



Pemanfaatan Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis Berbasis Transformasi Spektral Indeks Vegetasi Untuk Estimasi Produksi Tanaman Teh

Natzratul Zahira*, Muhammad Ismail, Wikan Jaya Prihantarto, Triyatno, Dilla Angraina

Sekolah Vokasi, Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis, Universitas Negeri Padang, Padang
Jl. Prof. Hamka, Air Tawar., Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia
Email: ^{1,*}natzratulzahira10@gmail.com, muhammadismail@fis.unp.ac.id, wikanjaya@fis.unp.ac.id, triyatno@fis.unp.ac.id, angrainadilla@fis.unp.ac.id

Email Penulis Korespondensi: natzratulzahira10@gmail.com

Submitted: 15/06/2026; Accepted: 04/07/2026; Published: 05/07/2026

Abstrak—Tanaman teh merupakan komoditas perkebunan unggulan di Indonesia, namun estimasi produksi melalui survei lapangan manual memiliki keterbatasan biaya, waktu, dan akurasi, serta kurang mampu menggambarkan variasi spasial antarblok secara representatif. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi produksi tanaman teh di Afdeling B PTPN IV Danau Kembar menggunakan citra PlanetScope dengan pendekatan Transformed Vegetation Index (TVI), serta menguji keakuratan estimasi tersebut dibandingkan dengan data produksi aktual. Metode yang digunakan meliputi pra-pemrosesan citra (kalibrasi radiometrik), perhitungan TVI, pengumpulan data lapangan melalui plot sampel, analisis regresi linier sederhana, dan estimasi produksi pada tingkat blok menggunakan agregasi zonal serta klasifikasi Jenks Natural Breaks. Hasil menunjukkan nilai TVI berkisar antara 0,79–1,13 dengan luas lahan produktif mencapai 240 ha (84,21%) dari total 285 ha. Analisis regresi menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7933 dengan persamaan $y = 1388,8x - 1458,4$, sedangkan hasil validasi model menunjukkan R^2 sebesar 0,7005. Total estimasi produksi pucuk teh di Afdeling B mencapai 119,5 ton, dengan produksi tertinggi pada blok 24 (8,80 ton) dan terendah pada blok 46 (0,48 ton). Meskipun model memaparkan hasil akurasi yang baik pada skala sampel, tetapi estimasi yang dihasilkan kurang tepat dibandingkan dengan data perusahaan karena adanya perbedaan, yaitu temporal dari data tersebut. Akan tetapi, pendekatan menggunakan TVI berbasis citra PlanetScope terbukti memiliki kelebihan dalam menyajikan informasi spasial distribusi produktivitas tanaman teh per blok yang tidak dapat diperoleh dari metode konvensional, sehingga dapat mendukung pengelolaan perkebunan teh berbasis data spasial yang berkelanjutan. Kontribusi penelitian ini adalah menyediakan model estimasi produksi teh berbasis TVI dan PlanetScope yang diterapkan di perkebunan dataran tinggi Sumatera Barat, sekaligus menghasilkan peta distribusi produktivitas spasial per blok sebagai dasar pengambilan keputusan pengelolaan perkebunan yang lebih praktis.

Kata Kunci: Penginderaan Jauh; Sistem Informasi Geografis; TVI; PlanetScope; Estimasi Produksi; Teh.

Abstract—Tea is a leading plantation commodity in Indonesia, but production estimation through manual field surveys has limitations in terms of cost, time, and accuracy, and is less able to describe spatial variations between blocks representatively. This study aims to estimate tea production in Afdeling B PTPN IV Danau Kembar using PlanetScope imagery with the Transformed Vegetation Index (TVI) approach, and to test the accuracy of the estimation compared to actual production data. The methods used include image pre-processing (radiometric calibration), TVI calculation, field data collection through sample plots, simple linear regression analysis, and production estimation at the block level using zonal aggregation and Jenks Natural Breaks classification. The results show that the TVI value ranges from 0.79–1.13 with a productive land area reaching 240 ha (84.21%) of the total 285 ha. The regression analysis yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.7933 with the equation $y = 1388.8x - 1458.4$, while the model validation results showed an R^2 of 0.7005. The total estimated tea shoot production in Afdeling B reached 119.5 tons, with the highest production in block 24 (8.80 tons) and the lowest in block 46 (0.48 tons). Although the model displayed good accuracy results at the sample scale, the resulting estimate was less precise compared to company data due to differences, namely the temporality of the data. However, the approach using TVI based on PlanetScope imagery has proven to have advantages in presenting spatial information on the distribution of tea plant productivity per block that cannot be obtained from conventional methods, thus supporting more efficient and sustainable spatial data-based tea plantation management. The contribution of this research is to provide a TVI- and PlanetScope-based tea production estimation model applied to the highland tea plantations of West Sumatra, while also generating a spatial productivity distribution map per block as a basis for more practical plantation management decision-making.

Keywords: Remote Sensing; Geographic Information System; TVI; PlanetScope; Production Estimation; Tea

1. PENDAHULUAN

Tanaman teh (*Camellia sinensis*) merupakan salah satu komoditas perkebunan unggulan di Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan juga memiliki peran penting dalam mendukung sektor agribisnis nasional [1]. Indonesia termasuk dalam jajaran negara produsen teh dunia, dengan sentra produksi yang tersebar di Pulau Jawa dan Sumatera, termasuk kawasan PTPN IV Danau Kembar di Sumatera Barat yang memiliki kondisi agroklimat sesuai untuk budidaya teh dataran tinggi. Produktivitas teh sangat dipengaruhi oleh kondisi fisiologis kanopi tanaman seperti tingkat kehijauan daun, kepadatan kanopi, dan indeks luas daun (Leaf Area Index/LAI), yang mencerminkan kapasitas fotosintesis dan potensi hasil panen [2]. LAI merupakan parameter biofisik mendasar untuk menggambarkan struktur kanopi tanaman teh dan menjadi indikator penting dalam pemantauan pertumbuhan serta estimasi produktivitas perkebunan [3].

Pendekatan konvensional dalam estimasi produksi umumnya masih mengandalkan survei lapangan manual dan pencatatan hasil panen per blok tanaman. Metode tersebut membutuhkan sumber daya yang besar dan tidak mampu merepresentasikan variasi spasial kondisi tanaman pada skala perkebunan yang luas. Keterbatasan estimasi produksi secara konvensional mendorong kebutuhan akan teknologi yang lebih efektif dan efisien, mengingat informasi produksi yang tidak akurat dapat berdampak pada kualitas dan kuantitas hasil panen teh. Kondisi ini menyebabkan data yang diperoleh sering kali tidak cukup representatif untuk mendukung perencanaan panen, alokasi tenaga kerja, maupun evaluasi produktivitas secara menyeluruh [4].

Kemajuan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG) membuka peluang pemantauan tanaman yang lebih cepat, objektif, dan berkesinambungan. Estimasi produktivitas tanaman berbasis citra satelit telah terbukti akurat pada berbagai komoditas, di mana PlanetScope dengan resolusi spasial 3 m menunjukkan performa terbaik dalam mendeteksi variabilitas hasil dalam skala blok dibandingkan dengan citra resolusi menengah seperti Sentinel-2 dan Landsat 8. Citra satelit resolusi tinggi, seperti PlanetScope menawarkan cakupan temporal dan detail spasial yang halus, menjadikannya sangat cocok untuk tanaman tahunan di mana kondisi kanopi dapat bervariasi di berbagai blok [5]–[7]. Citra PlanetScope memiliki potensi besar untuk menganalisis dinamika tutupan vegetasi karena keunggulan sistem ini. Citra ini juga memiliki kemampuan yang memungkinkan deteksi perubahan fenologis, respons tanaman terhadap perlakuan agronomi, dan identifikasi zona pengelolaan spesifik dalam satu lahan [8,9].

