

ESTIMASI PRODUKTIVITAS KOPI MENGGUNAKAN CITRA SPOT-7 DENGAN TRANSFORMASI INDEKS VEGETASI (Studi Kasus: Perkebunan Bangelan PTPN XII)

Devi Nilam Sari^{*)}, Bandi Sasmito, Firman Hadi

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
Email: sdevinilam@gmail.com^{*)}

ABSTRAK

Kopi adalah komoditas perdagangan yang paling berharga kedua di dunia sehingga dapat meningkatkan devisa negara. Berlandaskan data produksi kopi 2021 yang diterbitkan oleh BPS (Badan Pusat Statistika), Provinsi Jawa Timur mendapatkan urutan ke-16 di Indonesia dalam produksi kopi. Salah satu perkebunan kopi yang ada di Jawa Timur adalah Kebun Bangelan di Desa Bangelan, Kabupaten Malang. Perkebunan Bangelan adalah perkebunan peninggalan Pemerintah Hindia Belanda. Perkebunan ini didirikan pada tahun 1901 sebagai kebun percobaan. Setiap tahun produktivitas dari Kebun Bangelan tidak menentu, oleh karena itu perlu adanya *monitoring* secara kontinu. Pada bidang pertanian, penginderaan jauh dapat dimanfaatkan untuk melakukan estimasi produktivitas dari tanaman kopi. Penginderaan jauh sendiri adalah akuisisi data suatu objek oleh sebuah alat yang tidak secara fisik melakukan kontak dengan objek tersebut. Salah satu keuntungan penginderaan jauh adalah citra dapat secara cepat meskipun untuk daerah yang sulit dijelajahi secara terrestrial. Riset ini memakai data citra SPOT-7 dengan indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), MNDVI (*Modified Normalized Difference Vegetation Index*), dan GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*). Klasifikasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*) untuk mengatasi permasalahan piksel campuran. Tujuan dari riset ini untuk mengetahui akurasi klasifikasi tutupan lahan dengan MESMA dan mengetahui estimasi produktivitas kopi di Kebun Bangelan.

Perhitungan estimasi produktivitas pada penelitian ini menggunakan regresi linier sederhana, polinomial, dan linier berganda. Berdasar perhitungan regresi linier sederhana, model estimasi terbaik dihasilkan oleh NDVI yang memiliki standar deviasi sebesar 0,506 ton/Ha dengan produktivitas sebesar 34.396,309 kg/Ha. Berlandas perhitungan dengan regresi polinomial, model estimasi terbaik dihasilkan oleh NDVI dengan standar deviasi sebesar 0,464 ton/Ha dan produktivitas sebesar 34.397,779 kg/Ha. Pada perhitungan dengan regresi linier berganda, model estimasi terbaik dihasilkan oleh NDVI dengan standar deviasi sebesar 0,352 ton/Ha dan produktivitas sebesar 34.397,899 kg/Ha.

Kata Kunci: Estimasi Produktivitas Kopi, Indeks Vegetasi, Kebun Bangelan, Spectral Mixture Analysis, SPOT-7

ABSTRACT

Coffee can boost the nation's foreign exchange because it is the second-most valued trading good in the world. East Java Province ranks 16th in Indonesia for coffee output according to the BPS's (Central Statistics Agency) 2021 data. The Bangelan Plantation is one of the East Java coffee farms still in operation. It is located in Bangelan Village, Malang Regency. The Dutch East Indies government left a plantation behind, known as Bangelan Plantation. As a test garden, this plantation was built in 1901. The production of Bangelan Plantation varies from year to year, necessitating ongoing observation. Remote sensing in agriculture can be used to calculate the production of coffee plants. Remote sensing is the process of gathering information about an object from a gadget without actually touching it. Images can be quickly captured via remote sensing, even in locations that are challenging to investigate on foot. The vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), MNDVI (Modified Normalized Difference Vegetation Index), and GNDVI are used in this study's SPOT-7 picture data (Green Normalized Difference Vegetation Index). The classification employed in this study to address mixed-pixel issues is MESMA (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis). This study aims to quantify coffee productivity in the Bangelan Plantation as well as the precision of MESMA's land cover classification.

In this study, simple linear regression, polynomial regression, and multiple linear regression were used to calculate productivity estimates. Based on simple linear regression calculations, the NDVI, which has a standard deviation of 0.506 tons/ha and a productivity of 34,396.309 kg/ha, produces the best estimation model. Based on polynomial regression calculations, the NDVI model, which has a standard deviation of 0.464 tons/ha and a productivity of 34,397.779 kg/ha, produces the best estimation model. The best estimating model for calculations using multiple linear regression is the NDVI, which has a standard deviation of 0.352 tons/ha and a productivity of 34,397.899 kg/ha.

Keywords: Bangelan Plantation, Coffe Productivity Estimation, Spectral Mixture Analysis, SPOT-7, Vegetation Index

^{*)} Penulis Utama, Penanggung Jawab

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Kopi merupakan satu diantara dari beragam minuman yang populer di kalangan masyarakat global. Berlandaskan data yang dikumpulkan dari Badan Pusat Statistik (BPS), besaran ekspor kopi di Indonesia pada saat tahun 2020 ialah senilai US\$ 809,2 juta. Kebutuhan kopi saat ini setiap tahunnya mengalami peningkatan. Hal ini diperkuat dengan adanya peningkatan kenaikan *coffee shop* di setiap daerah yang mengakibatkan kebutuhan akan kopi meningkat. Menteri Keuangan Indonesia menyebutkan, berdasarkan dari catatan Indonesia *Eximbank Institute*, komoditas kopi pada 2022 memiliki permintaan yang akan terus mengalami peningkatan selaras terhadap meluasnya pasar pada sektor ini secara global. Untuk itu diperlukan adanya manajemen estimasi produktivitas kopi untuk menghitung produktivitas kopi.

Estimasi produktivitas tersebut berfungsi untuk memperkirakan jumlah produksi kopi yang nantinya akan membantu pihak pengelola perkebunan untuk memperkirakan biaya dan pendapatan. Menurut (Silva, Alves, Silva, & Figueiredo, 2021), estimasi hasil kopi dapat membantu pemerintah dan pembuat kebijakan untuk melindungi pertanian dan perdagangan domestik dengan menawarkan peringatan dini tentang potensi risiko bencana dan dampak kehilangan hasil panen karena peristiwa cuaca buruk (Kouadio, Byrareddy, Sawadogo, & Newlands, 2021). Penginderaan jauh dapat dimanfaatkan untuk *monitoring* estimasi produktivitas kopi. Pemanfaatan penginderaan jauh pada tanaman kopi sangat menjanjikan, dikarenakan sulitnya untuk memperoleh data lapangan dalam skala regional, terutama untuk pemetaan lapangan.

