

ESTIMASI PRODUKTIVITAS KOPI DENGAN INDEKS VEGETASI MENGUNAKAN CITRA SPOT-7

Devi Nilam Sari^{1*}, Bandi Sasmito¹, Firman Hadi¹ dan Akbar Kurniawan²

¹Departemen Teknik Geodesi-Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jawa Tengah Indonesia
Jl. Prof Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia-75123Telp./Faks: (024) 736834

²Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Gedung Teknik Geomatika, Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: sdevinilam@gmail.com*

(Diterima 22 November 2022, Disetujui 4 Desember 2022)

ABSTRAK

Menurut data BPS (Badan Pusat Statistik) tahun 2021 terkait produksi kopi, Provinsi Jawa Timur menduduki peringkat ke-16 se-Indonesia untuk produksi kopi. Kebun Bangelan di Desa Bangelan, Kabupaten Malang, merupakan salah satu perkebunan kopi di Jawa Timur. Pemantauan produksi kopi secara terus menerus diperlukan karena hasil Kebun Bangelan bervariasi dari tahun ke tahun. Dalam bidang pertanian, penginderaan jauh dapat digunakan untuk memperkirakan produktivitas tanaman kopi. Pada penelitian ini, digunakan data *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Modified Normalized Difference Vegetation Index* (MNDVI), dan *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI). Untuk mengatasi kesulitan piksel campuran, *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA) adalah pengklasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai ketepatan klasifikasi tutupan lahan MESMA dan mempelajari seberapa produktivitas kopi di Kebun Bangelan. Dalam penelitian ini estimasi produktivitas dihitung dengan menggunakan regresi linier sederhana, polinomial, dan linier berganda. Model estimasi terbaik, sebagaimana ditentukan oleh perhitungan regresi linier sederhana, dihasilkan oleh NDVI, yang memiliki standar deviasi 505,875 kg/Ha dan produktivitas 34,396.369 kg/Ha. Model estimasi terbaik dihasilkan oleh NDVI dengan standar deviasi sebesar 464,158 kg/Ha dan produktivitas sebesar 34,387.395 kg/Ha, menurut perhitungan menggunakan regresi polinomial. Model estimasi terbaik untuk perhitungan menggunakan regresi linier berganda adalah NDVI, yang memiliki standar deviasi 352,414 kg/Ha dan produktivitas 34,394.658 kg/Ha.

Kata kunci : *Estimasi Produktivitas Kopi, GNDVI, MESMA, MNDVI, NDVI*

ABSTRACT

East Java Province is ranked 16th in Indonesia for coffee production, according to BPS (Central Statistics Agency) data for 2021. Bangelan Plantation in Bangelan Village, Malang Regency, is one of the coffee plantations in East Java. Continuous monitoring of coffee production is necessary because Bangelan Plantation yields vary from year to year. In agriculture, remote sensing can be used to estimate the productivity of coffee plants. In this study, data were used for the sNormalized Difference Vegetation Index (NDVI), Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI), and Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI). To overcome the difficulties of mixed pixels, Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) is the classifier used in this study. The purpose of this study was to assess the accuracy of MESMA's land cover classification and study the productivity of coffee in Bangelan Estate. In this study, productivity estimates were calculated using simple linear, polynomial, and multiple linear regressions. The best estimation model, as determined by simple linear regression calculations, is produced by NDVI, which has a standard deviation of 505.875 kg/Ha and a productivity of 34,396.369 kg/Ha. The best estimation model is produced by NDVI with a standard deviation of 464.158 kg/Ha and a productivity of 34,387.395 kg/Ha, according to calculations using polynomial regression. The best estimation model for calculations using multiple linear regression is the NDVI, which has a standard deviation of 352.414 kg/ha and a productivity of 34.394.658 kg/ha.

Keywords : *Coffe Productivity Estimation, GNDVI, MESMA, MNDVI, NDVI*

1. PENDAHULUAN

Indonesia menghasilkan berbagai varietas kopi, antara lain robusta, liberika, dan arabika. Kopi merupakan barang ekspor penting Indonesia yang dapat meningkatkan devisa negara dan berkontribusi pada kegiatan ekonomi Indonesia. Saat ini setiap tahunnya, terdapat permintaan yang besar akan kopi. Isu ini diperkuat dengan bertambahnya jumlah kedai kopi di setiap daerah yang menyebabkan permintaan kopi meningkat. Pemantauan berkelanjutan diperlukan untuk membantu memetakan konsumsi kopi tahunan agar tidak terjadi kelangkaan.

Menurut analisis data Menteri Keuangan Indonesia dari Indonesia Eximbank Institute, permintaan kopi akan terus meningkat pada tahun 2022 seiring dengan ekspansi pasar dunia dalam industri ini. Oleh karena itu, untuk menentukan produksi kopi diperlukan estimasi manajemen terhadap produktivitas kopi. Memperkirakan produktivitas kopi dapat menjaga pasokan dan permintaan tetap konsisten, sehingga mencegah kelangkaan.