Sejumlah penelitian telah menunjukkan potensi teknologi Penginderaan Jauh (PJ) dan Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai solusi atas keterbatasan tersebut [3,4]. Berbagai indeks vegetasi telah dikembangkan untuk memantau kondisi tanaman, seperti Transformed Vegetation Index (TVI). TVI dinilai memiliki potensi yang lebih sesuai karena merupakan transformasi matematis dari NDVI yang dirancang untuk meningkatkan linearitas hubungan dengan parameter vegetasi melalui penambahan konstanta dan operasi akar kuadrat [10]. Indeks ini dikembangkan oleh Deering pada tahun 1975 yang dikutip pada buku Vegetation indices sebagai transformasi dari NDVI dengan penambahan konstanta untuk menghindari nilai negatif, sehingga menghasilkan nilai yang lebih stabil secara statistik dan lebih representatif dalam menggambarkan variasi kondisi vegetasi [11]. Bedanya dengan NDVI yang cenderung mengalami saturasi pada vegetasi berkanopi rapat, TVI memiliki kemampuan yang lebih baik dalam membedakan tingkat kerapatan kanopi pada tanaman dengan biomassa tinggi, termasuk perkebunan teh [12]. Keunggulan TVI juga diperkuat oleh Xue et al dan Rao et.al bahwasannya TVI dinilai tepat digunakan untuk estimasi produksi tanaman teh meningkatkan karakteristik kanopinya yang rapat dan tingkat LAI yang tinggi [13,14]. Meskipun indeks vegetasi lain yang dikembangkan untuk mengatasi saturasi NDVI pada kanopi rapat, tetapi pada Afdeling B dengan kanopi teh homogeny dan kerapatan menjadikan TVI lebih stabil secara statistik karena penambahan konstanta 0,5 yang mencegah nilai negatif dan menghasilkan distribusi yang lebih linier terhadap produktivitas tanaman [15].

Pada penelitian Rao et.al di India membuktikan bahwa indeks vegetasi berbasis citra satelit mampu mengestimasi produksi teh dengan koefisien determinasi tinggi [14]. Pada penelitian Zheng et.al dalam penelitiannya di China, mereka mengembangkan model estimasi biomassa berbasis indeks vegetasi transformasi dengan akurasi mencapai $R^2 = 0,94$, sementara Martin et al. menunjukkan keunggulan indeks vegetasi transformasi dalam memprediksi LAI pada data hiperspektral maupun multispektral di berbagai kondisi kanopi [16,17]. Pada penelitiannya, Tesfaye di Ethiopia juga menunjukkan bahwa indeks vegetasi berbasis citra multispektral dapat merepresentasikan kondisi vegetasi aktual dengan tingkat noise rendah [10]. Temuan-temuan ini menegaskan urgensi penerapan indeks vegetasi berbasis penginderaan jauh untuk mendukung estimasi produksi teh di Indonesia, yang masih banyak mengandalkan metode konvensional. Sebagai alternatifnya teknologi, penginderaan jauh menyediakan solusi yang terukur dan hemat biaya untuk pemantauan pertanian [18]. Yan dkk menyebutkan indeks vegetasi memiliki sensitivitas terhadap berbagai karakteristik biofisik, biokimia, dan fisiologis tanaman sehingga mampu merepresentasikan kondisi vegetasi secara komprehensif [19]. Pemanfaatan citra PlanetScope untuk estimasi produksi menggunakan TVI pada Afdeling B sangat terbatas, dan belum tersedianya model estimasi yang disajikan dalam bentuk spasial.

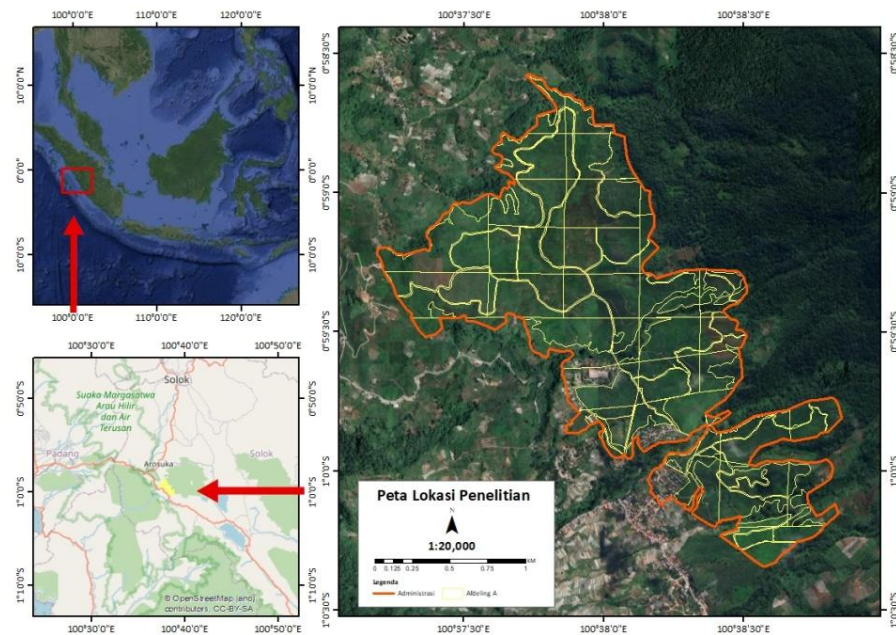
Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi produksi tanaman teh di Afdeling B PTPN IV Danau Kembar menggunakan citra PlanetScope dengan pendekatan TVI. Tujuan kedua dari penelitian ini untuk menguji keakuratan estimasi produksi secara statistik dan membandingkan dengan produksi aktual. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengelolaan perkebunan teh berbasis data spasial yang efisien, dan berkelanjutan serta memberikan kontribusi metodologis bagi pengembangan sistem pemantauan produksi tanaman perkebunan di Indonesia.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Perkebunan Teh PTPN IV Danau Kembar yang terletak di Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat, Indonesia. Area penelitian difokuskan pada Afdeling B yang berada pada koordinat $0^{\circ}58'3''$ LS– $1^{\circ}00'20''$ LS dan $100^{\circ}37'11''$ BT– $100^{\circ}38'50''$ BT. Secara geografis, kawasan perkebunan berada pada ketinggian sekitar 1.300–1.600 mdpl yang sesuai untuk budidaya tanaman teh.