Pada penelitian (Nurani, 2015), estimasi produksi kopi dengan citra Landsat 8 menggunakan indeks vegetasi NDVI serta pendekatan nilai spektral sedangkan pada penelitian (Aziz, 2019) estimasi produksi kopi dengan Sentinel-2 menggunakan indeks vegetasi SAVI, NDVI, MSAVI, RDVI, ARVI, SR, IPVI, dan DVI, serta klasifikasi *supervised*. Dalam penelitian (Bernardes, Moreira, Adami, Giarolla, & Rudorff, 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. Maka dari itu dalam penelitian ini untuk membedakan piksel campuran antara tanaman kopi dan tanaman naungan dapat diatasi dengan klasifikasi *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA) yang dapat mengidentifikasi tutupan lahan hingga sub-piksel.

Tanaman kopi biasanya ditanam di lahan kecil yang memiliki kemiringan yang cukup besar, sehingga diperlukan citra resolusi tinggi untuk mengidentifikasi area produksi kopi (Brunsell, Pontes, & Lamparelli, 2009). Oleh karena hal tersebut, riset ini menggunakan

SPOT-7 yang adalah citra resolusi yang tinggi. SPOT-7 mempunyai resolusi spasial 1,5 meter pada kanal pankromatik serta 6 meter pada kanal multispektral. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui hasil pengolahan indeks vegetasi NDVI, MNDVI, dan GNDVI dengan klasifikasi MESMA.

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana ketelitian atau akurasi klasifikasi MESMA dengan menggunakan citra SPOT-7 untuk mengidentifikasi tanaman kopi di Perkebunan Bangelan?
2. Bagaimana hasil estimasi produktivitas kopi di Perkebunan Bangelan dengan memanfaatkan metode MESMA terhadap indeks vegetasi NDVI, MNDVI, dan GNDVI?

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan riset ini adalah:

1. Mengetahui ketelitian atau akurasi klasifikasi MESMA dengan menggunakan citra SPOT-7 untuk mengidentifikasi tanaman kopi di Perkebunan Bangelan.
2. Mengetahui hasil produktivitas kopi di Perkebunan Bangelan dengan memanfaatkan metode MESMA terhadap indeks vegetasi NDVI, MNDVI, dan GNDVI.

I.4 Batasan Masalah

Terdapat sejumlah batasan pada riset ini dijabarkan demikian:

1. Wilayah riset berada pada lingkup Perkebunan Bangelan yang berlokasi di Desa Bangelan, Kecamatan Wonosari.
2. Citra satelit pada penelitian ini memakai citra SPOT-7 yang mencakup wilayah kebun kopi Perkebunan Bangelan.
3. Klasifikasi piksel campuran dalam penelitian ini menggunakan metode MESMA.
4. Algoritma indeks vegetasi dalam penelitian ini menggunakan NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), MNDVI (*Modified Normalized Difference Vegetation Index*), dan GNDVI (*Green Difference Vegetation Index*).
5. Data produktivitas dari Perkebunan Bangelan pada tahun 2021.
6. Objek dari penelitian ini adalah kopi robusta namun tercampur oleh pohon lamtoro yang mengalami pemangkasan sehingga piksel murni dari hasil klasifikasi MESMA adalah tanaman kopi dan lamtoro.

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Kopi

Kopi adalah jenis tumbuhan perkebunan yang telah dibudidayakan di Indonesia serta mempunyai taraf ekonomis tinggi. Tanaman ini termasuk ke dalam famili *Rubiaceae* serta genus *Coffea*. Tumbuhan kopi pertama kali ditemukan di Afrika. Berikut adalah beberapa jenis

dari kopi dan karakteristiknya:

1. Arabika
Memiliki dimensi bakal buah yang lebih mungil daripada kopi robusta, mengandung kafein yang rendah, rasa serta aroma lebih nikmat. Selain itu, jenis kopi ini memiliki beberapa varietas, seperti: Kopi Kolombia, *Guatemala Huehuetenango*, *Colombian Milds*, *Hawaiian Kona Coffee*, *Ethiopian Yirgacheffe*, *Jamaican Blue Mountain Coffee*, Kenyan, serta *Java Coffee*. Jenis kopi arabika berasal dari Ethiopia.
2. Robusta
Memiliki tekstur yang sedikit lebih kasar pada lidah dan memiliki rasa yang manis. Jenis kopi robusta bisa hidup pada wilayah yang mempunyai ketinggian 400-700 mdpl dan bersuhu 21-24°C. Berbeda dari jenis tanaman kopi liberika, tanaman kopi jenis robusta tidak mudah dirusak oleh hama.
3. Liberika
Memiliki ukuran bunga, daun, pohon, hingga buah yang lebih besar daripada jenis robusta dan arabika. Kopi liberika ini bermula dari Liberia di Afrika Barat. Jenis kopi ini agak rentan terhadap penyakit karat daun.
4. Ekselsa
Memiliki aroma yang sangat tajam dan sangat kental. Kopi ekselsa bermula dari Afrika Barat dan ditemukan pertama kali di dekat Danau Chad. Jenis kopi ini pas ditanam pada dataran rendah yang basah.

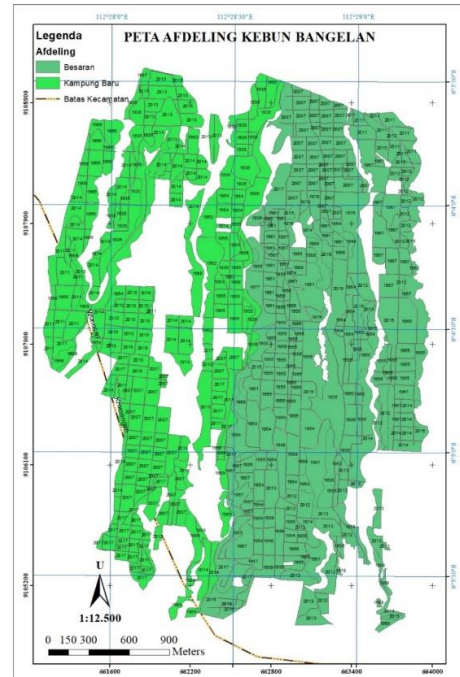
II.2 Produktivitas Kopi

Produktivitas adalah kemampuan lahan atau tanah untuk memproduksi tanaman. Maksud produktivitas dalam penelitian ini yaitu hasil dari kopi warna merah yang telah dipetik yang dibagi dengan luas lahan sebenarnya. Jika melihat data luas lahan serta produksi kopi di Indonesia, tingkat produktivitas kopi masih rendah sehingga perlu ditingkatkan. Salah satu cara dalam meningkatkan produktivitas kopi adalah dengan menggunakan tanaman klon yang unggul. Tanaman yang terbuat dari dua induk yang menghasilkan tanaman unggul itulah yang disebut tanaman klon yang unggul. Sistem penanaman kopi dengan tanaman naungan menekankan pada kelangsungan dari keluaran jangka panjang yang bersifat ramah lingkungan serta tetap menguntungkan

II.3 Perkebunan Bangelan

Kebun Bangelan terletak di Desa Bangelan, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Malang, Jawa Timur, tepatnya di lereng selatan Gunung Kawi. Kebun ini terletak pada ketinggian 450 – 680 mdpl dan memiliki koordinat 8°LS dan 112°30'00" BT. Perkebunan Bangelan adalah perkebunan peninggalan Pemerintah Hindia Belanda. Perkebunan ini didirikan pada tahun 1901 sebagai kebun yang digunakan guna melangsungkan percobaan budidaya tanaman kopi robusta dalam bentuk *green beans*. Usaha pembudidayaan kopi robusta ini sebagai salah satu cara guna menuntaskan persoalan matinya tanaman kopi

arabika karena terpapar penyakit karat daun.



