

## MEMETAKAN MASA DEPAN PERTANIAN: ANALISIS BIBLIOMETRIK MULTIDIMENSI TERHADAP PERKEMBANGAN PERTANIAN, PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN, DAN SAINS PERTANIAN

Rifki Muhamad Imadudin<sup>1\*</sup>, Wilva Ramadayanti<sup>2</sup>, Irpan Nudin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitas Siliwangi, Indonesia; rifkimuhamadim@gmail.com

<sup>2</sup> Universitas Siliwangi, Indonesia; ramadayantiwilva0400@gmail.com

<sup>3</sup> Universitas Riyadlul Ulum, Indonesia; irpannudin14.15@gmail.com

Received:  
08-05-2026

Revised:  
21-05-2026

Accepted:  
26-05-2026

Published:  
31-05-2026

DOI:

\*Corresponding author: [rifkimuhamadim@gmail.com](mailto:rifkimuhamadim@gmail.com)

### ABSTRACT

This study presents a multidimensional bibliometric analysis of the scientific literature pertaining to agricultural development, sustainability, and agricultural science using data retrieved from the Scopus database. Employing VOSviewer software, keyword co-occurrence network mapping was conducted to identify the intellectual structure, thematic clusters, and emerging research trends for the period 2023-2025. The analytical results reveal that the research network is organized into three principal clusters: (1) the Blue Cluster, focusing on policy, economics, and sustainable development; (2) the Green Cluster, oriented toward smart agricultural technology, climate change, and resource management; and (3) the Red Cluster, representing the foundation of basic science, encompassing agrochemistry and soil biology. Temporal overlay analysis demonstrates that topics such as microbiology, carbon emission, and agricultural economics constitute the most recent research frontiers (2024.3+), while machine learning and remote sensing have entered the mainstream. The density visualization confirms that agricultural development in the Chinese context dominates global academic discourse. These findings underscore the critical importance of cross-disciplinary integration among basic science, technological innovation, and policy frameworks in achieving sustainable food security amid intensifying climate pressures

**Keywords:** *bibliometrics, sustainable agriculture, agricultural development, food security, climate change*

### ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan analisis bibliometrik multidimensi terhadap literatur ilmiah yang berkaitan dengan pembangunan pertanian, keberlanjutan, dan sains pertanian menggunakan data dari basis data Scopus. Dengan memanfaatkan VOSviewer, pemetaan jaringan kata kunci dilakukan untuk mengidentifikasi struktur intelektual, kluster tematik, dan tren penelitian yang berkembang dalam periode 2023-2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa jaringan penelitian terbagi ke dalam tiga kluster utama: (1) Kluster Biru yang berfokus pada kebijakan, ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan; (2) Kluster Hijau yang berorientasi pada teknologi pertanian cerdas, perubahan iklim, dan manajemen sumber daya; serta (3) Kluster Merah yang mewakili fondasi sains dasar meliputi agrokimia dan biologi tanah. Analisis overlay temporal mengungkapkan bahwa topik-topik seperti microbiology, carbon emission, dan agricultural economics merupakan tren penelitian termutakhir (2024,3+), sementara machine learning dan remote sensing telah mengalami pengarusutamaan. Peta kepadatan mengonfirmasi bahwa agricultural development dalam konteks Tiongkok mendominasi wacana global. Temuan ini berimplikasi pada pentingnya integrasi lintas disiplin antara sains dasar, inovasi teknologi, dan kerangka kebijakan untuk mewujudkan ketahanan pangan yang berkelanjutan di tengah tekanan perubahan iklim.

**Kata kunci:** *bibliometrik, pertanian berkelanjutan, pembangunan pertanian, ketahanan pangan, perubahan iklim*



© 2026 by the authors; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution- ShareAlike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## PENDAHULUAN

Pertanian merupakan tulang punggung ketahanan pangan global sekaligus sektor yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Pada dekade kedua abad ke-21, dunia dihadapkan pada paradoks yang belum pernah terjadi sebelumnya. populasi global yang terus bertumbuh menuju 10 miliar jiwa pada tahun 2050 membutuhkan peningkatan produksi pangan sebesar 50–70%, sementara perubahan iklim secara bersamaan mengancam produktivitas pertanian melalui anomali cuaca ekstrem, degradasi tanah, dan kelangkaan air (FAO, 2023; IPCC, 2022). Dalam konteks inilah urgensi penelitian pertanian multidisiplin menjadi semakin tidak terbantahkan.

