



Jurnal Bioshell

ISSN: 2623-0321

Doi: 10.56013/bio.v14i1.3865

<http://ejurnal.ujj.ac.id/index.php/BIO><https://read.bookcreator.com/5vq6S5MLeqa4j9EC0u9ZfHHKTAU2/EYtGOIu9RYaQ0sbo-IARkQ>



Review: Identifikasi Tanaman Ganja (*Cannabis sativa* L.) Menggunakan Pencitraan Spektral dan *Machine Learning*

Dyan Vicky Sandhi¹, Sonny Kristianto²

*Corresponding Author: Dyan Vicky Sandhi

Email Corresponding Author: dyan.vicky.sandhi-2023@pasca.unair.ac.id

Universitas Airlangga, Indonesia

ABSTRAK

Cannabis sativa L. dikenal sebagai ganja atau mariyuana mengacu kepada tanaman, kuncup, bunga, daun, biji kering, batang dan akar. Tanaman ini mengandung lebih dari 100 senyawa turunan (*cannabinoid*), meliputi *tetrahydrocannabinol* (THC) dan *cannabidiol* (CBD) serta senyawa lain. Secara hukum ganja dilarang di Indonesia berdasarkan UU No. 35 tahun 2009 tentang Narkotika serta diklasifikasikan sebagai narkotika golongan I. Penyalahgunaan ganja di Indonesia menyebar masif dan tidak terkendali hal ini menjadi tantangan dalam penegakan hukum. Alternatif untuk identifikasi ladang ganja dengan memanfaatkan teknologi pencitraan spektral yang dipadukan dengan *machine learning*. Pencitraan spektral merupakan metode non-destruktif dengan cakupan luas, yang dilakukan secara penginderaan jauh serta berbiaya murah dibandingkan survei langsung ke lapangan. Pengolahan data serta analisis dengan *machine learning* akan meningkatkan akurasi serta efisiensi waktu. Perpaduan pencitraan spektral dan *machine learning* telah terbukti didalam berbagai penelitian untuk identifikasi serta pemantauan perkembangan kultivasi ganja, serta andal untuk diterapkan. Studi literatur dalam penelitian ini bertujuan memberikan gambaran metode dan teknis dalam identifikasi ganja, sehingga dapat dioptimalkan untuk penegakan hukum di Indonesia.

Kata Kunci: *Ganja, Tetrahydrocannabinol, Cannabidiol, Citra spektral, Machine learning.*

Article History

Received: February 21, 2025

Accepted: February 26, 2025

Published: February 27, 2025

Dyan Vicky Sandhi*

E-mail: dyan.vicky.sandhi-2023@pasca.unair.ac.id

No. HP/WA: 081326674661

ABSTRACT

Cannabis sativa L., commonly known as ganja or marijuana, refers to the plant, its buds, flowers, leaves, dried seeds, stems, and roots. This plant contains more than 100 cannabinoid compounds, including tetrahydrocannabinol (THC) and cannabidiol (CBD), along with other substances. Legally, cannabis is prohibited in Indonesia under Law No. 35 of 2009 on Narcotics and is classified as a class I narcotics. The widespread and uncontrolled misuse of cannabis in Indonesia presents a significant challenge for law enforcement. An alternative method for identifying cannabis fields involves using spectral imaging technology combined with machine learning. Spectral imaging is a non-destructive, wide-coverage method that utilizes remote sensing and is more cost-effective compared to direct field surveys. Data processing and analysis with machine learning enhance accuracy and efficiency. The combination of spectral imaging and machine learning has been proven in various studies for identifying and monitoring cannabis cultivation, making it a reliable approach. This literature review aims to provide insights into methods and techniques for cannabis identification, which can be optimized for law enforcement in Indonesia.

Keywords: Cannabis, Cannabis sativa L, Spectral Imaging, Remote Sensing, Machine Learning.

I. PENDAHULUAN

Cannabis sativa L. merupakan salah satu spesies tumbuhan purba yang dimanfaatkan manusia untuk berbagai tujuan. Selain untuk obat, tanaman ini dimanfaatkan sebagai serat, makanan; produksi tali rami, tekstil, dan kertas. Pada tahun 1960an, penggunaan ganja rekreasional meningkat di seluruh dunia Barat. Penemuan struktur kimia Δ^9 -tetrahydrocannabinol (Δ^9 -THC), yang diidentifikasi oleh Gaoni dan Mechoulam, mendorong penelitian segala aspek tentang ganja (Stasilowicz, Tomala, Podolak, & Cielecka-Piontek, 2018). *Cannabis sativa* L. dikenal sebagai ganja, mariyuana atau cimeng mengacu kepada tanaman, kuncup, bunga, daun, biji kering, batang dan akar. Tanaman ini mengandung lebih dari 100 senyawa turunan (*cannabinoid*). Senyawa turunan seperti *tetrahydrocannabinol* (THC) dan *cannabidiol* (CBD) bersifat dapat merusak sistem syaraf, mengganggu kesadaran, menyebabkan rasa mabuk serta memacu jantung lebih cepat. Berbagai macam cara penggunaan bahan terlarang ini seperti rokok, campuran cerutu, rokok

elektrik bahkan dalam campuran makanan seperti kue, teh atau minuman alkohol. *United States Food and Drug Administration* (US FDA) menyetujui penggunaan salah satu jenis obat berbasis ganja disebut dengan *Epidiolex*, mengandung CBD yang dimurnikan.

Hukum Indonesia melarang segala bentuk ganja yang merupakan narkoba paling berbahaya. Acuan perumusan pelarangan ganja di Indonesia berasal dari hasil *Single Convention on Narcotic Drugs* tahun 1961 yang mengkategorikan ganja dan turunannya dalam narkotika golongan I pada UU No 35 tahun 2009 tentang Narkotika. Implikasi dari peraturan tersebut menjadikan ganja dilarang diproduksi dan/atau digunakan dalam proses produksi, bahkan untuk tujuan pelayanan medis, namun untuk kepentingan pengembangan ilmu pengetahuan dalam jumlah yang sangat terbatas ganja dapat dipergunakan (Pangaribuan, 2024).