Gambar 1. Peta Afdeling Kebun Bangelan

II.4 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh dipahami sebagai sebuah keilmuan serta kemampuan guna mendapatkan informasi mengenai objek, wilayah, ataupun melalui proses analisa data yang didapatkan memakai suatu alat yang tidak berhubungan langsung bersama objek, wilayah, atau kejadian yang ditelaah (Lillesand & Kiefer, 1979). Saat ini penginderaan jauh mengacu pada pemakaian teknologi sensor berbasis satelit guna mengidentifikasi mendeteksi serta mengklasifikasikan objek yang berada di permukaan bumi (Shabrina, Sukmono, & Subiyanto, 2020). Respon spektral setiap objek di permukaan bumi berbeda-beda terhadap energi elektromagnetik yang mengenainya. Secara rutin, data penginderaan jauh telah digunakan untuk memetakan wilayah, meningkatkan prediksi hasil, mengukur produksi, serta menganalisis kualitas (Brunsell, Pontes, & Lamparelli, 2009).

II.5 SPOT-7 (*Satellite Pour l'Observation de la Terre-7*)

SPOT adalah suatu formasi satelit pemantauan bumi yang mencitra secara optis dan memiliki resolusi yang tinggi. Satelit ini didesain secara khusus untuk menyediakan cakupan wilayah yang luas sehingga cocok untuk melayani kartografi serta pemantauan. SPOT-7 diluncurkan oleh *Airbus Defence & Space* pada 30 Juni tahun 2014.

Citra SPOT-7 memiliki 4 kanal multispektral yang terdiri dari biru (kanal 1), hijau (kanal 2), merah (kanal 3), dan NIR (kanal 4), serta 1 band pankromatik. Pada kanal multispektral masing-masing memiliki resolusi spasial 6 m, namun memiliki panjang gelombang yang berbeda-beda. Pada kanal pankromatik memiliki resolusi spasial 1,5 m dengan panjang gelombang 597,6 nm.

II.6 Koreksi Radiometrik

Koreksi radiometrik dilakukan dengan mengubah nilai DN ke TOA (*Top Of Atmosphere Radiance*) terlebih dahulu.

$$Lb(p) = \frac{DC}{GAIN(b)} + BIAS(b) \dots\dots\dots(1)$$

- Keterangan :
- Lb(p) : TOA Radiance
 - DC(p) : Digital Count sebuah piksel
 - GAIN(b) : GAIN pada kanal i
 - BIAS(b) : BIAS pada kanal i

Hasil TOA radiance yang didapatkan diolah menjadi TOA reflectance yang dimana adalah rasio dari TOA radiance yang dinormalisasi oleh solar irradiance. Rumus (II-2) adalah rumus yang digunakan untuk menghitung TOA reflectance:

$$pb(p) = \frac{\pi Lb(p)}{E\theta(b) \cos(\theta_s)} \dots\dots\dots(2)$$

- Keterangan :
- pb(p) : TOA Reflectance
 - Lb(p) : TOA Radiance
 - Eθ : Solar Irradiance
 - θs : Sudut Zenith

II.7 Indeks Vegetasi

II.7.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

NDVI menunjukkan tingkat konsentrasi klorofil daun. Nilai NDVI didapatkan dari perhitungan antara band NIR dan band Red yang hasilnya memiliki rentang antara -1 hingga 1. Tingginya taraf NDVI yang tinggi mengindikasikan kerapatan vegetasi hijau yang tinggi sedangkan taraf NDVI yang rendah menunjukkan kelembaban vegetasi yang rendah (Gessesse & Melesse, 2019). Rumus ini menggunakan fakta fisik berkas gelombang cahaya yang berasal dari daun.

$$\text{Algoritma NDVI} = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \dots\dots\dots(3)$$

- Keterangan :
- NIR : Near Infrared – Band
 - Red : Red – Band

II.7.2 Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI)

MNDVI mungkin memuaskan dalam memenuhi kebutuhan untuk pengukuran vegetasi jangka panjang yang akurat untuk Bumi Program Sistem Pengamatan (EOS). MNDVI memiliki rentang nilai dari -1 hingga 1. MNDVI berlaku untuk semua jenis tanaman.

$$\text{Algoritma MNDVI} = \frac{(NIR-Red)}{((NIR+Red-2) \times Blue)} \dots\dots\dots(4)$$

- Keterangan :
- NIR : Near Infrared – Band
 - Red : Red – Band
 - Blue : Blue – Band

II.7.3 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Indeks kerapatan vegetasi GNDVI memiliki kemiripan dengan NDVI kecuali alih-alih spektrum

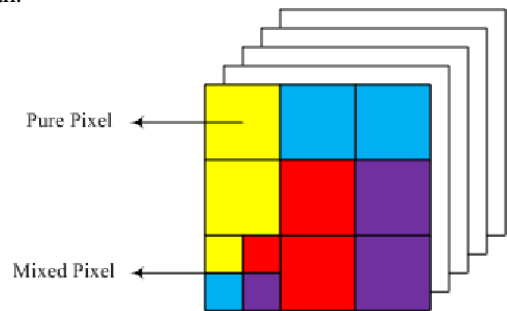
merah, ia mengukur spektrum hijau dalam kisaran 0,54 hingga 0,57 mikron. Indeks vegetasi ini dikembangkan untuk memperbaiki kekurangan NDVI. Dibandingkan dengan indeks NDVI, GNDVI lebih sensitif terhadap konsentrasi klorofil (Somba, Rauf, & Aboe, 2015). Pemilihan dari indeks vegetasi GNDVI dipilih memakai kanal hijau yang menggantikan kanal merah di NDVI.

$$\text{Algoritma GNDVI} = \frac{(NIR-Green)}{(NIR+Green)} \dots\dots\dots(5)$$

- Keterangan :
- NIR : Near Infrared – Band
 - Green : Green – Band

II.8 Piksel Campuran

Ukuran piksel spasial untuk sensor multispektral dan hiperspektral seringkali cukup besar sehingga banyak zat berbeda yang dapat berkontribusi pada spektrum yang diukur dari satu piksel (Keshava, 2003). Piksel campuran adalah persoalan tentang sejumlah objek yang dijumpai pada sejumlah objek yang teridentifikasi disatu piksel sehingga terjadi ketidakh murnian pada nilai piksel. Dengan adanya piksel campuran akan sulit untuk melakukan klasifikasi tutupan lahan apalagi jika wilayah tersebut di perkotaan.