Paradoks ini bukan sekedar persoalan teknis agronomis, melainkan sebuah krisis struktural yang bersifat multidimensi. Proyeksi terbaru Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (FAO, 2024) mengindikasikan bahwa pada tahun 2050, dunia membutuhkan tambahan produksi pangan sebesar 1,4 miliar ton setara gandum per tahun untuk mengimbangi laju pertumbuhan populasi dan perubahan pola konsumsi di negara-negara berpendapatan menengah. Di sisi yang berlawanan, laporan dari Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES, 2024) memproyeksikan bahwa perubahan iklim akan menyebabkan penurunan produktivitas pertanian global sebesar 2-6% per dekade akibat peningkatan frekuensi kekeringan ekstrem, banjir, dan kenaikan suhu rata-rata di atas ambang batas fisiologis tanaman pangan utama. Paradoks antara meningkatnya kebutuhan pangan (*food security gap*) yang tidak dapat diatasi oleh pendekatan penelitian sektoral yang terfragmentasi (Popp *et al.*, 2017). Tanpa peta jalan ilmiah yang terintegrasi dan berbasis bukti, upaya-upaya parsial di lapangan hanya akan menghasilkan solusi tambal sulam yang tidak mampu menjawab kompleksitas tantangan abad ke-21.

Ironisnya, respons komunitas ilmiah terhadap urgensi tersebut, meskipun massif secara kuantitas, justru berpotensi melahirkan persoalan baru yang tidak kalah serius: *information overload* atau beban informasi berlebih. Basis data Scopus mencatat lonjakan publikasi bertema ketahanan pangan dan pertanian berkelanjutan sebesar lebih dari 40% dalam lima tahun terakhir, menghasilkan lebih dari 180.000 artikel dalam rentang 2020-2024 (Elsevier, 2024). Volume literatur yang membengkak ini menciptakan kondisi dimana seorang pengambil kebijakan atau peneliti yang hendak memulai program riset baru di bidang pertanian dihadapkan pada lautan informasi tanpa Kompas navigasi yang memadai. Fenomena ini secara konseptual telah diidentifikasi oleh Bornmann dan Mutz (2015), sebagai *scholarly communication crisis*, yakni kondisi dimana pertumbuhan eksponensial literatur ilmiah justru mempersulit sintesis pengetahuan dan pengambilan keputusan berbasis bukti. Dalam konteks ini, kehadiran studi bibliometrik yang mampu memetakan, menyaring, dan mengorganisasikan struktur pengetahuan secara sistematis bukan lagi merupakan kemewahan intelektual, melainkan sebuah kebutuhan metodologis yang mendesak bagi seluruh pemangku kepentingan di sektor pertanian, mulai dari peneliti dasar hingga perumus kebijakan publik di tingkat nasional dan internasional.

Respons ilmiah terhadap tantangan ini telah melahirkan sebuah ledakan literatur yang luar biasa. Basis data Scopus mencatat pertumbuhan publikasi bertema pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan sebesar lebih dari 40% dalam lima tahun terakhir (Elsevier, 2024). Namun, volume yang besar ini justru menciptakan tantangan baru, bagaimana peneliti dapat memahami struktur pengetahuan yang ada, mengidentifikasi celah

penelitian, dan mengorientasikan diri pada tren yang paling relevan? Analisis bibliometrik hadir sebagai solusi metodologis yang terbukti mampu memetakan lanskap intelektual suatu bidang ilmu secara sistematis dan terukur (Donthu *et al.*, 2021).