Wilayah penelitian memiliki iklim tropis dataran tinggi dengan curah hujan tahunan berkisar 2.500–3.000 mm dan suhu udara rata-rata 18–25°C yang mendukung pertumbuhan tanaman teh secara optimal. PTPN IV Danau Kembar terdiri atas dua unit produksi, yaitu Afdeling A seluas 274 ha dan Afdeling B seluas 295 ha. Afdeling B dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan area produksi utama dengan variasi kondisi tanaman dan karakteristik blok yang representatif untuk analisis estimasi produksi teh berbasis data penginderaan jauh. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi

2.2 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah tanaman teh (*Camellia sinensis*) yang dibudidayakan pada blok-blok produksi Afdeling B PTPN IV Danau Kembar. Penelitian memanfaatkan teknologi Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk mengkaji hubungan antara karakteristik spektral tanaman teh dengan produktivitas hasil panen. Data utama yang digunakan berupa citra satelit PlanetScope beresolusi spasial 3 m yang menyediakan empat pita multispektral, yaitu biru (Blue), hijau (Green), merah (Red), dan inframerah dekat (Near Infrared/NIR). Informasi spektral dari citra tersebut digunakan untuk menghitung Transformed Vegetation Index (TVI), yang selanjutnya dianalisis sebagai indikator kondisi vegetasi dan digunakan dalam pemodelan estimasi produksi teh. Integrasi data citra satelit, data lapangan, dan analisis SIG memungkinkan pemetaan distribusi spasial produktivitas teh pada tingkat blok maupun afdeling.

2.3 Tahapan Penelitian

2.3.1 Akuisisi dan Pra-pemrosesan Data Citra PlanetScope

Data penginderaan jauh yang digunakan berupa citra PlanetScope hasil perekaman tanggal 17 Mei 2025. Citra dipilih karena telah melalui proses koreksi atmosfer sehingga nilai piksel merepresentasikan reflektansi permukaan yang lebih sesuai untuk analisis vegetasi. Tahapan pra-pemrosesan meliputi proses kalibrasi radiometrik dalam penelitian ini menghasilkan nilai reflektansi Top of Atmosphere (TOA). Pemilihan pendekatan TOA pada penelitian ini didasarkan pada pertimbangan efisiensi pemrosesan data serta konsistensi nilai spektral antar piksel dalam satu liputan citra (single-date image), yang dinilai memadai untuk tujuan analisis korelasi TVI terhadap produktivitas pucuk teh pada skala blok. Meskipun demikian, penggunaan data Surface Reflectance pada penelitian selanjutnya berpotensi meningkatkan akurasi estimasi, khususnya dalam mengurangi pengaruh kondisi atmosfer pada hasil indeks vegetasi. Nilai reflektansi permukaan diperoleh dari metadata citra PlanetScope yang telah dikalibrasi oleh penyedia data. Dimana kalibrasi radiometrik dapat dilakukan menggunakan rumus (1).

$$\text{REF} = \text{DN} \times \text{RC} \quad (1)$$

Rumus (1) menjelaskan proses kalibrasi radiometrik untuk mengubah nilai digital number (DN) pada citra PlanetScope menjadi nilai reflektansi permukaan (REF), melalui perkalian sederhana antara nilai DN pada suatu piksel di pita spektral tertentu dengan koefisien reflektansi (RC) yang berlaku untuk pita spektral tersebut. Nilai DN merupakan nilai digital mentah hasil rekaman sensor satelit yang belum memiliki makna fisis secara langsung, sehingga belum dapat menggambarkan besaran energi yang sebenarnya dipantulkan oleh permukaan objek di Bumi. Agar nilai tersebut dapat diinterpretasikan secara fisis, DN dikalikan dengan RC, yaitu koefisien konversi

yang bersifat khas untuk setiap pita spektral dan setiap scene citra, yang diperoleh dari metadata citra yang disediakan oleh penyedia data (Planet Labs). Koefisien RC ini telah memperhitungkan parameter kalibrasi sensor sehingga hasil perkaliannya menghasilkan nilai reflektansi yang konsisten secara spektral antar piksel dalam satu liputan citra. Perhitungan ini dilakukan secara terpisah untuk setiap pita spektral, karena masing-masing pita memiliki nilai RC yang berbeda sesuai dengan karakteristik panjang gelombang dan respons spektral sensor pada pita yang bersangkutan.. Setelah koreksi ini, Transformed Vegetation Index (TVI) dihitung menggunakan rumus 2 seperti di bawah ini.

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (2)$$

Dimana NDVI dikalkulasi berdasarkan rumus (2) dengan menggunakan pita band merah (RED) dan pita inframerah dekat (NIR)

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (3)$$

TVI dipilih karena memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengurangi efek saturasi pada vegetasi dengan kanopi rapat dibandingkan indeks vegetasi lainnya, sehingga lebih akurat dalam menggambarkan kerapatan dan kesehatan tanaman teh. Indeks spektral ini juga terbukti kuat dalam penerapannya untuk memperkirakan produksi tanaman agroindustri.

2.3.2 Pengumpulan Data Lapangan

Pengumpulan data lapangan dilakukan menggunakan plot sampel berukuran 3 m × 3 m yang disebarakan pada berbagai blok produksi di Afdeling B. Penentuan titik sampel dilakukan menggunakan metode purposive sample berdasarkan sebaran blok tanaman dan kondisi pertumbuhan teh berdasarkan nilai TVI. Pada setiap plot dilakukan pemetikan pucuk teh sesuai standar operasional perkebunan, kemudian hasil panen ditimbang dalam satuan gram sebagai representasi produksi pada luasan sampel. Koordinat setiap plot dicatat menggunakan perangkat Global Positioning System (GPS) melalui aplikasi KoboToolbox untuk memastikan kesesuaian spasial antara data lapangan dan citra satelit. Untuk meminimalkan perbedaan kondisi vegetasi akibat siklus pertumbuhan tanaman teh yang relatif cepat, pengambilan data lapangan dilakukan dalam rentang waktu yang berdekatan dengan tanggal perekaman citra PlanetScope, yaitu maksimum 7 hari dari tanggal akuisisi citra.

2.3.3 Analisis Regresi

Hubungan antara nilai TVI dan produksi teh dianalisis menggunakan regresi linier sederhana dengan TVI sebagai variabel bebas (X) dan hasil produksi teh lapangan sebagai variabel terikat (Y). Persamaan regresi yang diperoleh digunakan untuk membangun model estimasi produksi berbasis citra satelit. Kinerja model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), yang menunjukkan proporsi variasi produksi teh yang dapat dijelaskan oleh variabel TVI. Nilai R^2 berada pada rentang 0–1, di mana nilai yang semakin semakin mendekati 1, semakin besar proporsi keragaman data yang dapat diterangkan oleh model, sehingga menunjukkan tingkat kecocokan model yang lebih baik. Dalam berbagai penelitian PJ untuk estimasi parameter vegetasi, nilai R^2 yang melebihi 0,70 umumnya dianggap mencerminkan hubungan yang kuat dan tingkat akurasi model yang memadai dalam merepresentasikan kondisi vegetasi [20].