Data yang disajikan oleh Kepolisian Negara Republik Indonesia (POLRI) berkaitan dengan luas lahan kultivasi ganja yang disita dari hasil operasi eradikasi

ganja di Aceh dari tahun 2007-2016 meluas \pm 482 hektar. Di Indonesia penanaman ganja telah merambah ke seluruh negeri, tidak hanya terjadi di Aceh. Kultivasi ganja marak dilakukan di hutan lindung sepanjang provinsi Aceh hingga Lampung, bahkan di wilayah Jawa Barat dan Jawa Timur ganja ditanam pada lereng gunung dan di kawasan lokasi latihan militer. Hal ini dapat merusak lingkungan khususnya hutan lindung untuk kelestarian ekosistem hayati. Kultivasi ganja juga dilakukan di lokasi indoor di beberapa kota besar dengan memanfaatkan pot bunga dan media lain. Tidak terkendalinya kultivasi ganja ini menjadi tantangan penting bagi pemerintah serta pemangku kepentingan terkait untuk menekan peredaran ganja di Indonesia. (Badan Narkotika Nasional, 2016).

Upaya untuk menekan kultivasi ganja secara preventif dilakukan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Badan Narkotika Nasional (BNN) dan POLRI melalui metode *Grand Design Alternative Development (GDAD)* dengan memanfaatkan riset dan teknologi penginderaan jauh untuk deteksi ladang ganja secara cepat dan akurat serta tanpa memakan waktu dan biaya yang besar. Riset tersebut dapat dikembangkan dengan metode deteksi melalui *machine learning*. Penelitian identifikasi ladang ganja menggunakan citra data satelit dengan pengolahan data yang menggunakan pendekatan metode *machine learning* dan *artificial intelligence* dapat mempercepat analisis identifikasi ladang ganja, yang ditanam di lokasi tengah hutan, atau lereng gunung. Dengan memadukan kedua teknologi ini, identifikasi fisik objek ladang ganja diperoleh melalui analisis pantulan

panjang gelombang spektral dari jenis tanaman ganja kemudian data tersebut diolah dengan metode *machine learning* yang menghasilkan titik-titik identifikasi objek ladang ganja di wilayah yang sulit dijangkau (Khomarudin, 2024).

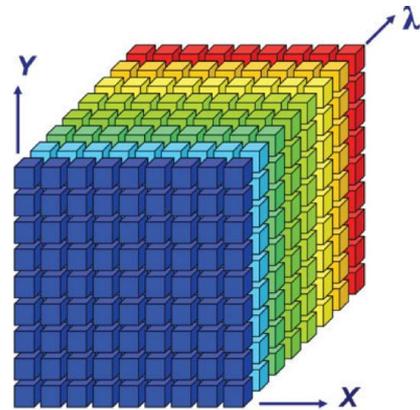
Pencitraan spektral (*spectral imaging*) dikenal sebagai pencitraan spektroskopi yaitu studi tentang interaksi antara cahaya dengan materi yang diamati. Proses hibrida menggabungkan metode spektroskopi dan pencitraan. Hasil dari pencitraan spektral merupakan database spasial tiga dimensi (3D) dari kumpulan informasi spektral di setiap piksel susunan detektor dua dimensi (2D) (Bhargava, Sachdeva, Sharma, Alsharif, Uthansakul, & Uthansakul, 2024). Pencitraan *hyperspectral* (HS) adalah komponen penting dari penginderaan jauh karena kemampuannya untuk menyimpan informasi yang komprehensif. *Hyperspectral Image* (HSI) atau gambar hiperspektral terdiri dari banyak titik data spektral yang dikumpulkan dari beberapa area tertentu, memungkinkan diaplikasikan untuk klasifikasi target, identifikasi target, pencampuran spektrum, dan deteksi anomali. Sensor HSI menangkap data pada panjang gelombang 400 hingga 2500 nm yang berada di luar jangkauan penglihatan manusia. Setiap pita gelombang merekam jumlah piksel dan resolusi spektral yang ditentukan oleh sensor. Resolusi piksel mencakup seluruh data spasial, dengan pengukuran reflektansi pada panjang dan pita gelombang yang membentuk kubus data dan menangkap informasi area cakupan (Kumar, Singh, Rambabu, & Dua, 2024).

Pengembangan pencitraan spektral yang berhasil telah memberikan manfaat bagi berbagai bidang. Penggunaannya

secara luas telah diimplementasikan dalam bidang biomedis, pertanian, survey khusus, fotografi, ilmu material, pengelolaan limbah-limbah berbahaya, pemantauan lingkungan serta eksplorasi luar angkasa. Namun tantangan citra spektral kepada rendahnya resolusi yang dihasilkan pada teknologi saat ini, sehingga sangat terbatas penggunaannya.

Pencitraan spektral merupakan gabungan dari dua hal yaitu, spektroskopi dan pencitraan. Secara teori spektrometer menghasilkan spektrum tunggal dinotasikan $I(\lambda)$, dan pencitraan akan menghasilkan intensitas pada setiap piksel gambar dilambangkan $I(x, y)$, citra spektral memberikan spektrum pada setiap piksel, $I(x, y, \lambda)$. Kumpulan data tiga dimensi (3D) dari variabel tersebut dikenal sebagai kubus informasi. $I(x, y, \lambda)$ dianggap sebagai kumpulan banyak gambar, yang masing-masing memiliki panjang gelombang yang berbeda, atau kumpulan banyak nilai spektral pada setiap piksel. Pada Gambar 1 dibawah ini dijelaskan bahwa setiap titik dalam kubus mewakili satu angka dan citra spektral dilambangkan $I(x, y, \lambda)$. Pada data ini dilihat sebuah gambar $I(x, y)$ memiliki panjang gelombang λ , atau dapat disebut setiap spektrum $I(\lambda)$ berada pada setiap piksel (x, y) (Garini, Young, & McNamara, 2006). *Machine learning* adalah bagian dari kecerdasan buatan tersusun dari algoritma yang mampu mendapatkan informasi berguna dari data dan memanfaatkan informasi tersebut sebagai media pembelajaran mandiri dalam membuat klasifikasi dan prediksi yang baik. Teknik *machine learning* seperti *Artificial Neural Network* (ANN) Fuzzy logic, *Regression Tree* (RT), *Naïve Bayes*, *k-means*

