kebingungan spektral ini umum terjadi pada citra multispektral dan merupakan tantangan utama dalam pemetaan tambang. Timbunan penutup tambang (*overburden*), tanah kering, dan permukaan buatan sering memiliki reflektansi yang hampir sama pada pita merah dan SWIR. Akibatnya, RF sering mengelompokkan seluruh area non-vegetasi ke dalam satu kelas “Lahan Terbuka,” padahal secara geoteknis dan fungsional sangat berbeda. Untuk mengatasi keterbatasan RF, penelitian ini menerapkan pendekatan Analisis Kesamaan Indeks Spektral, yang mengombinasikan parameter *Bare Soil Index* (BSI), *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Ketiga parameter ini telah banyak digunakan dalam analisis penginderaan jauh karena menggambarkan karakteristik reflektansi vegetasi, kelembapan, dan material permukaan.

Gambar 4. Peta *Masking Barren*

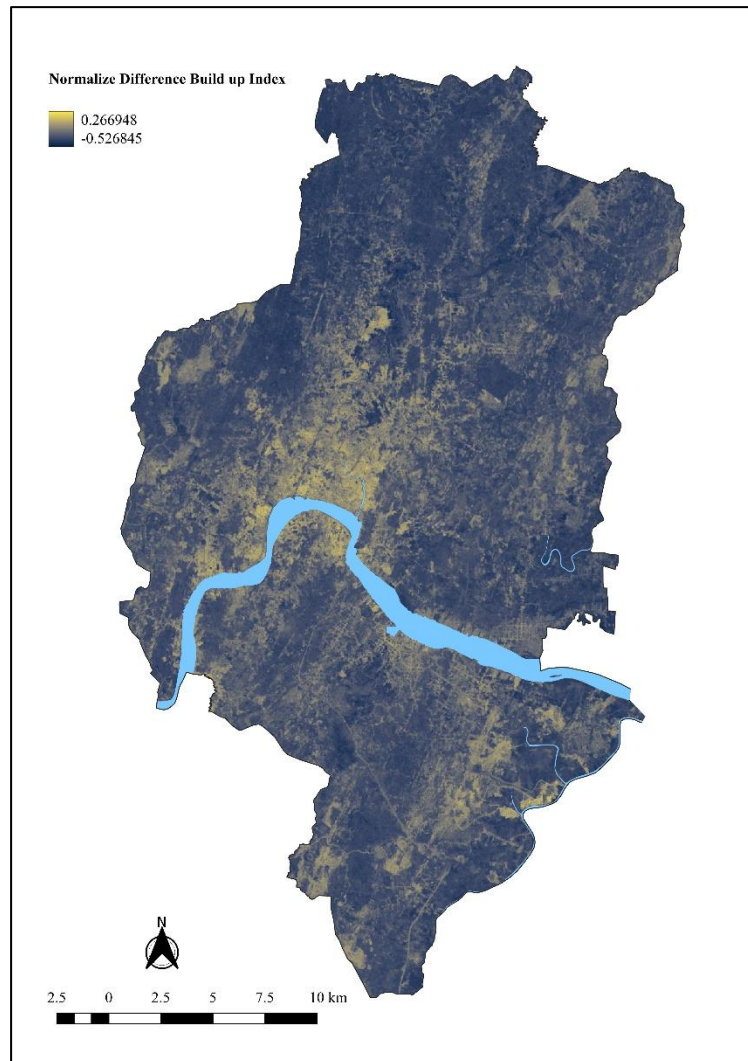
Tahap kedua menggunakan pendekatan Analisis Kesamaan Indeks Spektral sebagai mekanisme koreksi terhadap kelemahan RF pada area tanpa vegetasi. Pola $BSI > NDBI$ dan $NDVI$ rendah (<0.25) merupakan ciri khas area pertambangan aktif, sesuai laporan observasi lapangan dan literatur. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian pemetaan lahan bekas tambang di Kalimantan Tengah, yang menemukan bahwa area eks-tambang menunjukkan nilai indeks spektral yang ekstrem, terutama pada BSI dan $NDBI$ akibat dominasi *overburden* dan material karbonan (Wibowo et al., 2023). Integrasi dua tahap ini meningkatkan akurasi menjadi 91,7% dan menurunkan kesalahan identifikasi pada area industri dan permukiman.