2.3.4 Estimasi Produksi dan Analisis Spasial

Model regresi diterapkan pada seluruh piksel citra TVI untuk menghasilkan peta estimasi produksi teh. Proses estimasi dilakukan dalam lingkungan Sistem Informasi Geografis (SIG), sehingga nilai produksi dapat dihitung secara spasial pada seluruh area perkebunan. Nilai estimasi produksi pada tingkat piksel selanjutnya diagregasikan ke tingkat blok dan afdeling menggunakan analisis zonal (zonal statistics). Hasil estimasi kemudian diklasifikasikan menjadi lima kelas produksi, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menggunakan metode Jenks Natural Breaks. Metode ini mengelompokkan data berdasarkan kemiripan nilai dalam setiap kelas sehingga mampu merepresentasikan variasi produktivitas secara lebih optimal. Output akhir penelitian berupa peta distribusi spasial estimasi produksi teh yang menggambarkan variasi tingkat produktivitas pada setiap blok perkebunan dan dapat digunakan sebagai dasar pengelolaan tanaman secara lebih efektif. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

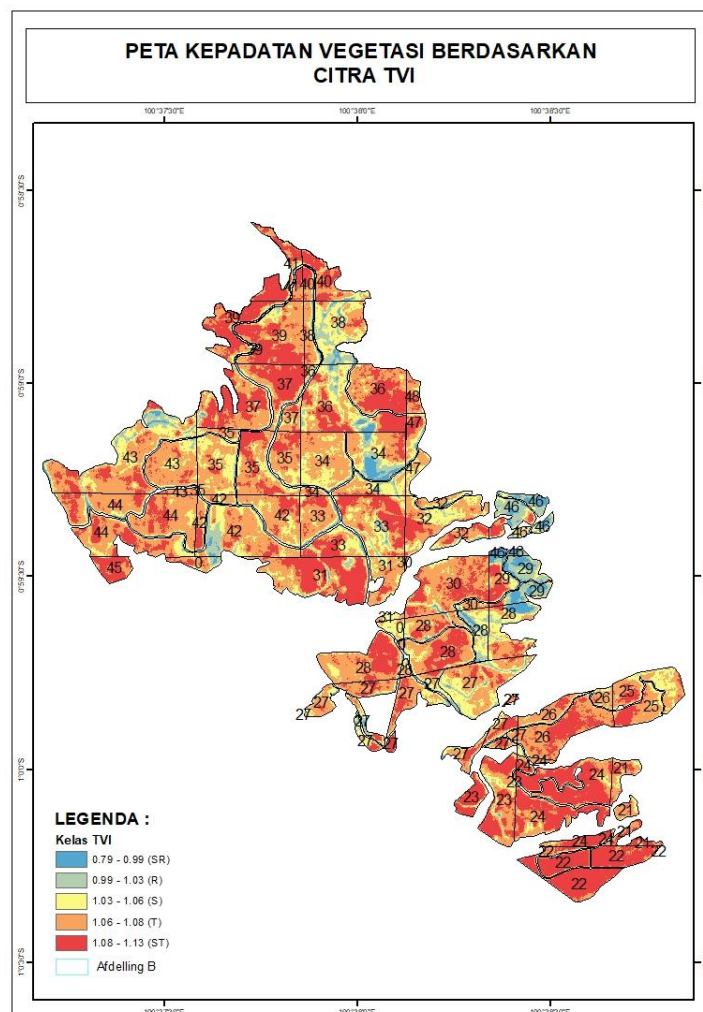


Gambar 2. Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hubungan TVI dengan Produksi Aktual melalui regresi linier

Berdasarkan tahapan penelitian yang telah dilakukan, nilai TVI hasil pengolahan citra PlanetScope berada pada rentang 0,79–1,13. Rentang nilai tersebut menunjukkan adanya variasi tingkat kerapatan tajuk tanaman teh pada seluruh area Afdeling B. Area yang memiliki nilai TVI di bawah 0,99 dikategorikan sebagai area tanpa tutupan vegetasi yang memadai dan dimanfaatkan sebagai pemisah untuk memisahkan area pemangkasan dari areal tanaman teh yang masih produktif. Selanjutnya, distribusi kerapatan vegetasi dianalisis menggunakan metode Jenks Natural Breaks dan dikelompokkan ke dalam lima kelas, yaitu sangat tinggi (1,08–1,13), tinggi (1,06–1,08), sedang (1,03–1,06), rendah (0,99–1,03), dan sangat rendah (0,79–0,99). Kategori kerapatan vegetasi sangat tinggi dan tinggi menunjukkan area tanaman teh yang memiliki kondisi pertumbuhan relatif optimal. Area pada kelas ini dicirikan oleh tutupan tajuk yang lebih padat dan keberadaan pucuk yang lebih melimpah, sehingga berpotensi memberikan hasil produksi yang lebih besar. Sebaliknya, area yang termasuk dalam kategori sedang dan rendah mengindikasikan tingkat kerapatan vegetasi yang tidak setinggi kelas sebelumnya. Kondisi tersebut umumnya ditemukan pada blok yang telah mengalami aktivitas pemetikan atau sedang memasuki fase regenerasi vegetatif setelah panen. Sementara itu, kategori sangat rendah merepresentasikan area dengan tutupan tanaman teh yang sangat minim atau tidak terdapat vegetasi teh sama sekali. Area tersebut umumnya berkaitan dengan lokasi yang baru selesai dipangkas maupun lahan terbuka yang terdapat di dalam areal perkebunan. Pola persebaran spasial dari masing-masing kelas kerapatan vegetasi tersebut disajikan pada Gambar 3.



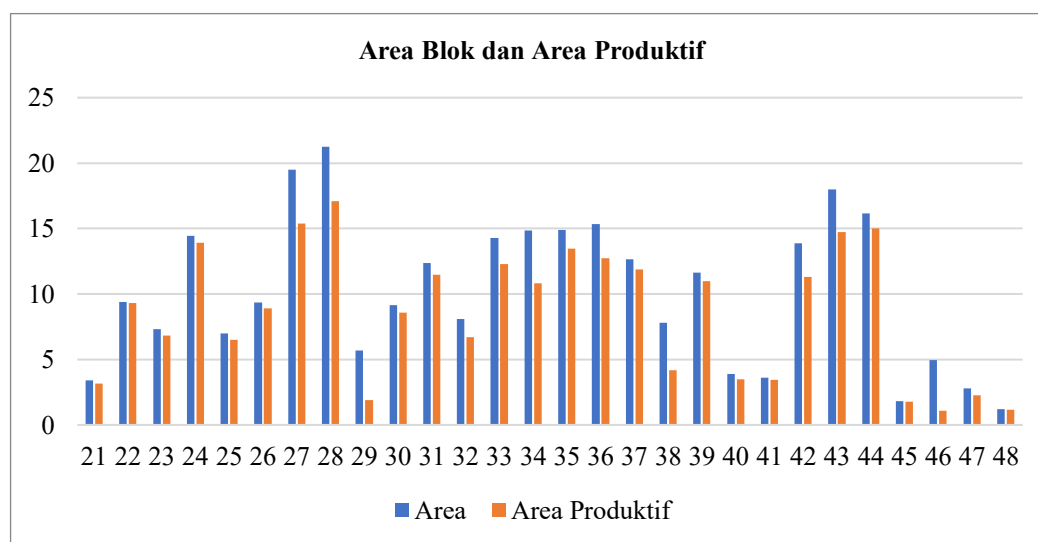
Gambar 3. Peta Kepadatan Vegetasi Berdasarkan Citra TVI

Hasil pengukuran menunjukkan luas keseluruhan Afdeling B 285 ha. Dari luas tersebut, 240 ha atau 84,21% merupakan lahan produktif yang siap panen. Sedangkan sisanya 15,79% area selain teh dan juga dalam pemeliharaan seperti pemangkasan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar lahan perkebunan masih berada dalam kondisi produktif dan siap untuk dipanen. Berdasarkan Gambar 4, batang berwarna biru menunjukkan luas blok sebenarnya, sedangkan batang berwarna oranye menunjukkan luas area produktif yang

masih ditutupi tanaman teh dan siap dipanen. Selisih antara kedua batang pada setiap blok menggambarkan luas area yang tidak produktif, baik karena sedang dipangkas maupun karena tutupan vegetasi selain tanaman teh. Secara umum, luas area produktif pada seluruh blok masih mendominasi luas total blok. Hal ini terlihat dari tinggi batang oranye yang relatif mendekati batang biru pada sebagian besar blok. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar areal Afdeling B masih berada dalam kondisi produktif dan berpotensi menghasilkan pucuk teh untuk dipanen.