Untuk memperkirakan produktivitas kopi dapat dilakukan dengan penginderaan jauh. Karena sulitnya memperoleh data lapangan regional, khususnya untuk pemetaan lapangan, penerapan penginderaan jauh pada tanaman kopi cukup menjanjikan. Dengan menggunakan penginderaan jauh, tanaman kopi dapat dievaluasi kematangannya baik sekali atau berulang kali selama dua atau lebih pengamatan (Johnson, et al., 2004). Perkiraan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan indeks vegetasi. Algoritma yang disebut indeks vegetasi digunakan pada gambar untuk menyoroti elemen kerapatan vegetasi atau elemen yang terkait dengan kerapatan, seperti biomassa, *Leaf Area Index* (LAI), konsentrasi, dan sebagainya (Arnanto, 2013).

Tujuan indeks vegetasi adalah menghasilkan angka yang memungkinkan penilaian kuantitatif sifat-sifat tanaman. Indeks vegetasi bermanfaat untuk memungkinkan kita menilai kekuatan tumbuhan dan, akibatnya, mengidentifikasi daerah dengan vegetasi yang kurang berkembang. NDVI adalah ukuran kehijauan yang banyak digunakan dalam penelitian kesehatan lingkungan (Jimenez, et al., 2022). MNDVI dan GNDVI, dua indeks vegetasi yang diturunkan dari NDVI. Karena dapat menunjukkan seberapa hijau vegetasinya, MNDVI dianggap sebagai sumber data yang signifikan mengenai keadaan tanaman. Sedangkan GNDVI adalah indeks vegetasi yang dibuat untuk mengatasi kekurangan NDVI. GNDVI lebih responsif terhadap konsentrasi klorofil daripada indeks NDVI. Menurut penelitian (Nurani, 2015), perhitungan

produksi kopi dengan citra Landsat 8 menggunakan indeks vegetasi NDVI dan pendekatan nilai spektral menunjukkan bahwa semakin besar nilai produksi maka semakin rapat tajuknya.

Dalam penelitian (Bernardes, et al., 2012), terdapat permasalahan piksel campuran antara tanaman kopi dan tutupan lahan lainnya karena di perkebunan kopi cukup banyak memiliki tanaman naungan. Untuk mengatasinya pada penelitian tersebut hanya menggunakan piksel yang hanya mewakili tanaman kopi yang homogen. Pada penelitian (Hunt, et al., 2020), dijelaskan bahwa untuk mengatasi permasalahan piksel campuran, pendekatan sub-piksel spektral lebih baik dalam menangkap heterogenitas daripada pendekatan berbasis piksel.

Piksel campuran kemungkinan terjadi karena keragaman dan topografi Kebun Bangelan. Oleh karena itu, klasifikasi MESMA, yang dapat mengidentifikasi tutupan lahan hingga sub-piksel, dapat mengatasi ketidakmampuan piksel campuran dalam penelitian ini untuk membedakan antara tanaman kopi dan tanaman naungan. Solusi untuk meningkatkan akurasi pemetaan tanaman kopi dapat ditemukan dengan menggunakan citra resolusi tinggi untuk mengidentifikasi lokasi tanaman kopi (Ramirez, et al., 2006). Oleh karena itu, SPOT-7, citra beresolusi dengan rasio aspek tinggi, digunakan dalam penelitian ini. Pada saluran pankromatik, SPOT-7 memiliki resolusi spasial 1,5 meter, dan pada saluran multispektral memiliki resolusi 6 meter.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, pemisahan kanal, koreksi radiometrik, penggabungan kanal, dan pemotongan gambar semuanya digunakan sebagai langkah pra-pemrosesan. Citra SPOT-7 dari BRIN ORPA terdiri dari empat kanal yang tergabung sehingga kanal perlu dipisahkan sebelum koreksi radiometrik dapat dilakukan. Untuk memperbaiki nilai yang salah dalam piksel citra, koreksi radiometrik juga digunakan. Secara umum, radiometrik adalah teknik untuk meningkatkan kualitas citra sehingga kualitas visual menjadi lebih baik. Kanal yang telah dikoreksi secara radiometrik kemudian digabung lagi.

Layer stacking adalah teknik untuk mengintegrasikan banyak saluran gambar independen ke dalam satu file menggunakan penggabungan prinsip; wilayah perekaman tetap berada di satu area dan lebar dimensi gambar tetap sama. Gambar tersebut kemudian dipotong untuk fokus pada area Kebun Bangelan. Pembuatan pustaka spektral merupakan salah satu proses pengolahan yang digunakan dalam penyelidikan ini

untuk menentukan klasifikasi tutupan lahan yang terdiri dari 6 kelas dengan masing-masing 50 plot. Untuk memetakan dan memangkas pecahan tiap kelas dengan skala 1, digunakan algoritma IES (*Iterative Endmember Selection*). Dengan menghapus dan menambahkan anggota terakhir berulang kali, IES menentukan kumpulan anggota terakhir yang menghasilkan nilai kappa Cohen tertinggi. Sesudah anggota terakhir dipilih, perlu untuk mengoptimalkan perpustakaan spektral dengan mendefinisikan satu set gambar yang memiliki kualitas yang tinggi untuk anggota terakhir. Kualitas perpustakaan spektral merupakan kunci keberhasilan dari piksel campuran. Keluaran dari proses IES kemudian dimasukkan, dan model 3-EM digunakan untuk mengklasifikasikan data menggunakan metode MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*). *Shade normalisation* dan *hard classification* digunakan untuk memproses fraksi MESMA untuk menghasilkan citra klasifikasi 6 kelas. Keakuratan klasifikasi tutupan lahan dengan menggunakan pendekatan MESMA selanjutnya dievaluasi.