Gambar 2 Piksel Campuran

Pada Gambar II-1, visualisasi dari piksel campuran dapat terlihat. Dengan asumsi bahwa satu piksel hanyalah satu objek yang berpengaruh, metode klasifikasi berbasis piksel tradisional seperti klasifikasi supervised rentan terhadap piksel campuran. Faktanya, lebih dari satu objek yang mungkin termuat dalam satu piksel.

II.8.1 Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA)

Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis atau yang biasa disingkat MESMA merupakan lanjutan metode dari SMA (Spectral Mixture Analysis) yang digunakan untuk menghitung fraksi komponen dari sebuah piksel (Roberts, Gardner, Church, Usrin, & Scheer, 1996). MESMA dapat mengatasi kekurangan dari SMA dengan cara menambah jenis serta jumlah endmember yang bervariasi pada basis per-piksel (Azzahra, 2022). Metode ini dapat mengambil informasi tutupan lahan baik dari data multispektral maupun hiperspektral. Asumsi dari MESMA yaitu gambar terdiri dari sejumlah endmember yang berbeda secara spektral.

Langkah pertama yang dilakukan saat pengolahan MESMA yaitu membangun spectral library dengan endmember masing-masing kelas (Fernandez-Garcia, et al., 2021). Sesudah endmember dipilih, perlu untuk

mengoptimalkan *spectral library* dengan mendefinisikan satu set gambar yang memiliki kualitas yang tinggi untuk *endmember*. Kualitas *spectral library* merupakan kunci keberhasilan dari piksel campuran.

- MESMA dapat dilakukan dengan 4 metode yaitu:
- EAR (*Endmember Average RMSE*)
 - CoB (*Count-based Endmember Selection*)
 - MASA (*Minimum Average Spectral Angle*)
 - IES (*Iterative Endmember Selection*)

II.9 Sliding Window

Sliding window adalah parameter yang terdapat di *tools r.texture*. *Sliding window* dapat menilai perubahan pada gambar penginderaan jauh yang lebih kuat terhadap kesalahan geometrik dan atmosferik. Penelitian ini menggunakan *sliding window* 3x3 dengan matriks ko-okurensi tingkat keabuan MOC-2.

$$MOC-2 = [1 - \exp\{-2(HY2 - HXY)\}]^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

II.10 Regresi

II.10.1 Regresi Linier Sederhana

Regresi linier sederhana adalah regresi yang hanya memiliki satu variabel bebas. Ada hubungan linier antara satu variabel bebas (X) dan variabel terikat (Y) dalam analisis regresi linier sederhana. Analisis regresi linier sederhana dapat digunakan untuk memprediksi nilai variabel terikat jika nilai variabel babas meningkat atau menurun serta untuk menentukan arah dan kekuatan hubungan antara variabel bebas dan terikat.

$$Y = a + bx \dots\dots\dots(7)$$

II.10.2 Regresi Polinomial

Struktur analisis untuk model regresi polinomial sama dengan model regresi linier berganda. Dengan kata lain, setiap peringkat atau urutan variabel prediktor (X) dalam model polinomial mengubah variabel asli dan dianggap sebagai variabel prediktor baru (X) dalam linier berganda. Dengan kata lain, setiap peringkat atau urutan variabel prediktor (X) dalam model polinomial mengubah variabel asli dan dianggap sebagai variabel prediktor baru (X) dalam linier berganda.

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \dots\dots\dots(8)$$

II.10.3 Regresi Linier Berganda

Regresi linier berganda adalah regresi yang menggunakan beberapa variabel bebas. Untuk mengetahui arah dan besarnya pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat dilakukan analisis regresi linier berganda. Pada dasarnya, regresi linier berganda adalah model prediksi atau peramalan menggunakan data skala interval atau rasio, dengan lebih dari satu prediktor.

$$Y = \alpha + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_nX_n + e \dots\dots\dots(9)$$

II.11 Uji Akurasi Pemodelan

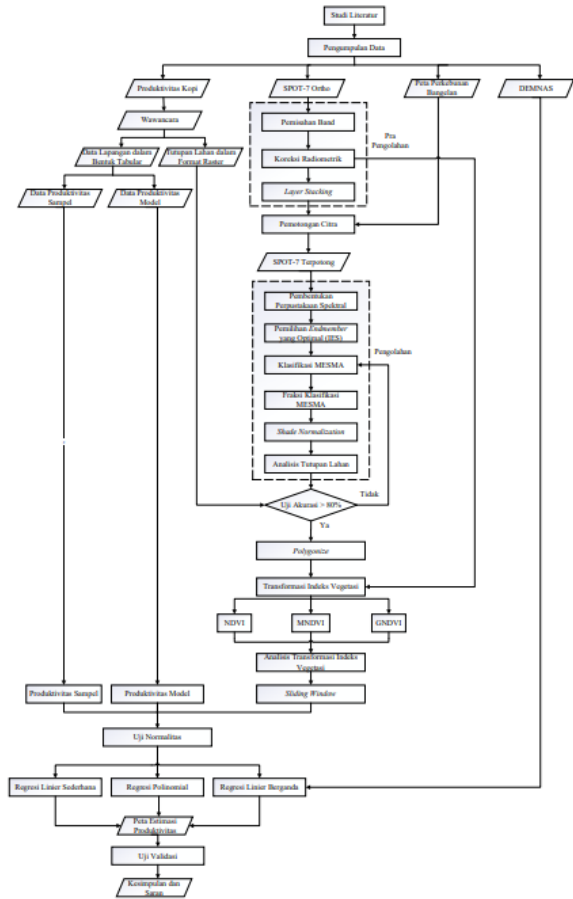
Uji akurasi model dilakukan untuk mengetahui seberapa besar ketelitian dari model yang telah dibuat. Menurut (Aziz, 2019), nilai akurasi estimasi produktivitas kopi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan RMSE (*Root Mean Square Error*). Persamaan tersebut dapat dilihat Rumus (10):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y-Y')^2}{N}} \dots\dots\dots(10)$$

III. Pelaksanaan Penelitian

III.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar III-1 berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

III.2 Alat dan Data Penelitian

Alat dan data nan dipergunakan di riset ini yaitu sebagai berikut:

III.2.1 Alat

Alat yang digunakan untuk mendukung penelitian ini adalah:

- Perangkat Keras
Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan satu unit laptop ASUS ROG G531GT Intel® Core™ i7-9750-H Processor 64-bit Operating System 16.00 GB RAM
- Perangkat Lunak
Perangkat lunak yang digunakan dalam pengolahan data ini adalah QGIS 3.16, Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Excel 2016, dan R Studio.