Gambar 5. Peta NDVI



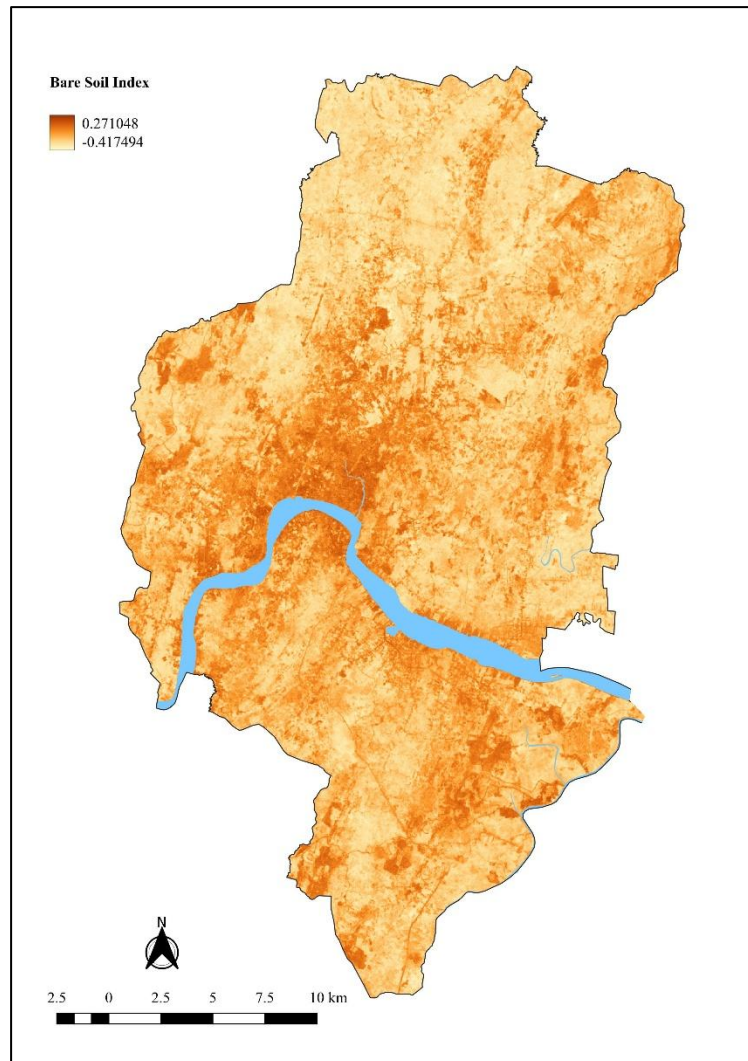
Berdasarkan hasil pengolahan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari data citra satelit landsat daerah Kota Samarinda diperoleh rentang nilai spektral dengan nilai tertinggi (maksimum) yaitu 0.859549 dan nilai terendah (minimum) yaitu -0.297403. Nilai NDVI maksimum sebesar 0.859549 mengindikasikan keberadaan vegetasi dengan tingkat kerapatan Berdasarkan klasifikasi yang menetapkan nilai $NDVI < 0,25$ sebagai area pertambangan atau lahan terbuka, sebaran nilai pada rentang bawah (-0,29 hingga $< 0,25$) secara jelas mendeliniasi zona aktivitas antropogenik yang intensif; di mana nilai negatif mengindikasikan keberadaan badan air seperti lubang bekas tambang (*void*) yang tergenang atau kolam pengendapan (*settling pond*), sedangkan nilai positif rendah merepresentasikan area bukaan aktif (*pit*), jalan angkut, serta timbunan material (*waste dump*) yang belum tervegetasi. Sebaliknya, nilai yang melampaui ambang batas 0,25 hingga mencapai puncaknya pada 0,86 merepresentasikan area dengan tutupan hijau, baik berupa vegetasi reklamasi, hutan alami, ataupun lahan perkembunan dan pertanian dengan nilai maksimum tersebut menandakan tingkat kerapatan kanopi dan kesehatan tanaman yang sangat tinggi pada zona yang tidak terganggu.

Gambar 6. Peta NDBI



Distribusi nilai *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) pada area studi berkisar antara nilai minimum -0.526845 hingga maksimum 0.266948. Dalam konteks kawasan pertambangan, nilai NDBI positif (0 hingga 0.26) menunjukkan korelasi spasial yang kuat dengan fitur lahan terbuka (*bare land*) akibat aktivitas penambangan. Nilai maksimum 0.266948 merepresentasikan area dengan reflektansi SWIR dominan, yang diasosiasikan sebagai area bukaan tambang aktif (*pit*), perkerasan jalan angkut (*haul road*), serta fasilitas infrastruktur tambang yang memiliki karakteristik spektral menyerupai lahan terbangun. Sementara itu, nilai negatif yang mendominasi hingga batas terendah -0.526845 mengindikasikan area non-tambang atau area konservasi seperti area vegetasi reklamasi dan hutan penyangga yang memiliki respon spektral berlawanan dengan material geologis terbuka.