Memfaatkan plugin AcATAMa (*Accuracy Assessment of Thematic Maps*), *stratified random sampling* digunakan untuk memilih sampel untuk uji akurasi ini. Data MESMA dikonversi dari format raster ke vektor untuk membedakan tutupan lahan kopi dan lamtoro dari tutupan lahan lainnya jika akurasinya memenuhi persyaratan 80%. Transformasi indeks vegetasi NDVI, MNDVI, dan GNDVI yang digunakan dalam penelitian ini masing-masing mengalami proses *sliding window*. Setelah indeks vegetasi ditransformasi, dilakukan perhitungan regresi linier sederhana, polinomial, dan linier berganda. Perhitungan tersebut menggunakan data sekunder produktivitas tanaman kopi yang diterima dari PTPN XII Kebun Bangelan.

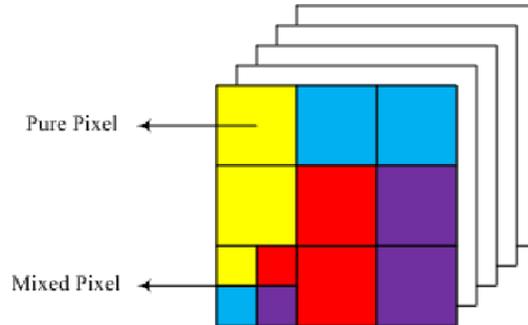
2.1 SPOT-7

SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) adalah suatu formasi satelit pemantauan bumi yang mencitra secara optis dan memiliki resolusi tinggi. Satelit ini ideal untuk pemantauan dan kartografi karena dibangun untuk memberikan cakupan wilayah yang luas. Pada 30 Juni 2014, Airbus Defense & Space meluncurkan SPOT-7 ke orbit. Area perekaman satelit SPOT-6 dan SPOT-7 sama pada 60 km x 60 km dan posisinya terpisah 180° dalam orbit yang sama.

2.2 Piksel Campuran

Spectral unmixing membandingkan profil spektral setiap piksel gambar dengan referensi anggota akhir spektral yang ditetapkan untuk mengidentifikasi fraksi kehadiran setiap anggota

akhir dalam piksel (Cunnick, et al., 2023). Penelitian ini memperoleh nilai piksel murni yang berasal dari citra SPOT-7 yang dipakai yang disebut dengan anggota terakhir citra menggunakan proses *Pixel Purity Index* (PPI). PPI berguna untuk menentukan piksel murni relatif secara spektral (Pascari & Danoedoro, 2013). Anggota terakhir yang digunakan pada penelitian ini adalah bangunan, jalan, kopi, lahan terbuka, tanaman penanang, dan vegetasi lain yang dipilih dengan melihat wilayah kebun.



Gambar 1. Piksel Campuran (Rajabi dan Ghassemian, 2015)

Jumlah item yang ditemukan dalam jumlah objek yang diidentifikasi dalam satu piksel, yang menyebabkan ketidakmurnian dalam nilai piksel, adalah inti dari piksel campuran. Proses pemisahan spektral melibatkan pengukuran spektrum dari piksel campuran yang telah dibagi menjadi kumpulan spektrum konstituen, atau anggota akhir, dan pengaturan fraksi pencocokan, atau kelimpahan, yang menampilkan persentase setiap anggota akhir yang ada dalam piksel. Piksel campuran memiliki lebih dari satu jenis materi di dalamnya dan terlihat karena dua alasan berbeda. Pertama, tentukan apakah resolusi spasial sensor cukup rendah untuk anggota akhir yang berdekatan untuk berbagi satu piksel. Kedua, terlepas dari resolusi spasial sensor, material yang beragam dapat digabungkan untuk membentuk campuran yang homogen, seperti partikel pasir di pantai.

2.3 MESMA

Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis, atau singkatnya MESMA, adalah versi pengembangan dari SMA (*Spectral Mixture Analysis*) yang digunakan untuk menentukan fraksi komponen piksel (Roberts, et al., 1996). Pendekatan ini dapat secara efektif mengekstraksi data multispektral atau hiperspektral pada tutupan lahan. Membangun perpustakaan spektral menggunakan anggota akhir dari setiap kelas adalah tahap pertama

dalam proses pemrosesan MESMA (Fernandez-Garcia, et al., 2021). Diperlukan untuk mengoptimalkan perpustakaan spektral setelah anggota akhir dipilih untuk menentukan kumpulan gambar berkualitas baik untuk anggota akhir.

Pengambilan training sampel piksel dalam penentuan fraksi piksel dilakukan dengan digitasi karena keakuratan efektifitas MESMA adalah pada pengambilan training sampel piksel.