III.2.2 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat secara detail pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penelitian

No.	Data	Sumber
1	Citra SPOT-7 tahun 2021 dengan <i>processing level 1 ORTHO</i>	Pusat Data dan Informasi BRIN ORPA
2	Batas blok Perkebunan Bangelan skala 1:25.000 tahun 2022	PTPN XII
3	Data produktivitas kopi Kebun Bangelan tahun 2021 dalam bentuk tabular	PTPN XII
4	DEMNAS	Ina Geoportal

III.3 Pengolahan Data Penelitian

Tahapan pra pengolahan yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pemisahan band, koreksi radiometrik, *layer stacking*, dan pemotongan citra. Citra SPOT-7 yang didapatkan dari BRIN ORPA adalah gabungan dari 4 band. Untuk melakukan koreksi radiometrik, 4 band tersebut harus dipisah terlebih dahulu. Pemisahan band tersebut menggunakan *plugin SCP (Semi-Automatic Classification Plugin)* yang dikembangkan oleh Luca Congedo. Selanjutnya dilakukan koreksi radiometrik guna mengoreksi kesalahan nilai pada piksel citra. Band-band yang telah dilakukan koreksi radiometrik, selanjutnya dilakukan penggabungan kembali. Lalu citra dipotong sesuai dengan wilayah Kebun Bangelan.

Tahapan pengolahan yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya pembuatan *spectral library* untuk membantu identifikasi klasifikasi tutupan lahan yang terdiri dari 6 kelas dengan plot masing-masing memiliki 50 plot. Kemudian dilakukan pengolahan IES (*Iterative Endmember Selection*) untuk memetakan dan memangkas fraksi dari setiap kelas. IES bekerja dengan menemukan kumpulan dari anggota terakhir yang menghasilkan nilai *cohen's kappa* tertinggi dengan cara menghapus dan menambah anggota terakhir secara *iterative*. Lalu dilakukan klasifikasi MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*) dengan memasukkan hasil dari proses IES dan menggunakan model 3-EM. Fraksi dari pengolahan MESMA dilakukan *hard classification* dan *shade normalization* untuk menghasilkan *classification image* 6 kelas.

Setelah itu dilakukan uji akurasi untuk mengetahui tingkat akurasi dari klasifikasi tutupan lahan menggunakan metode MESMA. Sampel yang digunakan pada uji akurasi ini adalah *stratified random sampling* dengan menggunakan *plugin AcATaMa (Accuracy Assessment of Thematic Maps)*. Jika akurasi telah memenuhi syarat maka hasil dari MESMA diubah formatnya dari raster menjadi vektor untuk memisahkan tutupan lahan kopi dan lamtoro dengan tutupan lahan lainnya. Transformasi indeks vegetasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu NDVI, MNDVI, dan GNDVI yang masing-masing mengalami pengolahan *sliding window*. Sesudah pengolahan transformasi indeks vegetasi, dilakukan perhitungan regresi linier sederhana, polinomial, dan linier berganda yang akan diregresikan dengan data sekunder produktivitas tanaman kopi yang diperoleh dari PTPN XII Kebun Bangelan. Lalu dilanjutkan dengan perhitungan akurasi dari model yang telah dibuat untuk mengetahui metode terbaik dalam

estimasi produktivitas kopi.

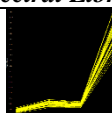

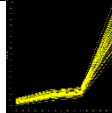

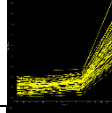

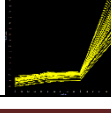

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Hasil dan Analisis Tutupan Lahan Klasifikasi MESMA

Dalam pembuatan *spectral library* pada penelitian ini menggunakan enam kelas tutupan lahan yaitu tanaman kopi, tanaman penaung, bangunan, jalan, lahan terbuka, dan vegetasi lain. Tanaman penaung pada perkebunan kopi digunakan untuk menaungi tanaman kopi agar mendapatkan sinar matahari yang cukup sehingga tanaman kopi tidak cepat menguning. Dengan adanya tanaman penaung dan vegetasi lain dapat mempengaruhi identifikasi terhadap tanaman selain kopi. Oleh karena itu, klasifikasi MESMA digunakan untuk menghindari kesalahan identifikasi tersebut. Namun, pada penelitian ini dalam blok kopi terdapat tanaman lamtoro yang tidak bisa dibedakan, sehingga *pure* piksel dari penelitian ini adalah kopi dan lamtoro.

Pola *spectral* dari kopi, tanaman penaung, dan vegetasi lain tidak jauh berbeda dikarenakan kopi, tanaman penaung, dan vegetasi lain merupakan vegetasi, walaupun memiliki tingkat kehijauan yang berbeda. Pola *spectral* kopi berwarna hijau, pola *spectral* tanaman penaung berwarna hijau agak kebiruan, sedangkan pola *spectral* vegetasi lain berwarna perpaduan antara hijau dan biru. Pola *spectral* pada bangunan memiliki warna berbeda-beda seperti merah, coklat, pink, putih dan kuning. Begitu pun dengan pola *spectral* dari jalan yang memiliki yang memiliki warna coklat, kuning, dan putih. Pola *spectral* dari lahan terbuka pun memiliki warna yang hampir sama dengan bangunan, yaitu warna kuning, putih, dan pink. Hasil klasifikasi MESMA pada citra SPOT-7 tidak terlalu memiliki hasil yang begitu baik karena pada citra SPOT-7 hanya memiliki 4 band yaitu *Blue, Green, Red, dan NIR*. MESMA dirasa lebih cocok untuk citra yang memiliki band yang banyak. Pada pembuatan *spectral library* dari tanaman penaung menggunakan sampel dari sengon karena dapat terlihat dengan jelas yang letaknya berada di tepi blok. Pembuatan *spectral library* dari tanaman penaung lamtoro tidak dibuat sampel dikarenakan dari citra pohon lamtoro tidak terlihat karena sebelumnya mengalami pemangkasan. Letak dari lamtoro berada di dalam blok seperti tanaman kopi.

Tabel 2. Kelas Klasifikasi MESMA

No.	Kelas	Spectral Library	Piksel
1.	Kopi		
2.	Tanaman penaung		
3.	Bangunan		
4.	Jalan		

5.	Lahan terbuka		
6.	Vegetasi lain		

IV.2 Hasil dan Analisis Uji Akurasi

Uji akurasi klasifikasi tutupan lahan dengan memakai metode koefisien Kappa memiliki antara 0 sampai 1. Perhitungan matriks konfusi tutupan lahan ini menggunakan *plugin* AcATaMa. Matriks konfusi dari hasil klasifikasi MESMA dengan citra referensi.