Pada blok 27 dan 28 merupakan blok dengan luas area terbesar, masing-masing 19,48 dan 21,26 ha. Meskipun demikian, luas area produktif pada kedua blok tersebut masih cukup tinggi, yaitu 15,36 dan 17,07 ha, sehingga sebagian besar lahannya masih dapat dimanfaatkan untuk produksi. Selain itu, Blok 43 dan Blok 44 juga memiliki luas area yang relatif besar dengan area produktif yang tetap mendominasi. Di sisi lain, beberapa blok seperti blok 22, 41, dan 48 menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antara luas total blok dan luas area produktif. Kondisi ini mengindikasikan bahwa hampir seluruh area pada blok-blok tersebut masih ditutupi oleh kanopi teh yang siap dipanen. Dengan kata lain, proporsi area yang mengalami pemangkasan atau tidak produktif pada blok tersebut relatif rendah. Sebaliknya, blok 29 dan 46 memperlihatkan selisih yang cukup besar antara luas total blok dan luas area produktif. Pada blok 46, luas total blok 4,95 ha, sedangkan luas area produktif hanya 1,06 ha. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar area pada blok tersebut tidak berada dalam fase produksi, kemungkinan karena sedang mengalami pemangkasan atau proses pemeliharaan lainnya. Hal yang sama juga terlihat pada Blok 29 yang memiliki pengurangan area produktif yang cukup signifikan dibandingkan luas total bloknya.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan adanya variasi spasial kondisi pertanaman teh di Afdeling B. Beberapa blok masih didominasi oleh tanaman teh yang siap panen, sementara blok lainnya memiliki proporsi area pemangkasan yang lebih besar. Perbedaan ini mencerminkan adanya variasi dalam siklus pemeliharaan tanaman dan berpotensi memengaruhi distribusi produksi teh pada masing-masing blok.



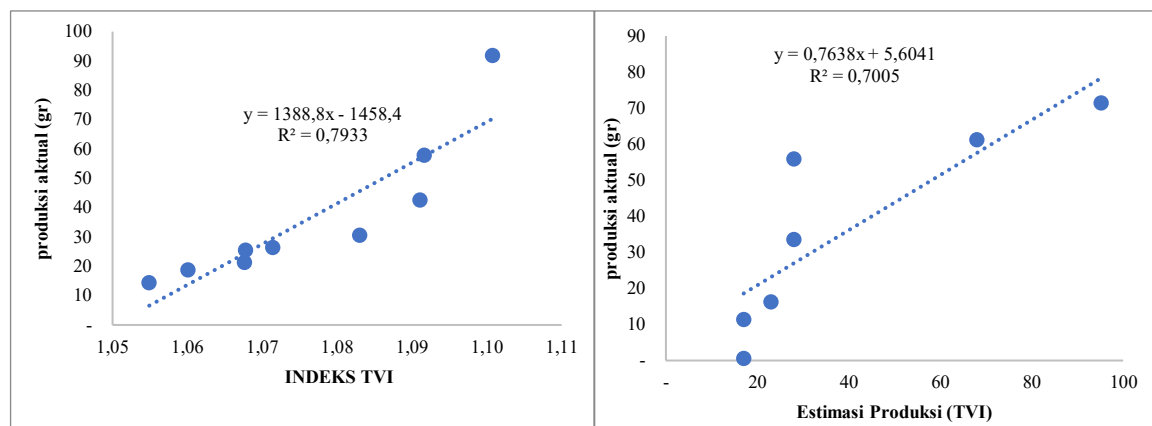
Gambar 4. Area Blok Sebenarnya dan Area Produktif

Berdasarkan hasil analisis regresi pada Gambar 5, terdapat hubungan positif antara nilai TVI dan produksi pucuk teh hasil pengukuran lapangan. Hubungan ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7933, yang berarti sekitar 79,33% variasi produksi pucuk teh dapat dijelaskan oleh perubahan nilai TVI, sedangkan sisanya sebesar 20,67% dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model, seperti umur pangkas, kondisi tanaman, kesuburan tanah, maupun faktor lingkungan lainnya. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = 1388,8x - 1458,4$, yang menunjukkan bahwa peningkatan nilai TVI cenderung diikuti oleh peningkatan produksi pucuk teh.

Nilai R^2 yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa TVI memiliki kemampuan yang baik dalam menggambarkan kondisi vegetasi yang berhubungan dengan produktivitas tanaman teh. Secara umum, area dengan nilai TVI yang lebih tinggi menunjukkan tingkat kehijauan dan kerapatan kanopi yang lebih baik, sehingga memiliki potensi menghasilkan produksi pucuk teh yang lebih tinggi dibandingkan area dengan nilai TVI yang rendah. Pola tersebut terlihat pada Gambar 5a, di mana titik-titik sampel cenderung mengikuti arah garis regresi yang menunjukkan hubungan searah antara TVI dan produksi aktual. Sebagai contohnya yaitu pada nilai TVI sebesar 1,1 menghasilkan 91,80 gr teh segar.

Untuk menguji kemampuan model dalam memprediksi produksi, dilakukan proses validasi menggunakan data lapangan yang berbeda dari data pembangun model. Hasil validasi menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,7005, yang menunjukkan bahwa model masih mampu menjelaskan sekitar 70,05% variasi produksi aktual. Meskipun nilai ini lebih rendah dibandingkan nilai R^2 pada tahap pembentukan model, hasil tersebut masih menunjukkan tingkat hubungan yang kuat dan mengindikasikan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang cukup baik. Pada Gambar 5b terlihat bahwa nilai estimasi produksi memiliki kecenderungan meningkat seiring dengan

meningkatnya produksi aktual. Sebagian besar titik pengamatan berada di sekitar garis regresi, yang menunjukkan kesesuaian yang cukup baik antara hasil estimasi dan data lapangan. Perbedaan yang masih muncul antara nilai estimasi dan nilai aktual kemungkinan disebabkan oleh variasi kondisi tanaman di lapangan yang tidak seluruhnya dapat direpresentasikan oleh nilai TVI. Namun secara keseluruhan, hasil analisis dan validasi menunjukkan bahwa TVI dapat digunakan sebagai indikator yang efektif untuk mendukung estimasi produksi tanaman teh berbasis penginderaan jauh di Afdeling B PTPN IV Danau Kembar.