2.4 Indeks Vegetasi

2.4.1 NDVI

Tingkat konsentrasi klorofil daun ditampilkan oleh NDVI. Hasil perhitungan antara pita NIR dan pita merah, yang menghasilkan nilai NDVI, berkisar dari 1 hingga 1. Sementara tingkat NDVI yang rendah menyiratkan kerapatan vegetasi yang rendah, tingkat NDVI yang tinggi menunjukkan vegetasi hijau yang lebat.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (1)$$

NIR : kanal 4

Red : kanal 3

2.4.2 MNDVI

MNDVI cukup untuk memenuhi kebutuhan pemantauan Sistem Pengamatan Bumi (EOS) terhadap vegetasi jangka panjang yang akurat. Skala MNDVI dari -1 hingga 1. Teknik ini mengungkapkan variabilitas tanaman di seluruh bidang dan menawarkan interpretasi yang lebih unggul dari nilai NDVI.

$$\text{MNDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / ((\text{NIR} + \text{Red} - 2) \times \text{Blue}) \quad (2)$$

NIR : kanal 4

Red : kanal 3

Blue : kanal 1

2.4.3 GNDVI

Indeks kerapatan vegetasi GNDVI seperti dengan NDVI, dengan pengecualian yang mengukur spektrum hijau di wilayah 0,54 hingga 0,57 mikron daripada spektrum merah. GNDVI sering digunakan untuk memperkirakan kandungan air dan konsentrasi nitrogen pada daun tanaman. GNDVI lebih sensitif terhadap jumlah klorofil dibandingkan indeks NDVI (Somba, et al., 2015).

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green}) \quad (3)$$

NIR : kanal 4

Green : kanal 2

2.5 Sliding Window

Alat r.texture memiliki parameter yang disebut *sliding window*. Gambar penginderaan jauh yang lebih tahan terhadap kesalahan geometris dan atmosfer dapat dievaluasi menggunakan *sliding window*. Sesuai kebutuhan, nilai jendela *sliding window*. Untuk mendapatkan korelasi yang kuat, pemrosesan *sliding window* atau pengukuran tekstur memberikan harapan (Ulumuddin, et al., 2005).

2.6 Uji Normalitas

Uji normalitas yaitu metode uji yang bertujuan dalam evaluasi distribusi data pada suatu variabel atau kumpulan data, terlepas dari apakah distribusinya normal maupun tidak. Uji normalitas dilakukan pada sampel data produktivitas model dan data produktivitas untuk validasi model. Dalam penelitian ini menggunakan uji Liliefors (Sudjana, 2005):

$$z_i = (x_i - \bar{x}) / s_d \quad (4)$$

z_i : transformasi dari angka ke notasi dalam distribusi normal

x_i : angka dalam data

\bar{x} : rerata x

s_d : standar deviasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Analisis Klasifikasi MESMA

Enam kategori tutupan lahan, termasuk tanaman kopi, tanaman naungan, bangunan, jalan, ruang terbuka, dan tanaman lainnya, digunakan untuk membuat perpustakaan spektral dalam penelitian ini. Pada perkebunan kopi, tanaman naungan digunakan untuk menaungi tanaman kopi agar mendapat sinar matahari yang cukup dan tidak cepat menguning. Identifikasi tanaman selain kopi dipengaruhi oleh keberadaan tanaman naungan dan tanaman lainnya. Untuk mencegah kesalahan pengidentifikasian tersebut, klasifikasi MESMA digunakan. Namun dalam penelitian ini, terdapat tumbuhan lamtoro yang identik di dalam blok kopi tersebut. Jadi, kopi dan lamtoro adalah piksel murni penelitian ini.

Kopi, tanaman naungan, dan tanaman lainnya adalah vegetasi, meskipun dengan tingkat kehijauan yang berbeda-beda, sehingga pola spektralnya tidak berbeda nyata. Kopi memiliki warna hijau, sedangkan tanaman naungan memiliki pola spektral

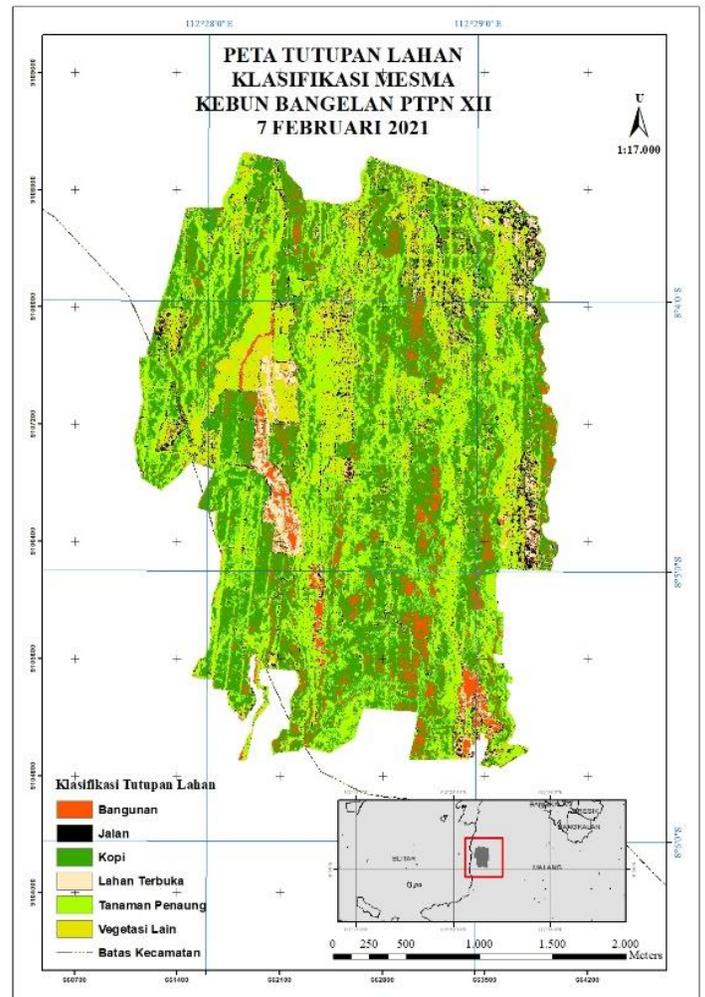
yang merupakan perpaduan antara hijau agak kebiruan. Tanaman lainnya memiliki perpaduan warna hijau dan biru. Pola spektral bangunan hadir berwarna merah, coklat, merah muda, putih, dan kuning. Begitu juga dengan pola spektral jalan menampilkan warna coklat, kuning, dan putih. Warna pola spektral ruang terbuka adalah kuning, putih, dan merah muda, hampir sama persis dengan pola spektral dari bangunan. Karena citra SPOT-7 hanya berisi empat kanal—Biru, Hijau, Merah, dan NIR—hasil klasifikasi MESMA pada foto SPOT-7 tidak terlalu baik. MESMA dianggap lebih cocok untuk citra dengan banyak kanal. Karena letaknya yang berada di perbatasan blok mudah dilihat, sampel dari sengan digunakan untuk membuat perpustakaan spektral dari tanaman naungan. Pembuatan perpustakaan spektral dari tanaman peneduh lamtoro tidak dilakukan sebagai sampel karena pemangkasan pohon lamtoro sebelumnya menyebabkan tidak terlihat pada citra. Lamtoro terletak di blok yang sama dengan tanaman kopi.