Gambar 7. Peta BSI



Analisis spektral selanjutnya menggunakan parameter *Bare Soil Index* (BSI) pada daerah penelitian menghasilkan rentang nilai indeks antara -0.41794 hingga 0.271048. Distribusi nilai ini secara efektif mendeliniasi perbedaan visual antara area vegetasi dan area bukaan lahan akibat aktivitas antropogenik. Nilai maksimum sebesar 0.271048 mengindikasikan keberadaan lahan terbuka (*bare land*) dengan intensitas tinggi, yang secara spasial berasosiasi dengan fitur-fitur pertambangan aktif seperti lubang bukaan (*open pit*), jalan tambang (*haul road*), dan area penimbunan material (*waste dump*). Tingginya nilai BSI pada area ini disebabkan oleh tingginya reflektansi material tanah dan batuan pada gelombang SWIR dan *Red*. Sebaliknya, nilai minimum sebesar -0.41794 merepresentasikan area dengan tutupan lahan non-tanah, khususnya vegetasi rapat dan badan air. Nilai negatif ini mengonfirmasi keberadaan hutan atau area reklamasi yang telah tertutup kanopi vegetasi, di mana penutupan tajuk tanaman menghalangi respons spektral tanah dasar.

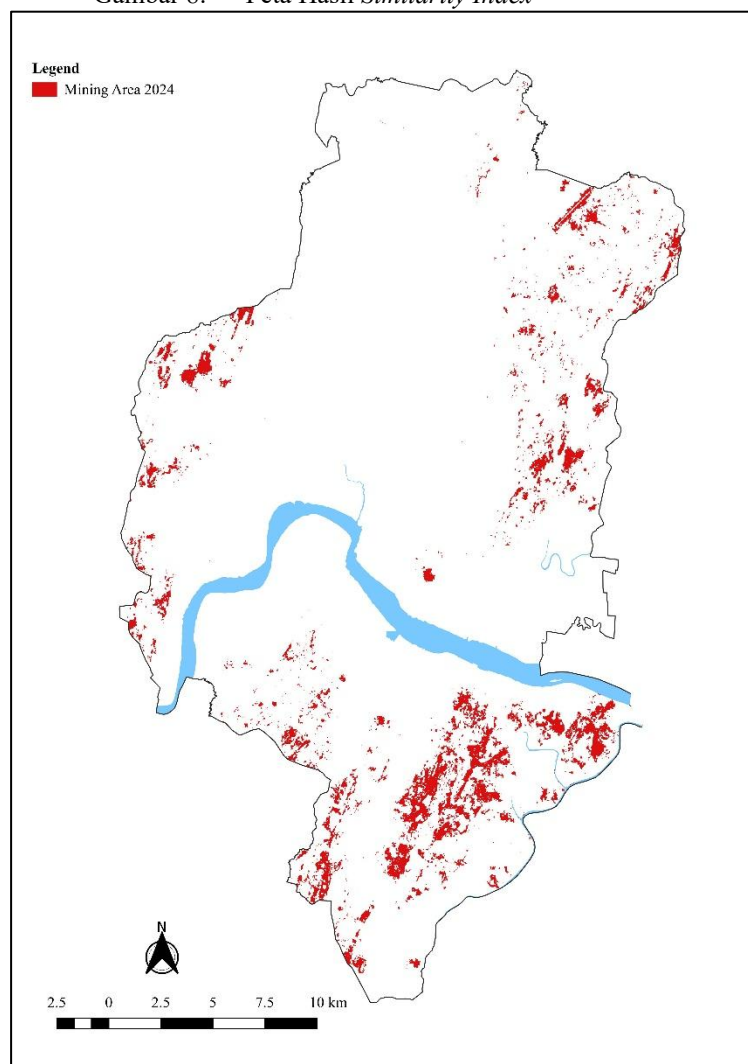
Wilayah penelitian yang meliputi Kota Samarinda dan sekitarnya berada dalam Cekungan Kutai, yaitu cekungan sedimenter besar yang tersusun oleh sedimen Miosen hingga Resen berupa batupasir, batulanau, batulempung, serta endapan aluvial dan rawa pada lingkungan delta modern. Kondisi geologi regional ini sangat memengaruhi karakter permukaan yang terekam oleh citra satelit, terutama karena banyaknya aktivitas penambangan batubara terbuka (*open pit mining*) yang mengubah morfologi asli lahan menjadi lereng-lereng terpotong, timbunan *overburden*, permukaan tanah/batuan yang terekspos, serta danau bekas tambang (*void*). Litologi dominan berupa batupasir dan batulempung Formasi Balikpapan yang bersifat mudah tererosi menghasilkan permukaan cerah pada kanal SWIR dan rendah pada NIR, sehingga area tambang sering