Gambar 5. (a) Regresi Linier antara TVI dan produksi teh aktual (b) akurasi hasil model estimasi produksi

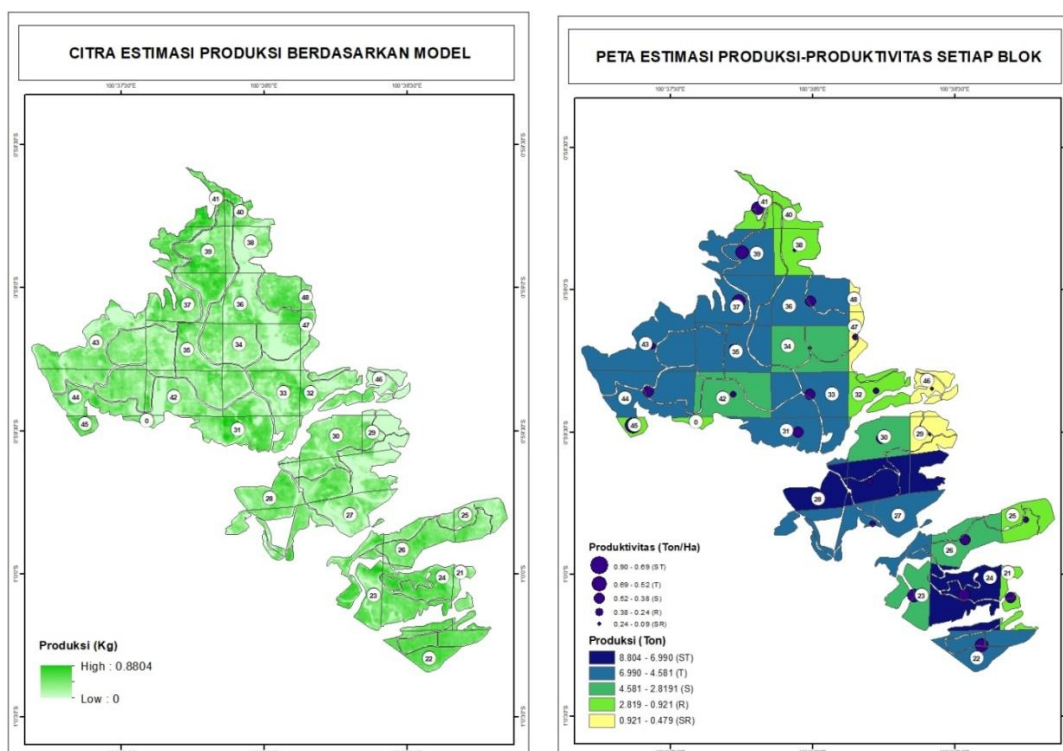
3.2 Estimasi Produksi Teh pada Afdelling B Danau Kembar berbasis TVI.

Berdasarkan hasil penerapan model regresi antara nilai TVI dan data produksi lapangan, total produksi pucuk teh di Afdeling B diperkirakan mencapai 119,5 ton. Estimasi ini diperoleh melalui proses konversi nilai hasil model pada setiap piksel citra menjadi satuan kilogram, kemudian diakumulasikan sehingga menghasilkan informasi produksi yang terdistribusi secara spasial di seluruh area perkebunan. Peta estimasi produksi pada Gambar 8a menunjukkan bahwa produksi pucuk teh tidak tersebar secara seragam, melainkan membentuk pola keruangan tertentu yang mencerminkan variasi kondisi vegetasi pada setiap bagian lahan. Semakin tinggi nilai TVI yang terdeteksi pada suatu area, semakin tinggi pula estimasi produksi yang dihasilkan oleh model.

Secara visual sebagian besar wilayah perkebunan menunjukkan tingkat produksi yang relatif sedang hingga tinggi yang ditandai oleh rona hijau yang lebih pekat. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanaman teh pada area tersebut memiliki kerapatan tajuk yang cukup baik dan pertumbuhan vegetatif yang optimal sehingga berpotensi menghasilkan pucuk teh dalam jumlah yang lebih besar. Sebaliknya, beberapa bagian lahan memperlihatkan rona hijau yang lebih terang yang menunjukkan estimasi produksi lebih rendah. Untuk memperoleh gambaran yang lebih rinci hasil estimasi produksi kemudian dianalisis pada tingkat blok sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8b.

Peta tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara satu blok dengan blok lainnya. Berdasarkan klasifikasi produksi, blok 24 dan 28 termasuk ke dalam kategori produksi dan produktivitas tertinggi. Tingginya nilai produksi pada kedua blok tersebut mengindikasikan bahwa kondisi tanaman berada pada fase pertumbuhan yang baik dengan tutupan kanopi yang relatif rapat. Selain itu, nilai TVI yang tinggi pada blok-blok tersebut menunjukkan tingkat kehijauan vegetasi yang optimal sehingga berkontribusi terhadap peningkatan estimasi hasil panen. Dan juga hasil produksi dapat dipengaruhi luas area, dimana pada blok tersebut memiliki luas area pemangkasan atau area siap panen yang luas. Kondisi ini mengisyaratkan bahwa tanaman memiliki jumlah daun produktif yang lebih banyak dan ketersediaan pucuk teh siap panen yang relatif tinggi dibandingkan blok lainnya.

Sebaliknya, blok 29 dan 46 termasuk dalam kategori produksi dan produktivitas yang lebih rendah. Rendahnya nilai estimasi pada blok-blok tersebut dapat dikaitkan dengan kondisi vegetasi yang kurang optimal. Salah satu faktor yang kemungkinan memengaruhi adalah adanya kegiatan pemangkasan baru baru ini yang menyebabkan berkurangnya pucuk teh yang akan di produksi. Setelah pemangkasan, tanaman teh memasuki fase pertumbuhan kembali sehingga jumlah pucuk yang dapat dipanen menjadi lebih sedikit. Kondisi tersebut menyebabkan nilai TVI menurun karena berkurangnya biomassa hijau yang terdeteksi oleh sensor satelit. Selain faktor pemangkasan, variasi produktivitas juga dapat dipengaruhi oleh perbedaan umur tanaman, kondisi kesuburan tanah, ketersediaan unsur hara, serta faktor lingkungan lainnya yang memengaruhi pertumbuhan tanaman teh. Hasil analisis spasial ini menunjukkan bahwa penggunaan citra satelit dan indeks vegetasi TVI mampu menggambarkan pola distribusi produksi pucuk teh secara efektif pada tingkat blok perkebunan. Informasi yang dihasilkan tidak hanya memberikan estimasi total produksi, tetapi juga mampu mengidentifikasi lokasi-lokasi dengan produktivitas tinggi maupun rendah. Dengan demikian, informasi spasial ini dapat dimanfaatkan oleh manajemen perkebunan sebagai dasar penentuan prioritas penanganan, misalnya dalam menjadwalkan rotasi pemangkasan, pemupukan, maupun perawatan lain secara lebih terarah pada blok-blok dengan produktivitas rendah, sehingga upaya peningkatan hasil panen dapat dilakukan secara lebih efisien dan tepat sasaran.

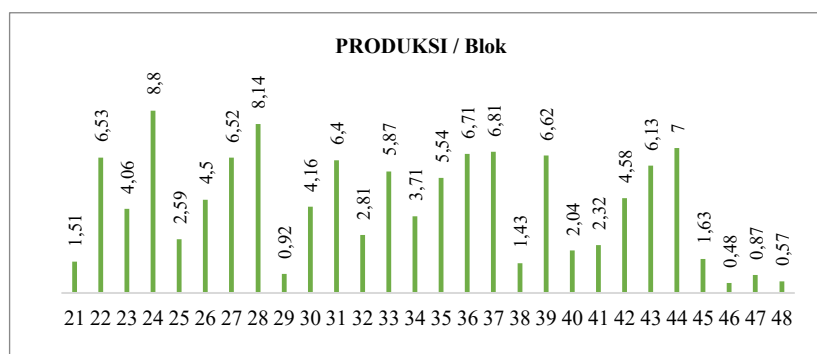


Gambar 6. (a) Citra estimasi produksi berdasarkan model (b) Peta produksi-produktivitas yang dilanjutkan di setiap blok

Berdasarkan diagram produksi per blok (Gambar 7), estimasi produksi pucuk teh di Afdeling B menunjukkan variasi cukup tinggi antarblok, berkisar antara 0,48ton hingga 8,80 ton. Variasi ini mengindikasikan perbedaan kondisi vegetasi dan luas area produktif di setiap blok. Blok 24 mencatat produksi tertinggi (8,80 ton), diikuti blok 28 (8,14 ton), blok 44 (7,00 ton), blok 37 (6,81 ton), dan blok 40 (6,62 ton). Tingginya produksi ini berkaitan dengan nilai TVI yang relatif tinggi, menandakan kerapatan tajuk yang baik dan banyaknya daun muda aktif tumbuh, sehingga potensi pucuk yang dapat dipanen lebih besar. Sebaliknya, blok 46 mencatat produksi terendah (0,48 ton), disusul blok 48 (0,57 ton), blok 29 (0,92 ton), dan blok 21 (1,61 ton). Rendahnya produksi ini diduga akibat berkurangnya area produktif karena pemangkasan atau tanaman yang masih dalam fase pertumbuhan kembali, sehingga belum menghasilkan pucuk secara optimal.