Tabel 1. Kelas klasifikasi MESMA

No	Kelas	Piksel
1	Kopi	
2	Tanaman naungan	
3	Bangunan	
4	Jalan	
5	Ruang terbuka	
6	Tanaman lain	

Nilai perpustakaan spektral pada Tabel 1 sebenarnya ada yang tumpang tindih. Ini mungkin terjadi, hal tersebut menunjukkan bahwa data perpustakaan spektral telah menjadi positif palsu. Bentuk tutupan lahan yang berbeda secara taksonomi tetapi secara spektral serupa sering menyebabkan kegagalan pengambilan data perpustakaan spektral (positif palsu) (Nidamanuri & Ramiya, 2015). Menurut (Tucker & W, 1977) dalam (Nidamanuri & Ramiya, 2015), sejumlah faktor, termasuk pigmen, kadar air, dan struktur internal daun untuk vegetasi, dapat berkontribusi pada pantulan yang ditemukan pada tutupan lahan. Alhasil, nilai pantulan tanaman kopi, tanaman naungan, dan tanaman lain bisa serupa. Khususnya,

pigmen tanaman (seperti klorofil dan karotenoid) dan susunan sel serta celah udara yang membentuk struktur bagian dalam daun sangat mempengaruhi reaksi vegetasi. Karakteristik ini, yang dimiliki oleh sebagian besar spesies vegetasi hijau sepanjang tahun dan hanya dibedakan berdasarkan komposisinya, dapat menghasilkan kesamaan spektral di berbagai kanal spektral. Karena ada begitu banyak spektrum yang sebanding di perpustakaan spektral, kemungkinan positif palsu meningkat, menurunkan akurasi pengenalan tutupan lahan. Gambar 1 adalah hasil dari klasifikasi tutupan lahan dengan MESMA.



Gambar 2. Hasil klasifikasi MESMA

3.2 Hasil dan Analisis Uji Akurasi

Uji akurasi metode koefisien Kappa untuk mengklasifikasikan tutupan lahan memiliki nilai antara 0 sampai dengan 1. Matriks konfusi tutupan

lahan ini dihitung menggunakan plugin AcATAMA. Tabel 2 menampilkan matriks konfusi dari hasil klasifikasi MESMA dengan citra referensi.

Tabel 2. Hasil matriks konfusi

	1	2	3	4	5	6	Σ	User accuracy
1	4	0	20	2	4	1	31	0,13
2	0	14	1	2	3	0	20	0,7
3	0	0	134	0	12	0	146	0,92
4	0	0	0	11	2	0	13	0,85
5	0	0	13	0	109	4	126	0,87
6	0	0	7	0	8	45	60	0,75
Σ	4	14	175	15	138	50	396	
Producer accuracy	1	1	0,77	0,73	0,79	0,9		0,80051

- 1 : bangunan
- 2 : jalan
- 3 : kopi
- 4 : ruang terbuka
- 5 : tanaman naungan
- 6 : tanaman lainnya

Menurut (Short, 1982), nilai ketelitian tutupan lahan adalah 0.80 atau 80%, sehingga nilai ketelitian tutupan lahan ini bisa diterima. Nilai akurasi pengguna bangunan dalam perhitungan hanya 0.129, tergolong rendah jika dibandingkan dengan hasil kelas lain. Hal ini terjadi karena dari 31 data bangunan, 20 data bangunan dikategorikan sebagai kopi, 2 data bangunan sebagai ruang terbuka, 4 data bangunan sebagai tanaman naungan, dan 6 data bangunan sebagai data tanaman lainnya. Ini terjadi sebagai akibat dari kesalahan klasifikasi MESMA dalam piksel deteksi nilai. Hasil akurasi yang kurang baik dalam penelitian ini bisa disebabkan oleh interpretasi sampel *spectral library* dengan kondisi sebenarnya di lapangan memiliki perbedaan waktu.