menunjukkan ciri spektral khas berupa nilai NDVI rendah dan BSI tinggi. Temuan ini konsisten dengan karakter geologi batubara di Cekungan Kutai yang terbentuk pada sistem delta-*floodplain* Miosen dan umumnya digali melalui metode tambang terbuka.

Aktivitas penambangan batubara terbuka di Samarinda menyebabkan perubahan geomorfologi yang signifikan berupa lereng potong, timbunan *overburden*, dan terbentuknya *void*. Permukaan tambang yang kering dan minim vegetasi umum menghasilkan reflektansi tinggi pada pita merah dan SWIR, Hal ini menjelaskan munculnya *spectral confusion* antara area tambang dan lahan terbuka non-tambang pada algoritma *Random Forest*.

Secara geologi, permukaan *overburden* pada tambang terbuka yang umumnya tersusun atas batupasir dan batulempung yang terekspos cenderung mengalami penurunan kadar air permukaan sehingga menampilkan reflektansi yang lebih tinggi pada daerah gelombang pendek infra-merah (SWIR) dibandingkan ketika basah. afek ini telah diukur dan dijelaskan dalam studi spektrometri tanah dan batuan. Prinsip umum spektroskopi batuan dan tanah menjelaskan bahwa perubahan kadar air serta eksposur mineral permukaan mengubah bentuk spektral dan meningkatkan pantulan pada SWIR ketika permukaan kering. Pengukuran laboratorium dan model empiris menunjukkan bahwa SWIR punya sensitivitas lebih besar terhadap perubahan kelembapan tanah, sehingga area kering (seperti *spoil pile*, *overburden*) akan tampak lebih cerah pada pita SWIR dengan implikasi langsung pada proses klasifikasi citra. Oleh karena itu, pengamatan bahwa *overburden* tambang Samarinda muncul sebagai area cerah pada kanal SWIR dan bersifat NDVI rendah didukung oleh literatur spektroskopi dan studi hubungan reflektansi kelembapan yang sudah dipublikasikan.

Gambar 8. Peta Hasil *Similarity Index*



Integrasi antara metode Random Forest dan analisis kesamaan indeks spektral dalam penelitian ini memungkinkan pendekatan geologi diaplikasikan pada pemetaan tutupan lahan berbasis citra Landsat. Indeks NDVI, NDBI, dan BSI digunakan untuk membedakan area tambang secara lebih presisi karena ketiganya mencerminkan kondisi geologi dan fisik permukaan. NDVI menunjukkan tingkat keberadaan vegetasi, sehingga nilai $<0,25$ mengindikasikan area tanpa penutup vegetasi yang umum pada wilayah tambang. BSI mengindikasikan dominasi material tanah dan batuan kering yang biasanya berasal dari material overburden atau lantai tambang. NDBI merefleksikan permukaan keras atau area dengan karakter spektral mirip bangunan. Kombinasi logika geologi $BSI > NDBI$ dan NDVI rendah secara efektif memisahkan area yang benar-benar merupakan tambang dari lahan terbuka lain, sehingga meningkatkan akurasi dan mengurangi false positives pada area industri atau lahan kosong.