clustering, *Support Vector Machine* (SVM) dan *Random Forest* (RF). *K-Nearest Neighbor* (k-NN) telah digunakan secara luas untuk bidang pertanian (Saha & Manickavasagan, 2021).



Gambar 1. Deskripsi tentang kumpulan data citra spektral.

Sumber: (Garini, Young, & McNamara, 2006).

Tujuan klasifikasi citra berbasis *machine learning* adalah untuk menciptakan algoritma yang dapat memprediksi dan mengidentifikasi pola tanpa bantuan manusia. Beberapa pengklasifikasi yang dilatih untuk tujuan ini termasuk *Decision Trees* (DT), *K-Nearest Neighbors* (KNN), dan *Support Vector Machines* (SVM).

Teknik *machine learning* secara tradisional telah banyak digunakan serta dimasukkan dalam beberapa subkategori seperti teknik berbasis transformasi, pembelajaran berbasis kernel, klasifikasi SVM, dan reduksi dimensi. Teknik berbasis transformasi mampu menekan noise dalam HSI dan mengekstrak informasi berharga. Klasifikasi SVM banyak digunakan dan dipelajari untuk mengelompokkan data HSI berdimensi tinggi. Teknik reduksi dimensi untuk mengatasi masalah "fenomena Hughes" yaitu melemahnya kinerja klasifikasi karena kelangkaan sampel pelatihan data spektral dan seiring

bertambahnya dimensi spektral (Grewal, Singh Kasana, & Kasana, 2023).

Metode *machine learning* yang digunakan untuk rekonstruksi citra spektral dilakukan dengan mengadopsi metode *neural network* pada komputasi pengolahan data citra. Prinsip kerja dan teknik ini dilakukan dengan encoding-decoding melalui tiga cara yaitu, pengkodean amplitudo, pengkodean fase dan pengkodean panjang gelombang. Setiap citra spektral yang dihasilkan dalam akuisisi data diperoleh data mentah dengan berbagai variable yang memerlukan metode pendekatan secara cepat dan efisien sesuai dengan tujuan dari informasi yang diinginkan (Huang, Luo, Liu, & Hao, 2025).

Teknologi penginderaan jauh yang dipadukan dengan *machine learning* digunakan dalam analisis identifikasi ganja (Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2022; Bicakli, Kaplan, & Alqasemi, 2022). Teknologi identifikasi tersebut sangat menjanjikan untuk identifikasi awal serta mampu secara efektif dan efisien baik tenaga dan biaya untuk identifikasi ladang ganja. Korelasi kandungan CBD dan THC melalui kombinasi teknologi pencitraan spektral dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dapat dibuktikan dengan riset untuk tujuan industri (Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022; Abeysekera, et.al., 2023). Pencitraan spektral alat yang sangat berpotensi jika digunakan untuk mengamati, memonitor perkembangan pertumbuhan tanaman, dan menilai kualitas makanan (Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2020). Pencitraan hiperspektral dapat memberikan analisis yang andal serta komprehensif untuk mengetahui

karakteristik atau sifat bahan tanaman dengan sampel minimal, tidak kontak langsung, dan optimal untuk pengujian di tempat yang keluaran tinggi (Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022). Riset dengan metode pencitraan spektral telah teruji sebagai metode pemeriksaan tanaman ganja yang non-destruktif dan berbiaya rendah (Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022). Melalui kajian studi literatur ini diharapkan menjadi acuan terhadap peneliti di masa yang akan datang untuk menerapkan dan mengembangkan metode dan teknik identifikasi tanaman ganja dengan menggunakan pencitraan spektral dan *machine learning*.

II. METODE PENELITIAN

Penggunaan metode studi literatur atau *Literature Review* (LR) dilakukan dengan pengenalan, peninjauan serta evaluasi terhadap seluruh penelitian terkait sehingga mampu menjawab permasalahan dan pertanyaan dari suatu penelitian yang telah ditetapkan (Triandini, Jayanatha, Indrawan, Putra, & Iswara, 2019). Tahapan dalam penelitian ini terdiri dari merumuskan pertanyaan, pencarian literatur, menerapkan kriteria inklusi, menyajikan data, mengolah data dan menarik kesimpulan.

Tahapan awal, merumuskan pertanyaan tentang sampel apa saja yang digunakan dalam penelitian identifikasi ganja dengan pencitraan spektral dan *machine learning*? (PP1), analisis apa yang digunakan untuk identifikasi ganja menggunakan pencitraan spektral? (PP2), bagaimana hasil yang diperoleh dari analisis identifikasi ganja menggunakan pencitraan spektral? (PP3). Tahap kedua, pencarian artikel atau bahan studi literatur dalam penelitian ini dilakukan secara

online. Dengan memanfaatkan database penelitian di *Google Scholar* serta *Science Direct* melalui pencarian kata kunci “*Spectral Imaging for Cannabis*” serta dilakukan pembatasan artikel dari tahun 2020 sampai 2024.