Tabel 3. Hasil Matriks Konfusi

		Classified values							
		1	2	3	4	5	6	Total	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
Total		4	14	175	15	138	50	396	
Producer accuracy		1	1	0,77	0,73	0,79	0,9		0,801

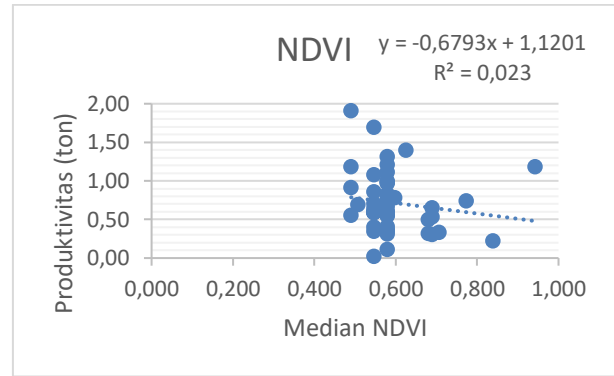
- Keterangan :
- 1 : Bangunan
 - 2 : Jalan
 - 3 : Kopi
 - 4 : Lahan Terbuka
 - 5 : Tanaman Penaung
 - 6 : Vegetasi Lain

Nilai akurasi tutupan lahan menurut (Short, 1982) adalah 0,80 atau 80% sehingga nilai akurasi dari tutupan lahan ini dapat diterima. Pada perhitungan *user accuracy* nilai bangunan hanya sebesar 0,12903 dan itu termasuk rendah dibandingkan dengan hasil dari kelas lainnya. Hal tersebut terjadi karena dari 31 data bangunan, 20 data bangunan teridentifikasi menjadi kopi, 2 data bangunan teridentifikasi menjadi lahan terbuka, 4 data bangunan teridentifikasi menjadi tanaman penaung, dan 6 data bangunan teridentifikasi menjadi data vegetasi lain. Hal ini terjadi karena adanya kesalahan pendeteksian nilai piksel pada saat klasifikasi MESMA.

IV.3 Hasil dan Analisis Regresi Linier Sederhana

Pengolahan regresi linier sederhana antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi menghasilkan koefisien determinasi dan koefisien korelasi. Analisis regresi pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan dan besar pengaruh variabel Y dan X. Nilai yang diperoleh dari pengolahan tersebut dapat digunakan sebagai penentu tingkatan hubungan.

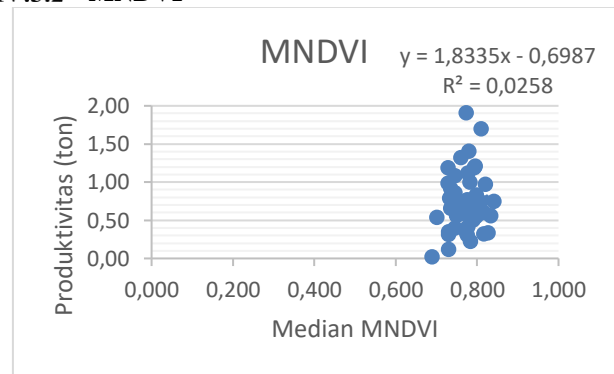
IV.3.1 NDVI



Gambar 4. Hasil Regresi Linier Sederhana NDVI

Berdasarkan pada Gambar IV-1, dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,023 dengan persamaan regresi $Y = -0,6793x + 1,1201$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,157$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 2,3%.

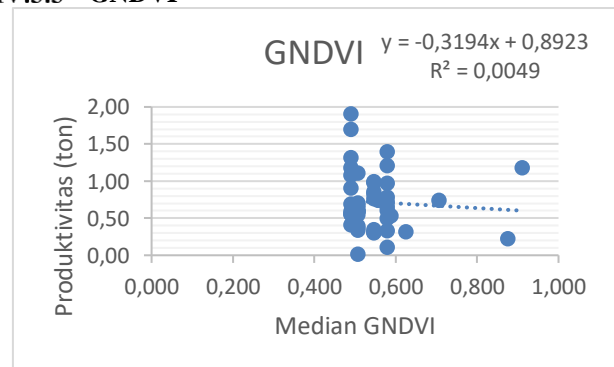
IV.3.2 MNDVI



Gambar 5. Hasil Regresi Linier Sederhana MNDVI

Berdasarkan pada Gambar 5., dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,0258 dengan persamaan regresi $Y = 1,8335x - 0,6987$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,161$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 2,58%.

IV.3.3 GNDVI



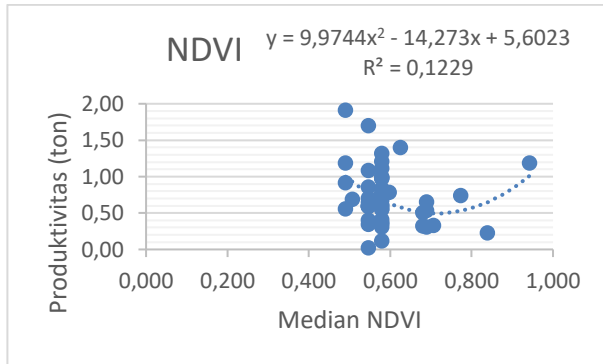
Gambar 6. Hasil Regresi Linier Sederhana GNDVI

Berdasarkan pada Gambar. 6, dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,0049 dengan persamaan regresi Y

= $-0,3194x + 0,8923$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,070$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 0,49%.

IV.4 Hasil dan Analisis Regresi Polinomial

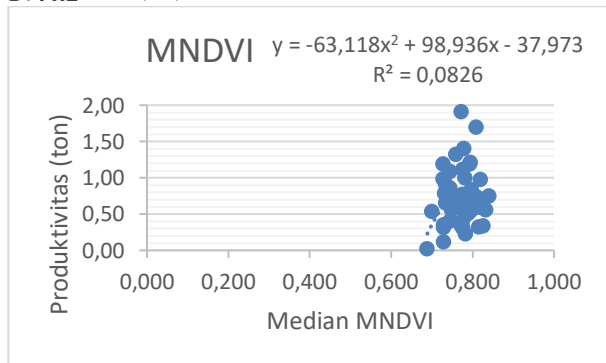
IV.4.1 NDVI



Gambar 7. Hasil Regresi Polinomial NDVI

Regresi polinomial pada penelitian ini menggunakan orde 2. Berdasarkan pada Gambar IV-4, dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,1229 dengan persamaan regresi $Y = 9,9744x^2 - 14,273x + 5,6023$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,351$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 12,29%.

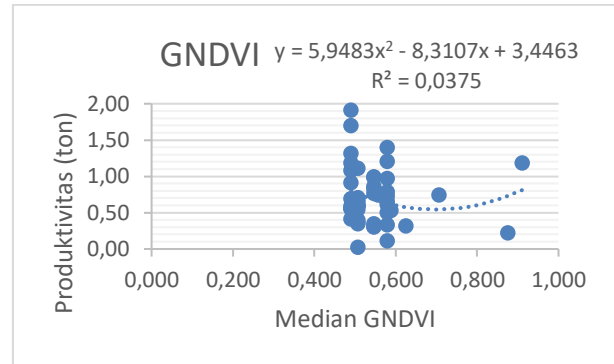
IV.4.2 MNDVI



Gambar 8. Hasil Regresi Polinomial MNDVI

Berdasarkan pada Gambar 8., dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,0826 dengan persamaan regresi $Y = -63,118x^2 + 98,936x - 37,973$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,287$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 8,26%.