Sejumlah studi bibliometrik di bidang pertanian telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir; namun, kajian mendalam terhadap literatur yang ada mengungkapkan sebuah pola parsialitas yang konsisten. Sebagian besar penelitian bibliometrik yang tersedia berfokus pada satu dimensi kajian secara dominan: dimensi ekonomi-kebijakan saja, dimensi teknologi-inovasi saja, atau dimensi sains dasar saja, tanpa upaya untuk mengintegrasikan ketiganya ke dalam sebuah kerangka analisis yang utuh. Misalnya, studi Farooque *et al.* (2022) yang menganalisis tren bibliometrik pertanian presisi secara eksklusif membatasi cakupannya pada aspek teknologi sensor dan kecerdasan buatan, tanpa menyentuh implikasi kebijakan atau fondasi agrobiologisnya. Sebaliknya, studi Balogh *et al.* (2020) yang memetakan penelitian keberlanjutan pertanian berbasis bibliometrik lebih banyak beroperasi pada level makro kebijakan dan indikator sosio-ekonomi, dengan porsi yang sangat minimal terhadap aspek teknologi lapangan ataupun mekanisme sains dasar yang menopang keberlanjutan tersebut. Fragmentasi ini bukan sekadar kelemahan metodologis yang dapat diabaikan; fragmentasi ini merepresentasikan sebuah buta titik epistemologis (*epistemological blind spot*) yang mengakibatkan peta literatur yang dihasilkan hanya mencerminkan sebagian kecil dari realitas kompleks sistem pertanian (Zupic & Cater, 2015).

Lebih jauh, tidak ditemukan studi bibliometrik yang secara eksplisit dan sistematis menganalisis interaksi sinergis antara tiga lapisan kajian pertanian secara simultan: lapisan makro yang mencakup kebijakan pertanian, pembangunan berkelanjutan, dan akuntabilitas lingkungan; lapisan meso yang meliputi teknologi pertanian cerdas, sistem irigasi presisi, dan manajemen sumber daya alam; serta lapisan mikro yang merepresentasikan sains dasar seperti biologi tanah, agrokimia, dan fisiologi tanaman. Studi Eck *et al.* (2021) yang merupakan salah satu tinjauan bibliometrik paling komprehensif dalam bidang ilmu pangan, misalnya, mengakui secara eksplisit bahwa pendekatan klusterisasi tunggal yang mereka gunakan tidak mampu menangkap dinamika lintas-kluster yang merupakan ciri khas dari sistem pengetahuan pertanian yang sesungguhnya bersifat integratif. Ketiadaan pendekatan multidimensi yang mampu membaca interaksi antar-lapisan ini secara bersamaan merupakan celah metodologis yang substansial, mengingat justru pada titik-titik persimpangan antar-lapisan inilah inovasi pertanian paling transformatif cenderung muncul (Gluckman *et al.*, 2021). Celah inilah yang menjadi justifikasi ilmiah utama dan sekaligus tantangan metodologis yang hendak dijawab oleh penelitian ini.

Integrasi teknologi mutakhir, khususnya *Machine Learning* (ML) dan *Remote Sensing* (RS), menjadi salah satu topik paling kritis dalam wacana pertanian kontemporer. Teknologi ML mampu mengolah data pertanian berskala besar mulai dari citra satelit hingga data sensor lapangan untuk menghasilkan prediksi hasil panen, deteksi dini serangan hama, dan optimasi irigasi secara presisi (Liakos *et al.*, 2018; Sarkar *et al.*, 2023). Sementara itu, RS memungkinkan pemantauan kondisi vegetasi, kelembaban tanah, dan penggunaan lahan secara real-time dalam skala regional hingga global, yang sangat krusial untuk perencanaan ketahanan pangan di era perubahan iklim (Weiss *et al.*, 2020). Tanpa integrasi teknologi ini, kebijakan pertanian akan terus beroperasi di atas basis informasi yang tidak memadai, sehingga respons terhadap krisis pangan menjadi terlambat dan tidak efisien.

Lebih jauh, konteks geopolitik pertanian global tidak dapat diabaikan. Tiongkok, sebagai negara dengan populasi terbesar di dunia dan kontributor penelitian pertanian paling produktif dalam beberapa tahun terakhir, memainkan peran yang sangat signifikan dalam membentuk arah penelitian dan kebijakan pertanian global (Chen *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023). Pengalaman Tiongkok dalam mentransformasi pertanian subsisten menjadi sistem pertanian

yang berorientasi pasar dengan intervensi kebijakan masif memberikan pelajaran berharga bagi negara-negara berkembang lainnya.