Langkah ketiga, penerapan tolak ukur inklusi pada studi literatur ini dilakukan terhadap penelitian yang terkait dengan analisis pencitraan spektral terhadap tanaman ganja, dan hasil penelitiannya telah diterbitkan pada jurnal. Tahap terakhir dilakukan pemilihan dan analisis terhadap literatur berdasarkan parameter inklusi dan eksklusi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Studi Literatur Identifikasi Tanaman *Cannabis sativa L.* Menggunakan Teknologi

Pencitraan Spektral dan *Machine Learning*

Pengkajian dengan menggunakan studi literatur pada penelitian ini memanfaatkan penelitian sebelumnya dari berbagai jurnal sebanyak delapan artikel yang berkaitan dengan identifikasi ganja

Berdasarkan pencarian terhadap kata kunci pada kedua database penelitian (*Google Scholar* dan *Science Direct*) diperoleh sebanyak 17.500 artikel. Selanjutnya dipilih menjadi delapan artikel berdasarkan kriteria yang ditetapkan.

Artikel yang telah dipilih didatakan ke dalam tabel serta dilakukan peninjauan dan pengkajian oleh peneliti khususnya pada bagian hasil penelitian. Hasil temuan yang berkaitan dengan topik dalam artikel penelitian tersebut kemudian akan dibandingkan dan dilakukan penarikan kesimpulan.

menggunakan pencitraan spektral dengan pengolahan data melalui *machine learning*. Artikel yang dibahas dalam jurnal ini dicantumkan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Hasil Review Literatur Identifikasi Tanaman *Cannabis sativa L.* Menggunakan Teknologi Pencitraan Spektral dan *Machine Learning*

Peneliti dan Tahun	Penerbit	Hasil Penelitian
(Abeyseke <i>et al.</i> , 2023)	Industrial Crops & Products	Studi ini mengajukan metodologi untuk memperkirakan kandungan <i>Tetrahydrocannabinol Acid (THCA)</i> di <i>Cannabis sativa L.</i> dengan menggunakan sistem <i>benchtop Near Infra Red (NIR) HSI</i> dan analisis regresi. Studi ini membuktikan bahwa NIR HSI adalah alat yang sangat penting untuk memperkirakan secara akurat kandungan THCA dengan fenotip keluaran tinggi. Hal ini memberikan cara baru untuk pengembangan alat yang berguna dalam manajemen tanaman, penegakan hukum, dan tujuan forensik.

(Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022)	Computers and Electronics in Agriculture	Penelitian ini menunjukkan bahwa pencitraan hyperspectral berpotensi tinggi sebagai alat yang lebih berguna, non-destruktif dibandingkan dengan penggunaan metode kimia-basah konvensional dalam kuantifikasi CBD, THC dan bentuk asam lain dalam industri bahan bunga rami.
(Schober, Prager, & Graeff-Honninger, 2024)	Computers and Electronics in Agriculture	Riset ini membuktikan bahwa pencitraan hiperspektral merupakan alat yang cocok dalam memantau secara real-time terhadap tanaman ganja medis. <i>Partial Least Square Regression</i> (PLSR) terbukti menjadi metode yang dapat diandalkan dalam menciptakan model kuantitatif dalam konteks riset tersebut.
(Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020)	Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy	Penelitian ini mengusulkan metodologi cepat berdasarkan <i>Principal Component Analysis</i> (PCA) dan <i>Soft Independent Class Analogy Technique</i> (SIMCA) untuk identifikasi <i>Cannabis sativa L.</i> dengan menggunakan gambar multispektral di rentang NIR. Hasilnya dapat bermanfaat untuk mengembangkan sistem pencitraan drone berbiaya rendah.
(Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2021)	Remote Sensing Applications: Society and Environment	Klasifikasi gambar <i>crop-type</i> menggunakan <i>machine learning</i> dan penginderaan jauh merupakan alat yang menjanjikan untuk mendeteksi area perkebunan ganja ilegal terutama karena ditanam di daerah yang sulit dijangkau. Dalam makalah ini menerapkan algoritma <i>machine learning</i> untuk melakukan klasifikasi citra multitemporal menggunakan citra satelit <i>LANDSAT 8, SENTINEL 2 DAN SENTINEL 1</i> . Riset ini membuktikan bahwa pemodelan <i>machine learning</i> dapat digunakan sebagai deteksi awal tanaman ganja dengan catatan tersedianya data pelatihan citra dari tahun sebelumnya.
(Bicakli, Kaplan, & Alqasemi, 2022)	Agriculture	Penelitian ini dilakukan berdasarkan nilai spektral tanaman ganja yang diperoleh dari PlanetScope tahun 2021 serta dilakukan analisis <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI). Riset dilakukan dengan melakukan evaluasi terhadap perbedaan dan perbandingan reflektansi nilai tanaman gandum, jagung, alfalfa dan kapas, yang berkembang di wilayah tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa citra satelit resolusi tinggi berhasil dimanfaatkan untuk pemantauan perubahan fenologis ganja, dan tanaman lain serta dapat mengklasifikasikannya dengan akurasi tinggi.

(Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022)	Frontiers in Plant Science	Dalam penelitian ini mengusulkan metodologi penggunaan pencitraan hiperspektral dalam membedakan kultivar, tahap pertumbuhan, dan organ tanaman (daun dan bunga) rami CBD. Riset ini menunjukkan bahwa pencitraan hiperspektral dapat digunakan untuk tujuan non-destruktif dan membedakan secara akurat antara kultivar rami, tahap pertumbuhan dan organ tanaman. Hal ini merupakan alat yang berpotensi sangat berharga untuk fenotipe, seleksi kultivar dan optimalisasi waktu panen dalam produksi rami CBD.
(Yoon <i>et al.</i> , 2024)	Frontiers in Plant Science	Studi ini menganalisis faktor dinamis yang mempengaruhi kualitas ganja selama proses pengeringan dan memperkenalkan pendekatan penilaian kualitas non destruktif menggunakan pencitraan hiperspektral serta <i>machine learning</i> . Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model pencitraan hiperspektral dapat digunakan sebagai alat yang berharga untuk memantau kualitas ganja dalam produk industri. Alat ini tidak hanya memfasilitasi evaluasi keseragaman kualitas ganja tetapi juga membantu dalam hal ini identifikasi titik akhir pengeringan yang optimal, bahkan dalam kondisi berskala besar dan tidak seragam.