3.3 Hasil Uji Normalitas

Uji Liliefors digunakan dalam uji normalitas penelitian ini (Sudjana, 2005). Uji normalitas ini menggunakan data produktivitas kopi. 30 sampel data produktivitas model dan 18 sampel data produktivitas untuk validasi model, dilakukan uji normalitas.

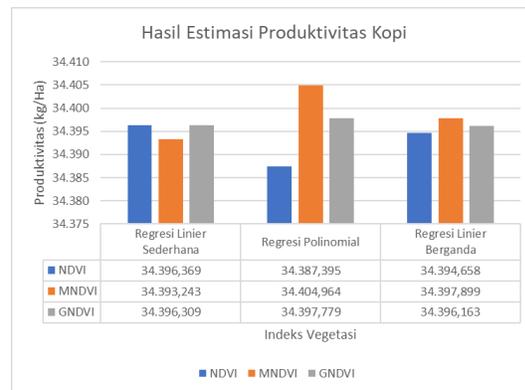
- H0 : Data memiliki distribusi yang normal.
- H1 : Data tidak memiliki distribusi yang normal.

Nilai L yang diprediksi dalam data produktivitas model adalah 0,132, lebih kecil dari Lo, yaitu 0,161 ketika n = 30 (seperti yang ditunjukkan pada tabel nilai kritis Liliefors). Sampel uji model dikatakan berdistribusi normal jika nilai L hitung lebih kecil dari L tabel (Lo), dalam hal ini H0 diterima dan H1 ditolak.

Nilai L yang diprediksi dalam data produktivitas untuk validasi model adalah 0,155, lebih kecil dari Lo (seperti yang ditunjukkan pada tabel nilai kritis Liliefors), yang memiliki nilai 0,200 pada n = 18. H0 dapat diterima jika nilai L yang diperkirakan adalah kurang dari tabel L (Lo). dan H1 tidak terbukti, maka ditentukan sampel validasi model berdistribusi normal.

3.4 Hasil dan Analisis Estimasi

Tiga faktor harus diperhitungkan saat membuat estimasi, termasuk perkiraan hasil dan apakah itu benar, *overestimate*, atau *underestimate*. *Underestimate* merupakan istilah yang digunakan ketika hasil estimasi terlalu rendah, sedangkan *overestimate* adalah istilah yang dipakai ketika hasil estimasi terlalu tinggi, dan benar adalah istilah yang terjadi ketika hasil estimasi sesuai dengan hasil sebenarnya. Namun, hasil estimasi yang benar jarang terjadi. Tabel 2 menampilkan hasil estimasi dengan menggunakan perhitungan regresi linier sederhana, polinomial, dan linier berganda.



Gambar 3. Hasil estimasi produktivitas kopi

Jumlah produktivitas dari kopi di lapangan adalah 34,396.382 kg/Ha. Validasi produksi kopi ini didasarkan atas hitungan kopi panen basah. Dapat dilihat pada Gambar 2 total estimasi regresi linier sederhana dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,396.369 kg/Ha, dengan menggunakan MNDVI menghasilkan

estimasi sebesar 34,393.243 kg/Ha, dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,396.309 kg/Ha. Total estimasi regresi polinomial dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,387.395 kg/Ha, dengan menggunakan MNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,404.964 kg/Ha, dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,397.779 kg/Ha. Jumlah estimasi regresi linier berganda dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,394.658 kg/Ha, dengan menggunakan MNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,397.899 kg/Ha, dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34,396.163 kg/Ha.

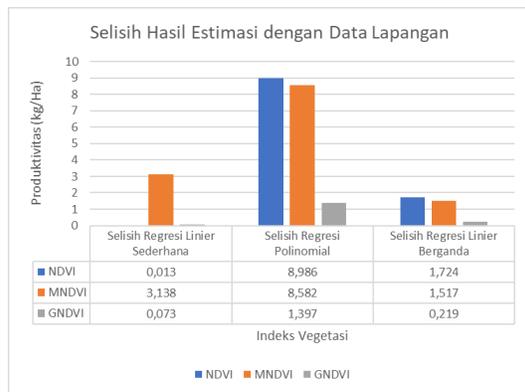
1.517 kg/Ha dari hasil sebenarnya. Hasil estimasi NDVI dan GNDVI adalah *underestimate* karena lebih rendah daripada hasil sebenarnya, sedangkan hasil estimasi dari MNDVI adalah *overestimate* karena melebihi hasil lapangan.

3.5 Hasil dan Analisis Kesalahan Model

Model estimasi mengandung kesalahan karena produktivitas kopi dipengaruhi oleh banyak faktor seperti pengelolaan tanaman, budidaya, dan cuaca selain faktor kerapatan tanaman, umur, ketinggian, luas, dan jumlah pohon. Tidak ada metode yang efektif untuk pemodelan produktivitas karena biomassa bukanlah satu-satunya elemen yang mempengaruhi produktivitas kopi. Meskipun indeks vegetasi dapat mempengaruhi biomassa tanaman, tetapi produktivitas juga dipengaruhi oleh kondisi iklim tropis.