IV.4.3 GNDVI



Gambar 9. Hasil Regresi Polinomial GNDVI

Berdasarkan pada Gambar 9., dapat diketahui bahwa nilai R^2 sebesar 0,0375 dengan persamaan regresi $Y = 5,9483x^2 - 8,3107x + 3,4463$ dan nilai koefisien korelasi $r = 0,194$. Hal tersebut menunjukkan hubungan yang sangat rendah antara produktivitas kopi dan indeks vegetasi. Indeks vegetasi dapat menerangkan data produktivitas sebesar 3,75%.

IV.5 Hasil dan Analisis Regresi Linier Berganda

Pada penelitian ini, kerapatan vegetasi tidak memberikan pengaruh yang terlalu besar terhadap produktivitas kopi. Hal tersebut terjadi karena faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman kopi tidak hanya kerapatan vegetasi. Dalam penelitian ini, penulis menguji hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1), apakah ada pengaruh faktor lain terhadap produktivitas kopi selain kerapatan vegetasi. Faktor tersebut yaitu nilai kerapatan vegetasi (X_1), umur tanaman kopi (X_2), luas lahan (X_3), ketinggian (X_4), dan jumlah pohon (X_5).

IV.5.1 NDVI

Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.54444	-0.22851	-0.00966	0.18315	0.84897
Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.1811115	0.7163504	1.649	0.10665
Data_R_NoSlope\$`Median NDVI`	-1.1494721	0.5875555	-1.956	0.05709 .
Data_R_NoSlope\$`Umur`	0.0024397	0.0020919	1.166	0.25009 .
Data_R_NoSlope\$`Luas (Ha)`	-0.0128902	0.0038396	-3.357	0.00168 **
Data_R_NoSlope\$`Elevasi (m)`	-0.0004316	0.0009366	-0.461	0.64734
Data_R_NoSlope\$`Jumlah pohon/ha`	0.0003728	0.0002571	1.450	0.15453

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.3275 on 42 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.3617, Adjusted R-squared: 0.2857				
F-statistic: 4.76 on 5 and 42 DF, p-value: 0.001553				

Gambar 10. Hasil Regresi Linier Berganda NDVI

Model regresi dari Gambar 10. yaitu $Y = 1,1811115 - 1,1494721X_1 + 0,0024397X_2 - 0,0128902X_3 - 0,0004316X_4 + 0,0003728X_5$. Variabel kerapatan indeks vegetasi NDVI, umur, luas, elevasi, dan jumlah pohon hanya mampu menjelaskan produktivitas kopi sebesar 36,17%. Nilai p -value regresi linier berganda bernilai 0,001553 yang dimana nilai tersebut lebih kecil dari 0,05, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Artinya bahwa secara serempak variabel bebas berpengaruh nyata terhadap variabel terikat.

IV.5.2 MNDVI

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.56212 -0.19744 -0.03307  0.17245  0.99851

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.0113035  1.3394641   0.008  0.9933
Data_R_NoSlope$`Median MNDVI`  0.4769088  1.5516922   0.307  0.7601
Data_R_NoSlope$Umur            0.0027013  0.0022361   1.208  0.2338
Data_R_NoSlope$`Luas (Ha)`     -0.0102817  0.0038680  -2.658  0.0111 *
Data_R_NoSlope$`Elevasi (m)`  -0.0004477  0.0009797  -0.457  0.6500
Data_R_NoSlope$`Jumlah pohon/ha` 0.0004283  0.0002688   1.594  0.1185
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3417 on 42 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3051,    Adjusted R-squared:  0.2224
F-statistic: 3.688 on 5 and 42 DF,  p-value: 0.007405
```

Gambar 11. Hasil Regresi Linier Berganda MNDVI

Model regresi dari Gambar 11. yaitu $Y = 0,0113035 + 0,4769088X_1 + 0,0027013X_2 - 0,0102817X_3 - 0,0004477X_4 - 0,0004283X_5$. Variabel kerapatan indeks vegetasi MNDVI, umur, luas, elevasi, dan jumlah pohon hanya mampu menjelaskan produktivitas kopi sebesar 30,51%. Nilai *p-value* regresi linier berganda bernilai 0,007405 yang dimana nilai tersebut lebih kecil dari 0,05, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Artinya bahwa secara serempak variabel bebas berpengaruh nyata terhadap variabel terikat.

IV.5.3 GNDVI

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.53364 -0.22038 -0.03065  0.16997  0.95905

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.6642246  0.6977527   0.952  0.3466
Data_R_NoSlope$`Median GNDVI` -0.5125203  0.6119400  -0.838  0.4070
Data_R_NoSlope$Umur            0.0025083  0.0021972   1.142  0.2601
Data_R_NoSlope$`Luas (Ha)`     -0.0113631  0.0039084  -2.907  0.0058 **
Data_R_NoSlope$`Elevasi (m)`  -0.0003686  0.0009728  -0.379  0.7067
Data_R_NoSlope$`Jumlah pohon/ha` 0.0004141  0.0002653   1.561  0.1261
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3393 on 42 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.315,    Adjusted R-squared:  0.2334
F-statistic: 3.863 on 5 and 42 DF,  p-value: 0.005713
```

Gambar 12. Hasil Regresi Linier Berganda GNDVI

Model regresi pada Gambar 12. yaitu $Y = 0,6642246 - 0,5125203X_1 + 0,0025083X_2 - 0,0113631X_3 - 0,0003686X_4 + 0,0004141X_5$. Variabel kerapatan indeks vegetasi GNDVI, umur, luas, elevasi, dan jumlah pohon hanya mampu menjelaskan produktivitas kopi sebesar 31,5%. Nilai *p-value* regresi linier berganda bernilai 0,005713 yang dimana nilai tersebut lebih kecil dari 0,05, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Artinya bahwa secara serempak variabel bebas berpengaruh nyata terhadap variabel terikat.

IV.6 Analisis Hasil Estimasi dan Validasi Regresi

Ketika melakukan estimasi terdapat 3 hal yang perlu diperhatikan yaitu hasil estimasi apakah *overestimate*, *underestimate*, atau tepat. Jumlah data yang dipakai pada validasi ini adalah sebanyak 18 sampel. Metode uji akurasi validasi pemodelan ini menggunakan standar deviasi.

IV.6.1 Estimasi dan Validasi Regresi Linier Sederhana

Tabel 4. Hasil Estimasi Regresi Linier Sederhana

Produktivitas (kg/Ha)	Regresi Linier Sederhana		
	NDVI	MNDVI	GNDVI
34.396,382	34.396,369	34.393,243	34.396,309

Total estimasi regresi linier sederhana pada Tabel 4. dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.396,369 kg/Ha (*underestimate*), dengan menggunakan MNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.393,243 kg/Ha (*underestimate*), dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.396,309 kg/Ha (*underestimate*). Hasil perhitungan validasi untuk pemodelan estimasi dengan NDVI menghasilkan standar deviasi 0,506 ton/Ha, MNDVI 0,509 ton/Ha, dan GNDVI 0,510 ton/Ha.