B. Data Identifikasi Tanaman *Cannabis sativa L.* Menggunakan Teknologi Pencitraan Spektral *Machine learning*

Dari delapan artikel yang telah diseleksi, termuat data yang digunakan dalam identifikasi tanaman *Cannabis sativa L.* menggunakan teknologi pencitraan spektral. Data yang digunakan disajikan pada tabel tersaji berikut:

Tabel 2. Jenis Data pada Studi Literatur Identifikasi Tanaman *Cannabis sativa L.* Menggunakan Pencitraan Spektral dan *Machine Learning*

Peneliti dan Tahun	Data
(Abeysekera <i>et al.</i> , 2023)	Akuisisi data dilakukan dengan pencitraan alat hyperspectral Resonon NIR tanaman ganja per bagian yaitu daun satu (L1), daun dua dan tiga (L2&L3) dari bagian tengah, dan daun empat (L4) pada bagian bawah. <i>Polytetrafluoroethylene</i> (PTFE) digunakan sebagai referensi. Sampel ganja kemudian dilakukan analisis menggunakan HPLC untuk mengetahui THCA. Hasil dari analisis citra hiperspektral dilakukan regresi dan perbandingan dengan hasil analisis HPLC. Kamera spectral yang digunakan adalah PIKA NIR-320 dengan Indium Gallium Arsenide (InGaAs) deteksi sensor dari 645 nm sampai dengan 2070 nm merekam 256 kanal spektral berbeda.

(Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022) Data diambil secara random pada perkebunan ganja yang tumbuh di lingkungan terkendali. Pencitraan spektral dilakukan terhadap tanaman ganja per bagian daun, bunga dan batang untuk mengetahui kandungan cannabinoid tertinggi. Gambar spectral dilakukan analisis komputasi. Kemudian sampel ganja dari pencitraan spektral dilakukan analisis menggunakan HPLC untuk mengetahui kadar CBD pada ganja. Hasil dari data tersebut dibandingkan dan dianalisis dengan algoritma komputasi berdasarkan panjang gelombang yang dipantulkan. Kamera spektral yang digunakan adalah Pika XC2, Resonon Inc.

(Schober, Prager, Graeff-Honninger, 2024) Dipergunakan data sebanyak 144 tanaman dari E3 untuk evaluasi chemometric dan 154 perkembangan daun dari E1 dan E2. Sampel dikeringkan pada lingkungan terkendali dan dilakukan analisis konsentrasi N, P dan K. Sampel diambil citra spektral dengan menggunakan kamera hsi 1d-VIS (MC023MG-SY-FL, LuxFlux). Data gambar diolah menggunakan algoritma program "Spy" dari Python (3.9.12). Dari hasil kedua analisis dilakukan perbandingan berdasarkan spektrum dan kandungan N, P, K dari sampel.

(Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020) Data diambil dengan pencitraan spectral menggunakan alat The SisuChema (Specim) dengan sensor HIS-NIR. Data citra spektral dilakukan terhadap tanaman ganja dengan lingkungan terkendali oleh peneliti. Kemudian dilakukan analisis chemometric menggunakan perangkat lunak MATLAB (tipe MATLAB R2010a 7.10.0.499, Mathworks) serta PLS_Toolbox (Eigenvector Research Inc) dan HYPER-Tools toolbox (www.hypertools.org). Dari pencitraan spektral tersebut dilakukan analisis panjang gelombang terhadap sampel dan validitas dengan pemodelan s-SIMCA.

(Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2021) Data jenis perkebunan diambil dengan melakukan survei langsung ke lapangan pada periode 2016 & 2018. Kemudian dari data tersebut dimasukkan ke dalam *Google Earth Engine* (GEE) serta membaginya menjadi enam grup. Data training untuk *machine learning* diambil dari GEE. Kemudian data diolah dengan algoritma komputasi yang disusun oleh peneliti berdasarkan analisis per pixel data citra digital. Validitas terhadap sampel peneliti dilakukan dengan menggunakan data satelit kombinasi data *Sentinel 2* dan *Sentinel 1* (S2S1) serta kombinasi data *Landsat 8* dan *Sentinel 2* (L8S2) dan kombinasi data *Landsat 8*, *Sentinel 2* dan *Sentinel 1* (L8S2S1).

(Bicakli, Kaplan, & Alqasemi, 2022) Sampel data yang digunakan merupakan pencitraan satelit berasal dari PlanetScope yang diambil selama sembilan bulan dari tiga area studi. Kemudian data pencitraan tersebut diolah menggunakan perangkat lunak PlanetScope Ortho Scene Product, Level 3B. Data citra dari PlanetScope kemudian diekstrak berdasarkan panjang gelombang yang diinginkan peneliti serta dibandingkan dengan data perkebunan ganja di area studi. Perbandingan kedua data tersebut kemudian dilakukan pengolahan menggunakan algoritma *machine learning* sesuai dengan tujuan dan keinginan peneliti.

(Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022) Lima kultivar rami CBD digunakan dalam penelitian ini, yaitu Cherry Wine (CW), BaOx (BX), First Light 58 (FL58), First Light 70 (FL70), dan TJ's (TJ). Usia sampel ganja berusia antara 2-10 minggu. Peralatan pencitraan yang digunakan merupakan sistem reflektansi hiperspektral benchtop portabel di bawah pencahayaan terkendali dan dirakit agar diperoleh gambar dari sampel rami. Sistem ini terdiri dari kamera hiperspektral pemindaian garis (Pika XC2, Resonon Inc., Bozeman, MT, Amerika Serikat), dilampirkan dengan fokus lensa (Xenoplan 1.4/17, Schneider Kreuznach, Bad Kreuznach, Jerman), disertai lampu halogen 140 W serta parameter terkendali lain. Perangkat lunak SpectronPro (Resonon Inc., Bozeman, MT, Amerika Serikat) digunakan untuk mengendalikan kamera dan panggung bermotor selama pencitraan. Akuisisi data spektral pada rentang panjang gelombang 400-1000 nm (pada resolusi spektrum 1,3 nm), dan secara spasial setiap garis pemindaian terdiri dari 1.600 piksel, dengan jumlah garis pemindaian per kubus data. Selanjutnya data diolah *machine learning* berbasis pemodelan rLDA (regularized linear discriminant) dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2020b (The Mathworks, Inc.)