Berbeda dari studi-studi bibliometrik pertanian yang ada, penelitian ini menawarkan kebaruan metodologis yang terletak pada penerapan pendekatan sintesis lintas-klaster (*cross-cluster synthesis*) sebagai unit analisis utamanya. Jika penelitian bibliometrik konvensional umumnya berhenti pada tahap deskripsi visual berupa grafik frekuensi kata kunci, *co-occurrence network*, atau pemetaan klaster secara terpisah, penelitian ini secara deliberatif merancang analisisnya untuk membaca dinamika interaksi di antara tiga klaster yang terbentuk, yakni Klaster Merah (sains dasar), Klaster Hijau (teknologi dan manajemen), dan Klaster Biru (kebijakan dan ekonomi), sebagai sebuah ekosistem pengetahuan yang saling bergantung. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi jalur-jalur transfer pengetahuan (*knowledge transfer pathways*) yang menghubungkan temuan laboratorium sains dasar dengan keputusan kebijakan publik melalui perantaraan inovasi teknologi, sesuatu yang tidak dapat ditangkap oleh analisis klaster tunggal manapun. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan sekadar menyajikan peta bibliometrik, melainkan menghasilkan sebuah model relasional yang menjelaskan bagaimana pengetahuan mengalir dan saling memperkuat di antara lapisan-lapisan disiplin ilmu pertanian, sebuah perspektif yang berpotensi mengubah cara komunitas ilmiah dan pengambil kebijakan memandang prioritas investasi riset pertanian di masa mendatang (Gluckman *et al.*, 2021; Donthu *et al.*, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan struktur intelektual penelitian pertanian dan pembangunan berkelanjutan melalui analisis jaringan kata kunci; (2) mengidentifikasi klaster tematik utama beserta keterkaitan antar-klaster; (3) menganalisis evolusi temporal tren penelitian; dan (4) mengidentifikasi topik-topik penelitian yang sedang berkembang sebagai agenda masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan strategis bagi peneliti, pengambil kebijakan, dan praktisi pertanian dalam menentukan prioritas penelitian dan investasi ilmu pengetahuan.

Pada tataran yang lebih konkret, penelitian ini dirancang untuk mengisi celah pengetahuan yang spesifik dan mendesak, yaitu ketiadaan peta jalan (*roadmap*) penelitian pertanian yang berbasis bukti bibliometrik dan berdimensi ganda: temporal sekaligus spasial. Melalui pemetaan temporal yang mengidentifikasi tren terkini (*frontier 2024.3+*) dan analisis densitas yang memvisualisasikan intensitas penelitian per topik, hasil penelitian ini menyediakan dua instrumen navigasi ilmiah yang saling melengkapi. Instrumen pertama, yakni peta tren temporal, memungkinkan peneliti untuk mengetahui ke mana arus utama riset global sedang bergerak sehingga dapat memposisikan diri secara strategis di antara isu-isu yang sedang naik dan yang telah jenuh. Instrumen kedua, yakni peta densitas, mengungkap area-area tematik yang masih tipis liputan penelitiannya sehingga terbuka ruang kontribusi orisinal yang nyata. Relevansi ganda ini menjadi sangat krusial terutama bagi peneliti dari negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, yang seringkali menghadapi keterbatasan sumber daya riset dan karenanya tidak mampu menanggung kerugian akibat tumpang tindih agenda penelitian dengan studi-studi yang sudah terlampaui jenuh secara bibliometrik (Sugiyono & Widiyanto, 2023). Dengan tersedianya *roadmap* yang berbasis analisis lintas-klaster ini, komunitas riset pertanian Indonesia diharapkan mampu mengidentifikasi relung-relung penelitian (*research niches*) yang belum terjamah, membangun kolaborasi yang lebih terarah dengan jaringan riset internasional, dan pada akhirnya berkontribusi secara lebih signifikan pada percakapan ilmiah global mengenai ketahanan pangan yang berkelanjutan.