IV.6.2 Estimasi dan Validasi Regresi Polinomial

Tabel 5. Hasil Estimasi Regresi Polinomial

Produktivitas (kg/Ha)	Regresi Linier Polinomial		
	NDVI	MNDVI	GNDVI
34.396,382	34.387,395	34.404,964	34.397,779

Total estimasi regresi polinomial pada Tabel 5. dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.387,395 kg/Ha (*underestimate*), dengan menggunakan MNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.404,964 kg/Ha (*overestimate*), dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.397,779 kg/Ha (*overestimate*). Hasil perhitungan validasi untuk pemodelan estimasi dengan NDVI menghasilkan standar deviasi 0,464 ton/Ha, MNDVI 0,490 ton/Ha, dan GNDVI 0,490 ton/Ha.

IV.6.3 Estimasi dan Validasi Regresi Linier Berganda

Tabel 6. Hasil Estimasi Regresi Linier Berganda

Produktivitas (kg/Ha)	Regresi Linier Berganda		
	NDVI	MNDVI	GNDVI
34.396,382	34.394,658	34.397,899	34.396,163

Total estimasi regresi linier berganda pada Tabel 6. dengan menggunakan NDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.394,658 kg/Ha (*underestimate*), dengan menggunakan MNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.397,899 kg/Ha (*overestimate*), dan dengan menggunakan GNDVI menghasilkan estimasi sebesar 34.396,163 kg/Ha (*underestimate*). Hasil perhitungan validasi untuk pemodelan estimasi dengan NDVI menghasilkan standar deviasi 0,352 ton/Ha, MNDVI 0,379 ton/Ha, dan GNDVI 0,369 ton/Ha.

V. Penutup

V.1 Simpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah disampaikan pada hasil penelitian, maka kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Akurasi tutupan lahan dengan klasifikasi MESMA menghasilkan *overall accuracy* sebesar 0,80051 atau 80,51%, sehingga klasifikasi tersebut dapat diterima karena melebihi 80%.
2. Estimasi produktivitas kopi dengan regresi linier sederhana, regresi polinomial, dan regresi linier berganda menghasilkan hasil berikut:
 - a. Estimasi produktivitas tanaman kopi pada blok kopi robusta dan lamtoro menggunakan regresi

linier sederhana menghasilkan estimasi sebagai berikut:

- 1) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi NDVI menghasilkan sebesar 34.396,369 kg/Ha.
 - 2) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi MNDVI menghasilkan sebesar 34.393,243 kg/Ha.
 - 3) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi GNDVI menghasilkan sebesar 34.396,309 kg/Ha.
- b. Estimasi produktivitas tanaman kopi pada blok kopi robusta dan lamtoro menggunakan regresi polinomial menghasilkan estimasi sebagai berikut:
- 1) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi NDVI menghasilkan sebesar 34.387,395 kg/Ha.
 - 2) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi MNDVI menghasilkan sebesar 34.404,964 kg/Ha.
 - 3) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi GNDVI menghasilkan sebesar 34.397,779 kg/Ha.
- c. Estimasi produktivitas tanaman kopi dan pada blok kopi robusta dan lamtoro menggunakan regresi linier berganda menghasilkan estimasi sebagai berikut:
- 1) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi NDVI menghasilkan sebesar 34.394,658 kg/Ha.
 - 2) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi MNDVI menghasilkan sebesar 34.397,899 kg/Ha.
 - 3) Hasil estimasi dengan indeks vegetasi GNDVI menghasilkan sebesar 34.396,163 kg/Ha.

V.2 Saran

Saran yang dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Data citra yang digunakan dalam penelitian sebaiknya menggunakan data citra yang mendekati waktu panen.
2. Penelitian produktivitas kopi selanjutnya menggunakan pendekatan model yang lebih ideal agar estimasi tepat.
3. Klasifikasi yang digunakan dalam penelitian sebaiknya dapat memisahkan kopi robusta dan penangungnya agar hasil estimasi murni dari kopi robusta.
4. Memperhatikan resolusi spektral (band dan panjang gelombang) citra yang akan digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

Aziz, M. H. (2019). Pemanfaatan Citra Sentinel-2A untuk Estimasi Produksi Tanaman Kopi di Sebagian Wilayah Kabupaten Temanggung. *Fakultas Geografi UGM*, 1-8.

Azzahra, J. P. (2022). Estimasi Produktivitas Teh di Perkebunan Malabar Berbasis Penginderaan Jauh. *Jurnal Geodesi Undip*, 3.

Bernardes, T., Moreira, M. A., Adami, M., Giarolla, A., & Rudorff, B. F. (2012). Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. *Journal Remote Sensing*, 1.

Brunsell, N. A., Pontes, P. P., & Lamparelli, R. A. (2009). Remotely Sensed Phenology of Coffee and Its Relationship to Yield. *GIScience & Remote Sensing*, 5.

Fernandez-Garcia, V., Marcos, E., Fernandez-Guisuraga, J., Fernandez-Manso, A., Quintano, C., Suarez-Seoane, S., . . . Leonor. (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*, 6.

Gessese, A. A., & Melesse, A. M. (2019). *Extreme Hydrology and Climate Variability*.

Hunt, D. A., Tabor, K., Hewson, J. H., Wood, M. A., Reymondin, L., Koenig, K., . . . Follet, F. (2020). Review of Remote Sensing Methods to Map Coffee Production Systems. *Journal Remote Sensing*, 9.

Keshava, N. (2003). A Survey of Spectral Unmixing Algorithms. *Lincoln Laboratory Journal*, 1.

Kouadio, L., Byrareddy, V. M., Sawadogo, A., & Newlands, N. K. (2021). Probabilistic yield forecasting of robusta coffee at the farm scale using agroclimatic and remote sensing derived indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1.

Lillesand, & Kiefer. (1979). *Penginderaan Jauh dan Interpretasi Citra*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Nurani, R. (2015). Estimasi Produksi Tanaman Kopi Berbasis Pengolahan Citra Landsat 8 di Kabupaten Temanggung Jawa Tengah. 1-9.

Roberts, D., Gardner, M., Church, R., Usrin, S., & Scheer, G. (1996). Mapping Chaparral in The Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models. *Remote Sensing of Environment*, 2.

Shabrina, N., Sukmono, A., & Subiyanto, S. (2020). Analisis Identifikasi Fase Tumbuh Padi untuk Estimasi Produksi Padi dengan Algoritma EVI dan NDRE Multitemporal pada Citra Sentinel-2 di Kabupaten Demak. *Jurnal Geodesi Undip*, 3.

Silva, P. A., Alves, M. d., Silva, F. M., & Figueiredo, V. C. (2021). Coffee yield estimation by Landsat-8 imagery considering shading effects of planting row's orientation in center pivot. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8.

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*.