(Yoon *et al.*, 2024) Data diambil melalui pencitraan tanaman ganja untuk tujuan medis berjenis "Cherry Blonde". Kamera spektral yang dipergunakan adalah MicroHSI 410 SHARK (Corning) dengan mengkondisikan pencahayaan delapan lampu halogen 20 W diletakkan pada panggung bergerak. Kamera melakukan pencitraan dengan 150 gambar dengan rentang panjang gelombang 400-1000 nm. Selanjutnya data citra diolah menggunakan perangkat lunak Python 3.9 (Python Software Foundation). Pemodelan komputasi yang digunakan adalah *Linear Regression* (LR), SVM, KNN, RF dan GNB. Dari proses pemodelan komputasi tersebut dilakukan perbandingan kualitas CBD pada tanaman ganja yang dijadikan sampel.

C. Analisis Data dalam Identifikasi Tanaman *Cannabis sativa L.* Menggunakan Teknologi Pencitraan Spektral dan *Machine Learning*

Berdasarkan delapan artikel yang telah diseleksi, termuat analisis data dalam identifikasi tanaman *Cannabis sativa L.* menggunakan teknologi pencitraan spektral. Analisis pencitraan

spektral yang digunakan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. Analisis Pemodelan *Machine Learning* terhadap Tanaman *Cannabis sativa L.*

Peneliti dan Tahun	Analisis yang digunakan
(Abeysekera <i>et al.</i> , 2023)	Kandungan THC dianalisa menggunakan HPLC. Pemodelan <i>machine learning</i> dilakukan dengan empat algoritma regresi yaitu <i>Canonical Correlation Analysis</i> (CCA), <i>Ensemble CCA</i> (EnCCA), <i>Partial Least Squares Regression</i> (PLSR), and <i>Regularized PLS</i> (RPLS).
(Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022)	Profiling Cannabinoid dilakukan dengan <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC); Data citra spektral diolah dengan metode pemodelan kuantitatif berdasarkan spektrum <i>partial least square</i> (PLS) untuk akurasi dengan <i>ratio of prediction to deviation</i> (RPD) = 2,5 ($R^2 = 0,84$) di THC dan CBD. SIMPLS digunakan untuk pemodelan data spektral dan prediksi kandungan <i>cannabinoid</i> .
(Schober, Prager, & Graeff-Honninger, 2024)	Kandungan pupuk Phosphor (P) dan Kalium (K) menggunakan alat Plasma Optical Emission Spectroscopy. Untuk kandungan Nitrogen (N) menggunakan alat Thermal Conductivity Detector Elementar Vario EL. Analisis citra spektral menggunakan pemodelan PLSR terhadap spektrum data spektra dengan menggunakan program SPy perangkat lunak Python (3.9.12).
(Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020)	Analisis <i>cannabinoids</i> dilakukan dengan <i>Gas Chromatography Flame & Ionization Detector</i> (GCFID); Data Spektral diproses dengan metode <i>Standard Normal Variate</i> (SNV), <i>Multiplicative Signal Correction</i> (MSC), <i>Savitzky-Golay smoothing</i> (derajat ke-2 pada <i>degree polinomial</i> di jendela titik 5 s/d 15); <i>Savitzky-Golay</i> turunan pertama dan kedua. SIMCA untuk identifikasi <i>Cannabis sativa L.</i>
(Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2021)	Menggunakan analisis <i>machine learning</i> dengan komparasi pemodelan: <i>Random Forest</i> (RF), <i>Gradient Boosting</i> (GBT), <i>Classification and Regression Tree</i> (CART), dan <i>Support Vector Machine</i> (SVM).
(Bicakli, Kaplan, & Alqasemi, 2022)	Proses pengolahan data citra menggunakan pemodelan RF terhadap ladang ganja.
(Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022)	Analisis data spektral dengan pemodelan <i>Regularized linear discriminant</i> (rLDA) pada sampel ganja usia 2-10 minggu. Data diolah dengan <i>machine learning</i> berbasis pemodelan rLDA (<i>regularized linear discriminant</i>) dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2020b (The Mathworks, Inc.)

(Yoon *et al.*, 2024) Kandungan *cannabinoids* dilakukan dengan *Ultra High Performance Liquid Chromatography* (UHPLC).
Pengolahan data spektral menggunakan pemodelan *machine learning*: LR, SVM, KNN, RF, dan Gaussian Naïve Bayes (GNB)

Data sampel dalam penelitian ini untuk identifikasi tanaman *Cannabis sativa* L. menggunakan pencitraan spektral dan *machine learning* dengan melakukan pengujian terhadap tanaman ganja pada bagian daun, bunga, batang melalui pemeriksaan analisis molekuler dan dengan pengambilan citra spektra dengan kamera (Abeysekera *et al.*, 2023; Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022; Schober, Prager, & Graeff-Honninger, 2024; Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020; Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022; Yoon *et al.*, 2024). Data lain yang digunakan adalah data citra satelit dengan penginderaan jauh yaitu *SENTINEL 1*, *SENTINEL 2*, *LANDSAT 8* (Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2021) dan *PlanetScope* (Bicakli, Kaplan, & Alqasemi, 2022).