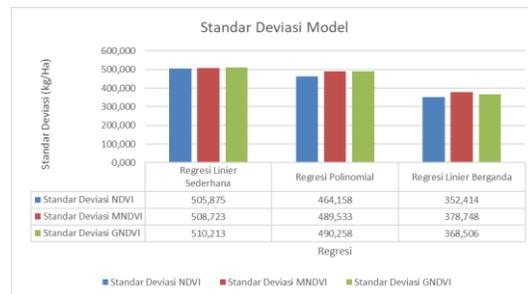
3.5.1 Standar Deviasi

Semakin rendah nilai standar deviasi, maka semakin mendekati rata-rata, sedangkan jika nilai standar deviasi semakin tinggi, artinya semakin lebar rentang variasi datanya. Dapat dilihat dari Gambar 5, dengan menggunakan perhitungan regresi linier sederhana, nilai standar deviasi terkecil yaitu sebesar 505.875 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 510.213 kg/Ha terdapat pada GNDVI. Dengan menggunakan regresi polinomial, nilai standar deviasi terkecil yaitu sebesar 464.158 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 489.533 kg/Ha terdapat pada MNDVI. Sedangkan dengan menggunakan regresi linier berganda, nilai standar deviasi terkecil yaitu sebesar 352.414 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 378.748 kg/Ha terdapat pada MNDVI.



Gambar 4. Selisih estimasi dengan data lapangan

Total produktivitas dari kopi di lapangan adalah 34,396.382 kg/Ha. Dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa nilai selisih estimasi dan produktivitas dari regresi linier sederhana terendah terdapat pada NDVI yaitu sebesar 0.013 kg/Ha dan selisih tertinggi pada MNDVI yaitu sebesar 3.138 kg/Ha. Nilai estimasi GNDVI lebih rendah 0.073 kg/Ha dari hasil sebenarnya. Hasil estimasi NDVI, MNDVI dan GNDVI adalah *underestimate* karena dibawah hasil lapangan. Dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa nilai selisih estimasi dan produktivitas dari regresi polinomial terendah terdapat pada GNDVI yaitu sebesar 1.397 kg/Ha dan selisih tertinggi pada NDVI yaitu sebesar 8.986 kg/Ha. Nilai estimasi MNDVI lebih rendah 8.582 kg/Ha dari hasil sebenarnya. Hasil estimasi NDVI adalah *underestimate* karena dibawah hasil lapangan dan hasil estimasi MNDVI dan GNDVI adalah *overestimate* karena melebihi hasil lapangan. Dari Gambar IV-14 terlihat bahwa nilai selisih estimasi dan produktivitas terendah dari regresi linier berganda terdapat pada GNDVI yaitu sebesar 0.219 kg/Ha dan selisih tertinggi pada NDVI yaitu sebesar 1.724 kg/Ha. Nilai estimasi MNDVI lebih tinggi



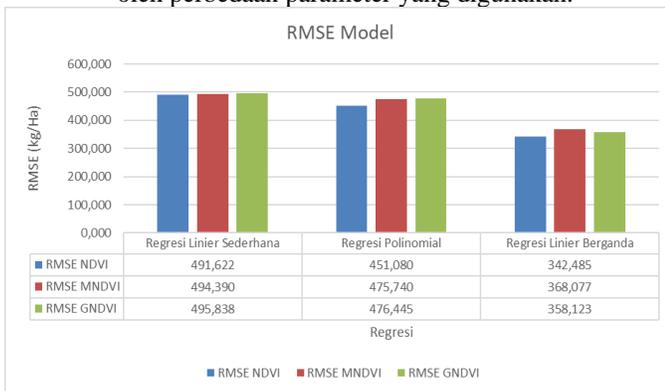
Gambar 5. Standar deviasi model

Gambar 5 dapat dilihat bahwa standar deviasi terkecil dimiliki oleh regresi linier berganda yang menggunakan lima parameter yaitu kerapatan vegetasi, umur, luas lahan, ketinggian, dan jumlah

pohon. Berbeda dengan regresi linier dan polinomial yang hanya menggunakan satu parameter saja yaitu kerapatan vegetasi. Hal tersebut menunjukkan jika menggunakan lebih banyak parameter yang memengaruhi faktor pertumbuhan kopi maka kesalahan lebih kecil dan hasilnya lebih akurat.

3.5.2 Root Mean Square Error (RMSE)

Semakin kecil nilai RMSE, semakin dekat nilai yang diprediksi dan diamati. Dapat dilihat dari Gambar 6, dengan menggunakan perhitungan regresi linier sederhana, nilai RMSE terkecil yaitu sebesar 491.622 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 495.838 kg/Ha terdapat pada GNDVI. Dengan menggunakan regresi polinomial, nilai RMSE yaitu sebesar 451.060 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 476.740 kg/Ha terdapat pada GNDVI. Sedangkan dengan menggunakan regresi linier berganda, nilai standar deviasi terkecil yaitu sebesar 342.485 kg/Ha terdapat pada NDVI dan tertinggi yaitu sebesar 368.077 kg/Ha terdapat pada MNDVI. Sama dengan standar deviasi, perbedaan hasil RMSE disebabkan oleh perbedaan parameter yang digunakan.