## METODE

### Desain Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan bibliometrik kuantitatif dengan analisis jaringan ko-okurensi kata kunci (*keyword co-occurrence network analysis*). Bibliometrik merupakan metode analisis statistik terhadap publikasi ilmiah yang memungkinkan evaluasi terhadap pola produktivitas, kolaborasi, dan difusi pengetahuan dalam suatu disiplin ilmu (Aria & Cuccurullo, 2017). Data bibliografis diperoleh dari basis data Scopus, yang dipilih karena cakupannya yang komprehensif terhadap jurnal-jurnal bereputasi internasional dan dukungannya terhadap ekspor data dalam format yang kompatibel dengan perangkat lunak analisis bibliometrik. Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci: "*agricultural development*", "*sustainable agriculture*", "*food security*", "*agricultural science*", dan "*sustainable development*", dengan pembatasan periode publikasi pada tahun 2020–2025 untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran data.

### Teknik Penulisan VOSviewer

Perangkat lunak VOSviewer versi 1.6.20 (Van Eck & Waltman, 2010; 2023) digunakan sebagai alat utama untuk visualisasi dan analisis jaringan bibliometrik. VOSviewer dipilih karena kemampuannya menghasilkan peta jaringan yang intuitif dan dapat diinterpretasikan secara ilmiah, serta telah menjadi standar de facto dalam penelitian bibliometrik di berbagai disiplin ilmu (Moral-Muñoz *et al.*, 2020).

Langkah-langkah teknis penggunaan VOSviewer dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: Pertama, data yang diekspor dari Scopus dalam format CSV (.csv) diimpor ke dalam VOSviewer melalui menu "*Create a map based on bibliographic data*". Kedua, unit analisis ditetapkan sebagai "*Keywords*" dengan jenis analisis "*Co-occurrence*". Ketiga, ambang batas minimum kemunculan kata kunci (*minimum number of occurrences*) ditetapkan sebesar 5 kali untuk memastikan bahwa hanya kata kunci yang memiliki representasi statistik yang memadai dimasukkan ke dalam analisis. Keempat, algoritma normalisasi asosiasi (*association strength*) digunakan untuk menghitung kekuatan hubungan antar kata kunci. Kelima, algoritma VOS layout diaplikasikan untuk menentukan posisi setiap node dalam peta jaringan, di mana kedekatan posisi mencerminkan kekuatan asosiasi antar kata kunci.

Tiga jenis visualisasi dihasilkan dari proses ini: (1) *Network Visualization*, yang menampilkan kluster tematik berdasarkan algoritma modularity clustering dengan kode warna berbeda untuk setiap kluster; (2) *Overlay Visualization*, yang melapisi informasi temporal berupa rata-rata tahun publikasi setiap kata kunci, sehingga menghasilkan gradien warna dari ungu (lebih lama) ke kuning (lebih baru); dan (3) *Density Visualization*, yang menampilkan kepadatan kata kunci berdasarkan frekuensi kemunculan dan kekuatan koneksi, di mana area lebih terang (kuning) menandakan kepadatan riset yang lebih tinggi. Ketiga visualisasi ini bersifat komplementer dan diinterpretasikan secara terintegrasi dalam pembahasan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Struktur Jaringan dan Kluster Tematik (*Network Visualization*)

Visualisasi jaringan yang tertera pada Gambar 1 yaitu kata kunci yang menggambarkan struktur intelektual keseluruhan corpus penelitian. Analisis jaringan berhasil mengidentifikasi tiga kluster tematik yang distinktif namun saling terhubung, dengan node "*agricultural development*" dan "*agriculture*" sebagai jembatan sentral (*bridge nodes*) yang menjadi penghubung utama antar-kluster. Tiga kluster tersebut mencerminkan tiga lapisan kajian pertanian: lapisan makro (kebijakan dan ekonomi), lapisan meso (teknologi dan manajemen), dan lapisan mikro (sains dasar dan biologi).



c) Klaster Merah: Sains Dasar, Agrokimia, dan Biologi

Klaster Merah merepresentasikan dimensi sains dasar yang menjadi fondasi epistemologis bagi seluruh bangunan penelitian pertanian. Node-node kunci dalam klaster ini meliputi "soil", "fertilizer", "nitrogen", "plant growth", "microbiology", "metabolism", "chemistry", "controlled study", dan "agricultural worker". Klaster ini memiliki densitas koneksi internal yang tinggi, menunjukkan adanya kohesi tematik yang kuat di antara subyek-subyek sains dasar pertanian.