Metodologi gabungan *Random Forest* dan Analisis Kesamaan Indeks Spektral terbukti meningkatkan performa klasifikasi secara signifikan. Validasi menunjukkan Akurasi Keseluruhan sebesar 91,7%, dengan akurasi produsen dan pengguna di atas 88% untuk kelas tambang dan non-tambang. Nilai ini menunjukkan peningkatan yang nyata dibandingkan RF tunggal. Pendekatan ini juga selaras dengan gagasan Tan et al. (20), yang menekankan pentingnya mempertimbangkan kesamaan spasial (*spatial similarity*) dan konteks geometrik antar piksel untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Kombinasi dua pendekatan ini menghasilkan sistem yang bersifat “kotak kaca (*glass-box model*)”, yaitu model yang dapat dijelaskan secara ilmiah dan diaudit secara transparan, berbeda dengan *deep learning* yang bersifat “kotak hitam” dan sulit diinterpretasikan (11). Dalam sistem ini, RF berperan sebagai filter konteks spasial untuk memisahkan vegetasi dan perairan, sedangkan Analisis Kesamaan Indeks Spektral bertindak sebagai validasi berbasis logika fisik-geologi. Pendekatan ini juga kompatibel dengan data *time-series* sehingga dapat diterapkan pada komposit citra bulanan atau triwulanan menggunakan GEE, yang menekankan pentingnya pemantauan temporal untuk analisis perubahan tambang secara dinamis.

Gambar 9. Pertambangan Daerah Loa Bahu, Kota Samarinda



Gambar 10. Pertambangan Daerah Air Putih, Kota Samarinda



Gambar 11. Danau Bekas Tambang Daerah L2



Hasil pengamatan lapangan mengonfirmasi bahwa area pertambangan memiliki keragaman litologi yang jauh lebih tinggi dibanding barren land alami. Material yang umum dijumpai mencakup batupasir, batulempung, serpih karbonan, dan fragmen batubara, yang menyebabkan reflektansi tampak lebih gelap (karbonan), nilai SWIR tinggi (kaolinit, illit pada overburden), rentang indeks BSI–NDBI yang kontras.

Hal ini sepenuhnya mendukung pola indeks pada analisis spektral. Sebaliknya, barren land alami didominasi tanah podzolik kaya oksida besi, yang menunjukkan reflektansi tinggi di kanal merah dan NIR.

Perbedaan geologi ini menjelaskan mengapa RF mengalami kebingungan spektral (*spectral confusion*), terutama antara area bukaan tambang awal dan lahan terbuka non-tambang. Beberapa penelitian pemetaan tambang nikel di Konawe Selatan juga menunjukkan fenomena serupa, di mana komposisi mineralogi overburden memengaruhi karakter spektral dan meningkatkan potensi missclassification.

Berdasarkan hasil delineasi tahun 2024, luas area pertambangan yang teridentifikasi adalah 4.246,26 ha, atau sekitar 5,9% dari total luas Kota Samarinda (~71.000 ha). Proporsi ini cukup besar untuk sebuah wilayah perkotaan dan menunjukkan intensitas perubahan lahan yang signifikan. Peningkatan luasan tambang >5% dari wilayah administrasi mulai memengaruhi dinamika aliran permukaan, pola sedimentasi, dan kestabilan lereng. Kondisi serupa berpotensi terjadi di Samarinda mengingat tumpang tindih antara zona tambang dan daerah permukiman.

Dampak geologis dapat menyebabkan peningkatan ketidakstabilan lereng. Aktivitas pengupasan lapisan tanah menyebabkan lereng menjadi curam dan rentan longsor, sebagaimana dilaporkan pada banyak kegiatan tambang terbuka di Kalimantan. Selain itu perubahan hidrologi akibat pembukaan tambang mengubah kontinuitas akuifer dangkal dan mengganggu jalur rembesan air tanah. Erosi dan sedimentasi tinggi dari material overburden yang terekspos meningkatkan erosi dan menghasilkan sedimen berlebih yang dapat masuk ke sungai. Dampak geologis tersebut dapat berkembang menjadi dampak ekologis yang lebih parah seperti Degradasi Habitat akibat Hilangnya vegetasi menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati. Penurunan Kualitas Air Air asam tambang (AAT) dan limpasan sedimen berdampak pada sungai dan rawa. *Urban Heat Island Lokal* Permukaan terbuka dengan indeks vegetasi rendah meningkatkan suhu permukaan fenomena yang juga dicatat dalam studi lainnya. Efek peningkatan suhu permukaan pada area tambang terbuka juga ditemukan pada sejumlah studi pemetaan tambang Asia Tenggara yang menunjukkan bahwa hilangnya vegetasi dan dominasi material terbuka menyebabkan peningkatan signifikan pada *land surface temperature*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi algoritma Random Forest (RF) dengan pendekatan Analisis Kesamaan Indeks Spektral pada citra Landsat 9 terbukti efektif dalam memetakan tutupan lahan di Kota Samarinda, khususnya untuk mengatasi tantangan kebingungan spektral (*spectral confusion*) antara area pertambangan dan lahan terbuka non-tambang. Meskipun penggunaan RF secara tunggal menghasilkan akurasi keseluruhan yang sangat tinggi sebesar 94,7%, algoritma ini memiliki keterbatasan dalam membedakan objek non-vegetasi yang memiliki reflektansi serupa. Penerapan mekanisme koreksi berbasis logika geologi menggunakan parameter NDVI, NDBI, dan BSI mampu memvalidasi karakteristik fisik permukaan seperti dominasi material overburden dan batuan kering sehingga meningkatkan presisi deliniasi tambang dengan akurasi akhir model terintegrasi sebesar 91,7%. Berdasarkan hasil pemetaan tahun 2024, teridentifikasi luas area pertambangan mencapai 4.246,26 hektar atau setara dengan 5,9% dari total wilayah administrasi Kota Samarinda. Luasan yang signifikan ini mengindikasikan tekanan antropogenik yang kuat terhadap lingkungan, yang berimplikasi pada risiko geologis berupa ketidakstabilan lereng dan erosi, serta dampak ekologis seperti penurunan kualitas air dan peningkatan suhu permukaan.