Gambar 6. RMSE Model

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Kesimpulan berikut dibuat dari penelitian yang telah dilakukan:

1. Akurasi keseluruhan dari klasifikasi tutupan lahan MESMA adalah 0.80051 atau 80.51%, sehingga klasifikasi dapat diterima karena lebih dari 80%.
2. Estimasi berikut diperoleh dari pendugaan produktivitas tanaman kopi pada blok kopi dan lamtoro menggunakan regresi linier sederhana:
 - a. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi NDVI adalah 34,396.369 kg/Ha.
 - b. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi MNDVI adalah 34,393.243 kg/Ha.

- c. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi GNDVI adalah 34,396.309 kg/Ha.
3. Estimasi berikut diperoleh dari pendugaan produktivitas tanaman kopi pada blok kopi dan lamtoro menggunakan regresi polinomial:
 - a. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi NDVI adalah 34,387.395 kg/Ha.
 - b. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi MNDVI adalah 34,404.964 kg/Ha.
 - c. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi GNDVI adalah 34,397.779 kg/Ha.
 4. Estimasi berikut diperoleh dari pendugaan produktivitas tanaman kopi pada blok kopi dan lamtoro menggunakan regresi linier berganda:
 - a. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi NDVI adalah 34,394.658 kg/Ha.
 - b. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi MNDVI adalah 34,397.899 kg/Ha.
 - c. Hasil estimasi dengan menggunakan indeks vegetasi GNDVI adalah 34,396.163 kg/Ha.

4.2 Saran

Penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Penelitian sebaiknya menggunakan data citra mendekati panen.
2. Menggunakan model estimasi yang lebih ideal.
3. Untuk memastikan bahwa hasil estimasi hanya didasarkan pada kopi robusta, maka klasifikasi yang digunakan dalam penelitian harus dapat membedakan antara kopi robusta dan naungannya.
4. Memperhatikan kanal dan panjang gelombang citra untuk resolusi spektral.

REFERENSI

- Arnanto, A., 2013. Pemanfaatan Transformation Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Citra Landsat TM untuk Zonasi Vegetasi di Lereng Merapi Bagian Selatan. *Geomedia*, p. 158.
- Bernardes, T. et al., 2012. Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. *Journal Remote Sensing*, p. 1.
- Cunnick, H., Ramage, J. M., Magness, D. & Peters, S. C., 2023. Mapping Fractional Vegetation Coverage across Wetland Classes of Sub-Arctic Peatlands Using Combined Partial Least Squares Regression and Multiple Endmember Spectral Unmixing. *Remote Sensing*, XV(5), p. 2.
- Fernandez-Garcia, V. et al., 2021. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) Applied to the Study of Habitat

- Diversity in the Fine-Grained Landscapes of the Cantabrian Mountains. *Remote Sensing*, p. 6.
- Hunt, D. A. et al., 2020. Review of Remote Sensing Methods to Map Coffee Production Systems. *Journal Remote Sensing*, p. 9.
- Jimenez, R. B., Lane, K. J., Hutyra, L. R. & Fabian, M. P., 2022. Spatial resolution of Normalized Difference Vegetation Index and greenness exposure misclassification in an urban cohort. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 32(2), p. 1.
- Johnson, L. F., Herwitz, S. R., Lobitz, B. M. & Dunagan, S. E., 2004. Feasibility of Monitoring Coffee Field Ripeness with Airborne Multispectral Imagery. *Information & Electrical Technologies Division of ASAE*, p. 4.
- Nidamanuri, R. R. & Ramiya, A. M., 2015. Spectral identification of materials by reflectance spectral library search. *Geocarto International*, p. 616.
- Nurani, R., 2015. Estimasi Produksi Tanaman Kopi Berbasis Pengolahan Citra Landsat 8 di Kabupaten Temanggung Jawa Tengah. pp. 1-9.
- Pascari, M. R. & Danoedoro, P., 2013. Linear Spectral Mixture Analysis (LSMA) untuk Tutupan Lahan Menggunakan Citra Landsat ETM+ di Yogyakarta dan Sekitarnya. p. 157.
- Rajabi, R. & Ghassemian, H., 2015. Sparsity Constrained Graph Regularized NMF for Spectral Unmixing of Hyperspectral Data. *Journal of the Indian Society*, pp. 269-278.
- Ramirez, G. M., Zullo, J. J., Assad, E. & Pinto, e. H., 2006. Comparação de dados dos satélites Ikonos-II e Landsat/ETM+. *Pesq. agropec. bras*, p. 2.
- Roberts, D. et al., 1996. Mapping Chaparral in The Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models. *Remote Sensing of Environment*, p. 2.
- Short, N. M., 1982. Landsat Tutorial Workbook-Basics of Satellite Remote Sensing. *Washington DC: NASA*.
- Somba, S., Rauf, S. & Aboe, A. F., 2015. Analisis Karakteristik Spasial Kota Pare-Pare Berbasis GIS dan Remote Sensing Menggunakan Citra Landsat 8. *Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar*.
- Sudjana, 2005. Metode Statistika. In: Bandung: Tarsito, p. 67.
- Sudjana, 2005. *Metode Statistika*. Bandung: Tarsito.
- Tucker, C. J. & W, G. M., 1977. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Appl Opt*.
- Ulumuddin, Y. I., Sulistyawati, E., Hakim, D. M. & Harto, A. B., 2005. Korelasi Stok Karbon dengan Karakteristik Spektral Citra Landsat: Studi Kasus Gunung Papandayan. *Pertemuan Ilmiah Tahunan MAPIN XIV*, p. 8.