Penting untuk dicatat bahwa Klaster Merah bukan merupakan entitas yang berdiri sendiri, melainkan berfungsi sebagai "dapur sains" yang memasok pengetahuan fundamental bagi klaster-klaster lainnya. Pengetahuan mendalam tentang siklus nitrogen dalam tanah, interaksi mikroba rizofe, dan metabolisme tanaman menjadi prasyarat untuk mengembangkan formulasi pupuk hayati yang lebih efisien yang pada gilirannya berkontribusi pada pengurangan emisi N<sub>2</sub>O (gas rumah kaca) dari sektor pertanian, sebuah isu yang relevan bagi Klaster Biru (Bhattacharyya *et al.*, 2020). Demikian pula, pengetahuan tentang kondisi tanah yang dihasilkan oleh penelitian sains dasar menjadi input krusial bagi pengembangan model ML untuk rekomendasi pemupukan presisi dalam Klaster Hijau.

### Sintesis Antar-Klaster: Ekosistem Pengetahuan yang Terintegrasi

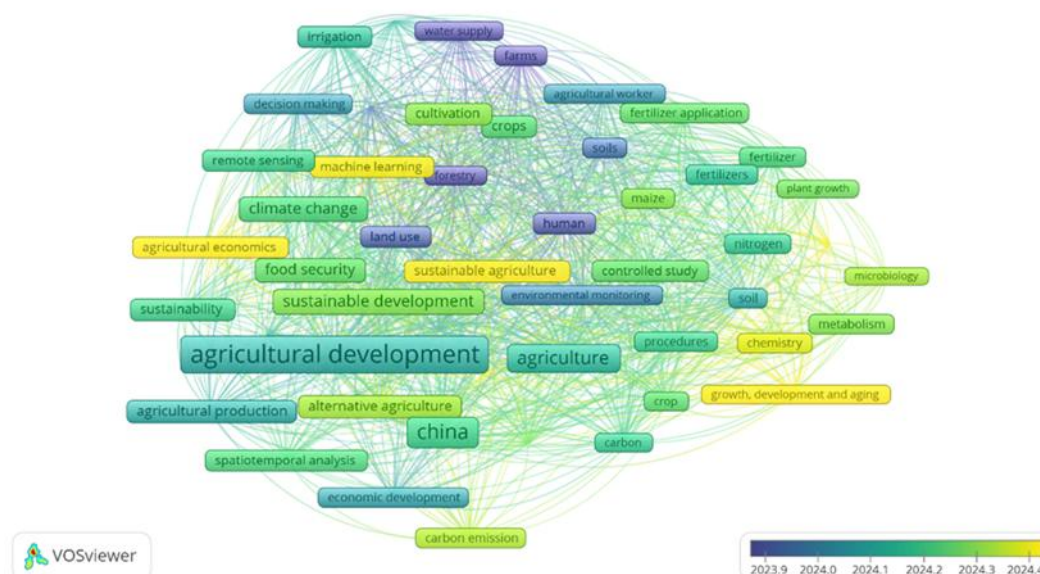
Kekuatan analitis utama dari visualisasi jaringan ini bukan terletak pada deskripsi masing-masing klaster secara terpisah, melainkan pada pemahaman tentang bagaimana ketiga klaster tersebut berinteraksi secara sinergis membentuk sebuah ekosistem pengetahuan yang koheren. Beberapa jalur integrasi antar-klaster dapat diidentifikasi secara eksplisit.