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, kandungan senyawa pada tanaman ganja yaitu THC dan CBD dilakukan uji konfirmasi menggunakan peralatan HPLC, UHPLC dan GCFID terhadap sampel daun, bunga dan batang. (Abeysekera *et al.*, 2023; Lu, Li, Young, Li, Linder, & Suchoff, 2022; Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020; Yoon *et al.*, 2024). Pengujian terhadap kandungan pupuk P dan K menggunakan *Plasma Optical Emission Spectroscopy* dan kandungan N menggunakan *Thermal Conductivity Detector Elementar Vario EL* (Schober,

Prager, & Graeff-Honninger, 2024). Pengolahan data spektral yang dipergunakan untuk perbandingan dengan data hasil uji konfirmasi kandungan senyawa kimia serta fertiliser pada tanaman ganja dilakukan dengan *machine learning* menggunakan pemodelan tercantum dalam tabel 3.

Dari berbagai penelitian ini diperoleh hasil bahwa pencitraan spektral dan kombinasi *machine learning* memiliki keandalan dalam mengidentifikasi tanaman *Cannabis sativa* L. beserta kandungan senyawa turunannya baik untuk tujuan industri maupun untuk penegakan hukum terhadap kultivasi ganja ilegal. Penelitian yang dilakukan oleh Abeysekera *et al.*, 2023, mengusulkan metode *partial least square feature selection* (PLSFS) dapat menghasilkan model yang konsisten dengan jumlah sampel sedikit dan pertama kali membuktikan penggunaan pencitraan HSI untuk memperkirakan konsentrasi THCA. Penelitian ini menunjukkan kegunaan pencitraan hiperspektral sebagai alat yang berpotensi berharga untuk kuantifikasi cepat kandungan *cannabinoid* dalam industri rami (Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022). Penelitian lain membuktikan bahwa pencitraan hiperspektral dapat digunakan sebagai teknik pemantauan secara *real time* untuk kuantifikasi nutrisi dalam produksi ganja di rumah

kaca tanpa mengganggu kondisi pertumbuhan tanaman (Schober, Prager, & Graeff-Honninger, 2024). Hasil dari keandalan metodologi penelitian berbasis kamera hiperspektral NIR dengan pita empat spektral untuk mendeteksi dan mengidentifikasi *Cannabis sativa L.*, menunjukkan potensi dapat diterapkan pada perangkat udara berbiaya rendah (Pereira, Pimentel, Amigo, & Honorato, 2020). Kombinasi algoritma *machine learning* dan citra terbukti handal untuk klasifikasi tanaman secara umum dan secara khusus terhadap *Cannabis sativa L.* (Sujud, Jaafar, Hassan, & Zurayk, 2021). Riset yang dilakukan oleh Lu, Young, Linder, Whipker, & Suchoff, 2022, menunjukkan adanya efektivitas pencitraan hiperspektral untuk membedakan kultivar, tahapan pertumbuhan, dan organ tanaman rami CBD. Hasilnya menunjukkan dengan menggunakan pemodelan Random Forest (RF), ladang ganja dapat diklasifikasikan secara akurat dengan tingkat akurasi lebih dari 93% sangat menjanjikan untuk dipergunakan dalam identifikasi ladang ganja (Buckle et al., 2022). Pemodelan LR dengan pra-pemrosesan spektral terbukti akurat dan berpotensi sebagai alat untuk memantau kadar komposisi cannabinoid serta mengoptimalkan proses pengeringan di industri ganja (Yoon et al., 2024).

Hasil kajian literatur ini dapat disimpulkan bahwa identifikasi tanaman ganja dapat dilakukan secara optimal dengan menggunakan teknologi pencitraan spectral yang dikombinasikan dengan analisis *machine*

learning. Penelitian ini menunjukkan bahwa hasil dari uji konfirmasi menggunakan peralatan analisis molekuler seperti HPLC, UHPLC dan GC/FID berkorelasi dengan hasil analisis *machine learning* terhadap citra spektral. Teknologi pencitraan spektral dipadukan dengan *machine learning* memiliki potensi besar diterapkan secara penginderaan jauh dalam identifikasi ladang ganja di daerah terpencil dan sulit dijangkau untuk tujuan penegakan hukum.

Keunggulan metode ini dapat menjangkau secara luas wilayah tempat kejadian perkara. Mempercepat efisiensi waktu dan tenaga bagi penegak hukum untuk deteksi dan identifikasi wilayah yang diduga terdapat ladang ganja serta dapat menekan biaya operasional dilapangan. Kekurangan dalam penerapan metode ini yaitu belum adanya sumber daya manusia dan tenaga ahli dalam bidang pencitraan spektral di lingkungan POLRI selaku instansi penegak hukum serta lemahnya penguasaan teknologi pencitraan spektral di dalam negeri sehingga harus impor menjadi hambatan untuk diterapkan. Optimalisasi penggunaan citra spektral dalam identifikasi ladang ganja ini merupakan metode yang handal, dapat menghemat biaya serta terbukti ilmiah untuk tujuan forensik.

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan dalam identifikasi ganja atau *Cannabis sativa L.* menggunakan pencitraan spektral dan *machine learning* telah terbukti secara ilmiah merupakan metode yang sangat andal, murah, cepat