Variasi produksi juga dipengaruhi oleh luas lahan produktif, bukan hanya luas blok secara keseluruhan. Misalnya, blok 28 memiliki produksi sangat tinggi meski bukan blok terluas, karena sebagian besar areanya masih ditutupi tanaman siap panen. Sebaliknya, blok dengan produksi rendah cenderung memiliki area yang sedang dipangkas atauutupan vegetasi yang lebih sedikit. Secara umum, sebagian besar blok seperti blok 22, 27, 31, 36, 39, 40, 43, dan 44 berada pada kisaran produksi 4–7 ton, menunjukkan bahwa mayoritas area perkebunan masih cukup produktif dan berkontribusi signifikan terhadap total produksi Afdeling B.

Hasil ini menegaskan bahwa data citra satelit dan indeks vegetasi TVI dapat memberikan gambaran rinci distribusi produksi pucuk teh per blok. Informasi ini berguna bagi pengelola perkebunan untuk mengidentifikasi blok berproduktivitas rendah dan menentukan tindakan pengelolaan yang tepat, seperti pengaturan pemangkasan, pemupukan, dan pemeliharaan tanaman, sehingga pemetaan berbasis penginderaan jauh tidak hanya mengestimasi hasil panen, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan pengelolaan perkebunan yang lebih efektif.



Gambar 7. Diagram distribusi spasial produksi menurut blok

Mesipun nilai estimasi yang dihasilkan berdasarkan citra TVI yaitu 119 ton dan lebih rendah dibandingkan data produksi perusahaan pada periode April yang menghasilkan 318,5 ton. Perbedaan tersebut juga memiliki alasan tertentu seperti peneliti hanya menggunakan 1 waktu pengamatan citra, dan data perusahaan merupakan hasil panen yang dilakukan secara berulang selama periode panen. Akan tetapi model regresi berbasis TVI tetap menunjukkan kemampuan yang baik dalam menggambarkan potensi produksi tanaman teh dan variasi produktivitas di lapangan. Selain berfungsi untuk mengestimasi produksi, pendekatan penginderaan jauh juga mampu menyajikan informasi spasial mengenai distribusi produktivitas pada setiap blok perkebunan yang tidak dapat diperoleh dari data produksi konvensional. Informasi tersebut memungkinkan identifikasi area dengan tingkat produktivitas tinggi maupun rendah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam kegiatan pemantauan tanaman, evaluasi kondisi kebun, serta perencanaan pengelolaan perkebunan yang lebih efektif, efisien, dan berbasis kondisi aktual di lapangan.

3.3 Pembahasan

Model TVI berbasis citra PlanetScope dalam penelitian ini menghasilkan R^2 sebesar 0,7933 pada tahap pemodelan dan 0,7005 pada tahap validasi, hasil yang sejalan dengan temuan Rao et al. di India tentang korelasi signifikan antara indeks vegetasi satelit dan produksi teh, sehingga mengindikasikan transferabilitas pendekatan TVI antarwilayah meski berbeda kondisi agroklimat dan varietas [10]. Akurasi yang lebih tinggi pada penelitian Zheng et al. ($R^2 = 0,94$) diduga disebabkan oleh penggunaan data multitemporal dan kepadatan sampel yang lebih besar dibanding citra single-date pada penelitian ini, namun nilai R^2 yang diperoleh tetap memenuhi batas yang baik sesuai kriteria Galidaki et al. bahwa R^2 di atas 0,70 sudah mencerminkan hubungan yang kuat dalam pemodelan vegetasi berbasis penginderaan jauh [20,21]. Penelitian ini juga mengonfirmasi keunggulan TVI dibanding NDVI dalam mengatasi saturasi pada kanopi rapat, sebagaimana dikemukakan Bannari et al. dan Tesfaye & Awoke; kanopi teh di Afdeling B yang rapat dan homogen justru menunjukkan distribusi nilai lebih linier terhadap data produksi saat menggunakan TVI, sejalan dengan rekomendasi Xue & Su serta Li et al. mengenai stabilitas TVI pada vegetasi ber LAI tinggi [13,15].

Dari sisi resolusi, PlanetScope (3 m) terbukti lebih unggul dibanding Sentinel-2 dan Landsat 8, sesuai temuan Amankulova et al. terkait deteksi variabilitas hasil pada skala blok perkebunan, sementara penelitian Dini Nuraeni yang menggunakan Sentinel-2 dengan pendekatan machine learning di Gunung Mas, Bogor turut menunjukkan efektivitas penginderaan jauh dalam menggambarkan variasi produktivitas spasial, meski resolusi lebih tinggi pada penelitian ini berpotensi memberi delineasi blok yang lebih akurat [4,6]. Selisih antara estimasi model (119,5 ton) dan data produksi resmi April (318,5 ton) disebabkan oleh keterbatasan citra single-date dalam merepresentasikan akumulasi produksi dari beberapa siklus panen, sejalan dengan temuan Lin bahwa model berbasis citra tunggal cenderung meremehkan total produksi musiman karena tidak menangkap siklus pertumbuhan pucuk secara berulang menegaskan perlunya pendekatan multitemporal untuk meningkatkan presisi model [3]. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap metodologi estimasi produksi teh berbasis penginderaan jauh di Indonesia sebagai salah satu upaya awal penerapan TVI-PlanetScope di perkebunan dataran tinggi Sumatera Barat, dengan nilai tambah utama berupa kemampuan menyajikan distribusi produktivitas secara spasial per blok yang tidak dapat dicapai melalui metode konvensional maupun kajian statistik semata, sehingga menegaskan potensi penginderaan jauh sebagai alat pendukung keputusan manajemen perkebunan yang efektif dan berbasis data aktual.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa pemanfaatan Transformed Vegetation Index (TVI) berbasis citra satelit PlanetScope resolusi 3meter mampu menggambarkan kondisi vegetasi tanaman teh secara spasial dengan tingkat akurasi yang baik. Analisis regresi linier antara nilai TVI dan produksi pucuk teh aktual menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7933, yang berarti sekitar 79,33% variasi produksi dapat dijelaskan oleh perubahan nilai TVI, dengan persamaan regresi $y = 1388,8x - 1458,4$. Hasil validasi model juga menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,7005, mengindikasikan kemampuan prediksi yang cukup kuat. Total estimasi produksi pucuk teh di Afdeling B PTPN IV Danau Kembar diperkirakan mencapai 119,5 ton, dengan produksi tertinggi pada blok 24 sebesar 8,80 ton dan terendah pada blok 46 sebesar 0,48 ton. Meskipun terdapat selisih antara estimasi model yaitu 119,5 ton dan catatan produksi resmi perusahaan pada bulan April yaitu 318,5 ton, perbedaan ini utamanya disebabkan oleh penggunaan satu waktu perekaman citra yang tidak dapat merepresentasikan akumulasi hasil panen dari beberapa siklus pemangkasan. Terlepas dari keterbatasan tersebut, pendekatan Penginderaan Jauh berbasis TVI terbukti baik dalam menyajikan informasi spasial distribusi produktivitas per blok yang tidak dapat diperoleh dari metode konvensional. Penggunaan citra multi-temporal dan teknik pemodelan yang melibatkan aspek yang lebih kompleks seperti machine learning direkomendasikan guna meningkatkan akurasi estimasi serta keselarasan dengan data produksi aktual, sekaligus mendukung pengelolaan perkebunan teh yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan. Kontribusi utama penelitian ini adalah: menghadirkan model estimasi produksi teh berbasis TVI dan PlanetScope yang pertama kali diterapkan pada perkebunan dataran tinggi Sumatera Barat; menghasilkan peta distribusi produktivitas spasial per blok yang tidak dapat diperoleh melalui metode konvensional, sehingga langsung dapat