Pertama, jalur dari sains dasar menuju kebijakan (Merah → Biru). Penelitian tentang kesuburan tanah dan efisiensi nitrogen (Klaster Merah) memberikan landasan empiris bagi kebijakan penggunaan pupuk dan regulasi emisi karbon dari sektor pertanian (Klaster Biru). Tanpa pemahaman yang memadai tentang proses biokimia dalam tanah, kebijakan pertanian berkelanjutan hanya akan bersifat normatif tanpa dasar saintifik yang kuat. Hal ini sesuai dengan argumen Bhattacharyya *et al.* (2020) bahwa transisi menuju pertanian berkelanjutan harus dilandasi oleh pemahaman mendalam tentang ekosistem tanah.

Kedua, jalur dari teknologi menuju kebijakan (Hijau → Biru). Data yang dihasilkan oleh teknologi remote sensing dan ML (Klaster Hijau) menyediakan informasi spasial-temporal yang diperlukan untuk perumusan kebijakan penggunaan lahan, alokasi sumber daya air, dan penilaian risiko ketahanan pangan berbasis bukti (Klaster Biru). Liu *et al.* (2023) mendemonstrasikan bahwa integrasi data penginderaan jauh ke dalam kerangka perencanaan pertanian nasional di Tiongkok secara signifikan meningkatkan akurasi proyeksi produksi pangan dan efisiensi alokasi subsidi pertanian.

Ketiga, jalur dari sains dasar menuju teknologi (Merah → Hijau). Pengetahuan tentang sifat-sifat fisik dan kimia tanah (Klaster Merah) menjadi variabel input yang tidak tergantikan dalam model ML untuk prediksi pertumbuhan tanaman dan rekomendasi irigasi (Klaster Hijau). Goap *et al.* (2018) mengembangkan sistem irigasi cerdas berbasis IoT dan ML yang mengintegrasikan data kelembaban tanah, suhu, dan kondisi cuaca untuk mengoptimalkan konsumsi air. Tanpa data tanah yang akurat dari penelitian sains dasar, performa model ML tersebut akan menurun secara signifikan. Sintesis ketiga jalur integrasi ini menunjukkan bahwa kemajuan dalam satu klaster secara langsung memperkuat kapasitas klaster lainnya, membentuk sebuah siklus penguatan yang saling menguntungkan.

## Analisis Overlay Temporal: Evolusi Tren Penelitian



Gambar 2. Visualisasi Jaringan  
Sumber: Data diolah, 2025

Gambar 2 menyajikan *overlay visualization* yang memberikan dimensi temporal pada analisis jaringan, memungkinkan identifikasi tidak hanya struktur penelitian yang ada, tetapi juga arahnya ke depan. Gradien warna dari ungu/biru (sekitar 2023,9) menuju kuning-hijau (2024,4+) merepresentasikan kronologi perkembangan tren penelitian dalam rentang waktu yang relatif singkat namun dinamis.

Topik-topik yang ditandai dengan warna biru-ungu, yaitu "agricultural development", "sustainable development", "irrigation", "crops", dan "fertilizer", merupakan pondasi penelitian yang sudah mapan. Topik-topik ini telah memiliki basis literatur yang luas dan metodologi yang terstandarisasi, sehingga kontribusi terbaru cenderung berupa refinement atau aplikasi pada konteks geografis yang spesifik. Sementara itu, topik-topik berwarna hijau muda "remote sensing", "machine learning", "climate change", "food security", "sustainable agriculture", dan "environmental monitoring" menandai area yang sedang dalam fase pengarusutamaan. Topik-topik ini telah cukup matang untuk diadopsi secara luas, namun masih memiliki potensi inovasi yang signifikan.