untuk tujuan industri, penegakan hukum maupun tujuan forensik. Identifikasi *Cannabis sativa* L. dengan gabungan pencitraan spektral dan *machine learning* terbukti secara empiris terhadap hasil kandungan CBD dan THC berkorelasi dengan uji konfirmasi di laboratorium menggunakan HPLC, UPLC & GCFID. Pencitraan spektral dikombinasikan dengan perangkat permodelan *machine learning* dapat mengidentifikasi *Cannabis sativa* L. secara akurat. Implementasi metode ini yang dapat dioptimalkan dengan menggunakan drone untuk operasional yang lebih murah dan efisien dalam pemantauan kultivasi ladang *Cannabis sativa* L. secara ilegal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abeysekera, Sanush K., Robinson, Amanda., Po-Leen Ooi, Melanie., Kuang, Ye Chow., Manley Harris, Merylyn., Holmes, Wayne., Hirst, Evan., Nowak, Jessica., Caddie, Manu., Steinhorn, Gregor., & Demidenko, Serge. (2023). Sparse Reproducible Machine Learning for Near-Infrared Hyperspectral Imaging: Estimating The Tetrahydrocannabinolic Acid Concentration in Cannabis sativa L. *Industrial Crops & Products*. 192 (2023) 116137.
- Badan Narkotika Nasional. (2016). *Grand design alternative development dalam rangka pengentasan produksi ganja dan peningkatan kesejahteraan masyarakat di provinsi Aceh (Tahun 2016-2025)*. Diakses tanggal 19 Desember 2024 dari <https://bnn.go.id/konten/unggahan/2019/10/NASKAH-DAN-RINGKASAN-EKSEKUTIF-GDAD.pdf>.
- Khomarudin, M Rokhis. (2024). *Siaran Pers No: 26/SP/HM/ BKPUP/V/2024 Dukung Efektivitas Penegakan Hukum, BRIN Kembangkan Sistem Deteksi Ladang Ganja Ilegal*. Diakses pada 19 Desember 2024, dari <https://www.brin.go.id/press-release/118655/dukung-efektivitas-penegakan-hukum-brin-kembangkan-sistem-deteksi-ladang-ganja-ilegal>.
- Bhargava, Anuja., Sachdeva, Ashish., Sharma, Kulbhusan., Alsharif, Mohammed H., Uthansakul, Peerapong., & Uthansakul, Monthippa. (2024). Hyperspectral imaging and its applications: A review. *Heliyon*. 10 (2024) e332208. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e332208>
- Bicakli, Fatih., Kaplan, Gordana., Alqasemi, & Abduldaem S. (2022). Cannabis sativa L. Spectral Discrimination and Classification Using Satellite Imagery and Machine Learning. *Agriculture*. 2022, 12, 842 <https://doi.org/10.3390/agriculture12060842>
- Garini, Y., Young, IT., & McNamara, G. (2006). Spectral imaging: principles and applications. *Cytometry A*. 2006 Aug 1;69(8):735-47. doi: 10.1002/cyto.a.20311. PMID: 16969819.
- Grewal, R., Singh Kasana, S., & Kasana, G. (2023). Machine Learning and Deep Learning Techniques for Spectral Spatial Classification of Hyperspectral Images: A Comprehensive Survey. *Electronics*. 12(3), 488.

- <https://doi.org/10.3390/electronics12030488>
- Huang, Longqian., Luo, Ruichen., Liu, Xu., Haou, Xiang. (2025). Spectral imaging with deep learning. *Science & Applications*. (2022) 11:61. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00743-6>
- Kumar, Vinod., Singh, Ravi Shankar., Rambabu, Medara., & Dua, Yaman. (2024). Deep learning for hyperspectral image classification: A survey. *Computer Science Review*. 53 (2024) 100658 <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100658>
- Lu, Yuzhen., Li, Xu., Young, Sierra., Li, Xin., Linder, Eric., & Suchoff, David. (2022). Hyperspectral imaging with chemometrics for non-destructive determination of cannabinoids in floral and leaf materials of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Computers and Electronics in Agriculture*. 202 (2022) 107387. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107387>
- Lu, Yuzhen., Young, Sierra., Linder, Eric., Whipker, Brian., & Suchoff, David. (2022). Hyperspectral Imaging With Machine Learning to Differentiate Cultivars, Growth Stages, Flowers, and Leaves of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*. volume 12 article 810113 doi: 10.3389/fpls.2021.810113
- Pangaribuan, Aristo (2024) "Dinamika Kebijakan Ganja Dalam Politik Hukum Global dan Indonesia," *Jurnal Hukum & Pembangunan*. Vol. 54: No. 1, Article 2.
- DOI: 10.21143/jhp.vol54.no1.1583
- Pereira, Jose Francielson Q., Pimentel, Maria Fernanda., Amigo, Jose Manuel., & Honorato, Ricardo S. (2020). Detection and identification of *Cannabis sativa* L. using infrared hyperspectral imaging and machine learning methods. A feasibility study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 237 (2020) 118385
- Saha, Dhritiman., & Manickavasagan, Annamalai. 2021. Machine Learning techniques for analysis of hyperspectral images to determine quality of food products: A review. *Current Research in Food Science*. 4 (2021) 28-44 <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.01.002>
- Schober, Torsten., Prager, Achim., & Graeff-Honninger, Simone. (2024) A non-destructive method to quantify the nutritional status of *Cannabis sativa* L. using *in situ* hyperspectral imaging combination with chemometrics. *Computers and Electronics in Agriculture*. 218 (2024) 108656
- Stasilowicz, Anna., Tomala, Anna., Podolak, Irma., & Cielecka-Piontek, Judyta. (2021). Cannabis sativa L. as Natural Drug Meeting the Criteria of a Multitarget Approach to Treatment. *International Journal of Molecular Sciences*. 22(2):778 doi: [10.3390/ijms22020778](https://doi.org/10.3390/ijms22020778)
- Sujud, Lara., Jaafar, Hadi., Hassan, Mohammad Ali Haj., & Zurayk, Rami. (2021). Cannabis detection from optical and RADAR data fusion: A comparative analysis of the SMILE

machine learning algorithms in Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 24 (2021) 100639
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100639>

Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Putra, G. W., & Iswara, B. (2019). Metode systematic literature review untuk identifikasi platform dan metode pengembangan sistem informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*. 1(2), 63-77.

Yoon, Hyo In., Lee, Su Hyeon., Ryu, Dahye., Choi, Hyelim., Park, Soo Hyun., Jung, Je Hyeong., Kim, Ho-Youn., & Yang, Jung-Seok. (2024). Non-destructive assessment of cannabis quality during drying process using hyperspectral imaging and machine learning. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2024.1365298