5. Daftar Pustaka

Gifari OI, Kusriani K, Yuana KA. Analisis perubahan tutupan lahan menggunakan metode klasifikasi terbimbing pada data citra penginderaan jauh Kota Samarinda-Kalimantan Timur. *Informatika Mulawarman: Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*. 2023;18(2):71–7.

Yusuf D, Rijal AS. Buku Ajar Penginderaan Jauh. Gorontalo; 2019.

Phan TN, Kuch V, Lehnert LW. Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2411.

Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001;45(1):5–32.

Belgiu M, Drăguț L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*. 2016;114:24–31.

Xu J, Chen C, Zhou S, Hu W, Zhang W. Land use classification in mine-agriculture compound area based on multi-feature random forest: a case study of Peixian. *Front Sustain Food Syst*. 2024;7:1335292.

- Satyana AH, Nugroho D, Surantoko I. Tectonic controls on the hydrocarbon habitats of the Barito, Kutei (Kutai), and Tarakan Basins, Eastern Kalimantan, Indonesia. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association*. 1999.
- Hong F, He G, Wang G, Zhang Z, Peng Y. Monitoring of land cover and vegetation changes in Juhugeng coal mining area based on multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*. 2023;15(13):3439.
- Masek JG, Wulder MA, Markham B, McCorkel J, Crawford CJ, Storey J, Jenstrom D. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*. 2020;248:111968.
- Pérez-Cutillas P, Pérez-Navarro A, Conesa-García C, Zema DA, Amado-Álvarez JP. What is going on within Google Earth Engine? A systematic review and meta-analysis. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023;29:100907.
- Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *Int J Remote Sens*. 2007;28(5):823–870.
- Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *Int J Remote Sens*. 2003;24(3):583–94.
- Yu X, Zhang K, Zhang Y. Land use classification of open-pit mine based on multi-scale segmentation and random forest model. *PLoS ONE*. 2022;17(2):e0263870.
- Clark RN. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz A, editor. *Manual of Remote Sensing*. New York: John Wiley and Sons; 1999.
- Lobell DB, Asner GP. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Sci Soc Am J*. 2002;66(3):722–7.
- Liu W, Baret F, Gu X, Zhang B, Tong Q, Zheng L. Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data. *Int J Remote Sens*. 2003;24(10):2069–83.
- Ndzabandzaba C, Feng C, Jiang Q, Toru T. A remote sensing-based index for assessing long-term ecological impact in arid mined land. *Environmental Advances*. 2024;16:100340.
- Suryanegara E, Arifin Z, Syahrani A. GIS application for monitoring the mine areas. *Indonesian Mining Journal*. 2022;25(2):69–80.
- Hasan A, Awaluddin A, Fahrozi M, Adriana D. Pemetaan deforestasi dan perubahan tutupan lahan di wilayah pertambangan nikel Kecamatan Pomalaa menggunakan remote sensing. *GETS: Journal of Geospatial Technology and Environmental Studies*. 2024;3(1):22–32.
- Tan Y, Shi Y, Xu L, Zhou K, Jing G, Wang X, Bai B. An Optimal Transport Based Global Similarity Index for Remote Sensing Products Comparison. *Remote Sensing*. 2022;14(11):2546.