dimanfaatkan sebagai alat bantu keputusan manajerial perkebunan; serta membuktikan kemampuan penerapan TVI pada berbagai kondisi geografis sebagai dasar pengembangan sistem pemantauan produksi perkebunan berbasis penginderaan jauh di Indonesia yang stabil untuk komoditas teh berkanopi rapat, yang membuka peluang penerapan serupa pada perkebunan teh lainnya di Indonesia.

REFERENCES

- [1] Anjarsari, M. Ariyanti, dan S. Rosniawaty, “Studi Ekofisiologis Tanaman Teh guna Meningkatkan Pertumbuhan, Hasil, dan Kualitas Teh,” *Kultivasi*, vol. 19, no. 3, Des 2020, doi: 10.24198/kultivasi.v19i3.26623.
- [2] Septyadi, E. Gracia, dan R. P. Syamsuddin, “Tea Plantation Mapping Using UV Multispectral Imagery,” *Int. J. Remote Sens. Earth Sci.*, vol. 20, no. 1, hal. 08, Jun 2023, doi: 10.30536/j.ijreses.2023.v20.a3817.
- [3] Lin, “UAV-Based Estimation of Tea Leaf Area Index in Mountainous Terrain: Integrating Topographic Correction and Interpretable Machine Learning,” 2026.
- [4] Dini Nuraeni, “Spatial Machine Learning for Monitoring Tea Leaves and Crop Yield Estimation Using Sentinel-2 Imagery, (A Case of Gunung Mas Plantation, Bogor).”
- [5] Weiss, F. Jacob, dan G. Duveiller, “Remote Sensing for Agricultural Applications: A meta-review,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 236, hal. 111402, Jan 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- [6] K. Amankulova, N. Farmonov, P. Akramova, I. Tursunov, dan L. Mucsi, “Comparison of PlanetScope, Sentinel-2, And Landsat 8 Data in Soybean Yield Estimation Within-Field Variability with Random Forest Regression,” *Heliyon*, vol. 9, no. 6, hal. e17432, Jun 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17432.
- [7] K. Swain, Singha, dan B. Pradhan, “Estimating Total Rice Biomass and Crop Yield at Field Scale Using PlanetScope Imagery Through Hybrid Machine Learning Models,” *Earth Syst. Environ.*, vol. 8, no. 4, hal. 1713–1731, Des 2024, doi: 10.1007/s41748-024-00481-2.
- [8] C. Diao dan G. Li, “Near-Surface and High-Resolution Satellite Time Series for Detecting Crop Phenology,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 9, hal. 1957, Apr 2022, doi: 10.3390/rs14091957.
- [9] Y. Zhao et al., “Evaluating fine-scale phenology from PlanetScope satellites with ground observations across temperate forests in eastern North America,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 283, hal. 113310, Des 2022, doi: 10.1016/j.rse.2022.113310.
- [10] A. Aklilu Tesfaye dan B. Gessesse Awoke, “Evaluation of The Saturation Property of Vegetation Indices Derived from Sentinel-2 In Mixed Crop-Forest Ecosystem,” *Spat. Inf. Res.*, vol. 29, no. 1, hal. 109–121, Feb 2021, doi: 10.1007/s41324-020-00339-5.
- [11] N. G. Silleos, T. K. Alexandridis, I. Z. Gitas, and K. Perakis, “Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years,” *Geocarto Int.*, vol. 21, no. 4, pp. 21–28, 2006.
- [12] A. Bannari, D. Morin, F. Bonn, dan A. R. Huete, “A Review of Vegetation Indices,” *Remote Sens. Rev.*, vol. 13, no. 1–2, hal. 95–120, Agu 1995, doi: 10.1080/02757259509532298.
- [13] J. Xue dan B. Su, “Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications,” *J. Sensors*, vol. 2017, hal. 1–17, 2017, doi: 10.1155/2017/1353691.
- [14] Rama Rao, M. Kapoor, N. Sharma, dan K. Venkateswarlu, “Yield Prediction And Waterlogging Assessment for Tea Plantation Land Using Satellite Image-Based Techniques,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 28, no. 7, hal. 1561–1576, Apr 2007, doi: 10.1080/01431160600904980.
- [15] Li, Y. Wang, K. Fan, Y. Mao, Y. Shen, dan Z. Ding, “Evaluation of Important Phenotypic Parameters of Tea Plantations Using Multi-Source Remote Sensing Data,” *Front. Plant Sci.*, vol. 13, Jul 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.898962.
- [16] N. Xing et al., “A Transformed Triangular Vegetation Index for Estimating Winter Wheat Leaf Area Index,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 1, hal. 16, Des 2019, doi: 10.3390/rs12010016.
- [17] B. Zheng, J. B. Campbell, G. Serbin, dan J. M. Galbraith, “Remote Sensing of Crop Residue and Tillage Practices: Present Capabilities and Future Prospects,” *Soil Tillage Res.*, vol. 138, hal. 26–34, Mei 2014, doi: 10.1016/j.still.2013.12.009.
- [18] Waspadi dan P. Danoedoro, “Comparing Per-Pixel and Object-Based Classification Results Using Two Different Land-Cover/Land-Use Classification Schemes: A Case Study Using Landsat-8 OLI Imagery,” in *Sixth International Symposium on LAPAN-IPB Satellite*, Des 2019, hal. 126, doi: 10.1117/12.2541876.
- [19] K. Yan et al., “A Global Systematic Review of The Remote Sensing Vegetation Indices,” *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 139, hal. 104560, Mei 2025, doi: 10.1016/j.jag.2025.104560.
- [20] G. Galidaki et al., “Vegetation Biomass Estimation with Remote Sensing: Focus on Forest And Other Wooded Land Over The Mediterranean Ecosystem,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 38, no. 7, hal. 1940–1966, Apr 2020, doi: 10.1080/01431161.2016.1266113.
- [21] Y. Zeng et al., “Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally,” *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 3, no. 7, hal. 477–493, Mei 2022, doi: 10.1038/s43017-022-00298-5.