Yang paling signifikan secara strategis adalah topik-topik berwarna kuning (2024,3+), yang merepresentasikan frontier penelitian terkini. Dalam domain sains dasar lanjutan, kemunculan "microbiology" dan "chemistry" sebagai topik termutakhir mengindikasikan pergeseran menuju penelitian tingkat molekuler dan seluler. Ini berkorelasi dengan perkembangan pesat dalam bioteknologi pertanian, termasuk rekayasa genetika mikroba tanah untuk meningkatkan efisiensi fiksasi nitrogen dan dekomposisi bahan organik sebuah pendekatan yang berpotensi merevolusi penggunaan pupuk kimia sintetis (Bhattacharyya *et al.*, 2020). Lebih jauh, "growth, development, and aging" sebagai topik baru menunjukkan minat yang meningkat terhadap pemahaman mekanistik siklus hidup tanaman pada tingkat fisiologis, yang relevan untuk pengembangan varietas unggul yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Dalam domain ekonomi dan lingkungan, kemunculan "agricultural economics" dan "carbon emission" sebagai topik termutakhir memiliki implikasi kebijakan yang mendalam. Hal ini mencerminkan semakin kuatnya tekanan internasional untuk mengintegrasikan akuntabilitas karbon ke dalam sistem pertanian sebagai bagian dari komitmen net-zero emisi 2050 (IPCC, 2022). Di sisi lain, ini juga mencerminkan perkembangan pasar kredit karbon pertanian sebagai instrumen ekonomi baru untuk mendorong transisi menuju pertanian rendah emisi (Woolf *et al.*, 2021).

Implikasi terpenting dari analisis overlay ini bagi masa depan pertanian cerdas (*Smart Agriculture*) adalah bahwa konvergensi antara bioteknologi (Klaster Merah-mutakhir),



saling memperkuat, di mana sains dasar menyediakan fondasi epistemologis, teknologi menyediakan kapasitas implementasi, dan kebijakan menyediakan kerangka aksi.

Kedua, analisis *overlay* temporal menunjukkan bahwa pertanian cerdas berbasis ML dan remote sensing telah memasuki fase mainstream, sementara frontier penelitian terkini berada pada konvergensi antara mikrobiologi tanah tingkat lanjut, akuntansi karbon pertanian, dan ekonomi keberlanjutan. Klaster Merah, yang selama ini sering dipandang sebagai domain penelitian murni yang terpisah dari kebijakan, justru terbukti menjadi sumber inovasi yang paling dinamis untuk masa depan pertanian berkelanjutan.

Ketiga, dominasi penelitian berbasis konteks Tiongkok mengindikasikan bahwa pengalaman dan model kebijakan pertanian dari negara tersebut memiliki potensi yang besar sebagai referensi komparatif bagi negara-negara berkembang lainnya, termasuk Indonesia, dalam merumuskan strategi modernisasi pertanian yang kontekstual. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas unit analisis bibliometrik ke level *co-authorship* dan *co-citation* untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif tentang jaringan kolaborasi dan aliran pengetahuan antar institusi dan negara. Selain itu, studi komparatif antara basis data Scopus dan *Web of Science* akan meningkatkan robustitas temuan bibliometrik.

## REFERENSI

- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975.
- Balogh, P., Konár, Z., Gabnai, Z., Pál, G., Bai, A., & Papp, S. (2020). Research trends in agricultural sustainability: A systematic bibliometric analysis. *Sustainability*, 12(20), 8503.
- Bhattacharyya, P. N., Goswami, M. P., & Bhattacharyya, L. H. (2020). Perspective of beneficial microbes in agriculture under the changing climatic scenario: A review. *Journal of Phytology*, 12, 26–41.
- Bornmann, L., & Mutz, R. (2015). Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 66(11), 2215–2222.
- Chen, X., Zhang, Y., & Liu, W. (2024). Mapping the intellectual landscape of China's agricultural development research: A bibliometric analysis. *Agricultural Systems*, 218, 103684.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.
- Elsevier. (2024). *Research trends in sustainable agriculture and food security: A Scopus analysis*. Elsevier Research Intelligence Report. <https://www.elsevier.com/research-intelligence>
- FAO. (2023). *The future of food and agriculture: Drivers and triggers for transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-future-of-food-and-agriculture/en>
- FAO. (2024). *The state of food and agriculture 2024: Financing to end hunger and malnutrition for the transformation of food systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-food-and-agriculture/en>
- Farooque, A. A., Zaman, Q. U., Groulx, D., & Schumann, A. W. (2022). Precision agriculture for sustainable crop production: A bibliometric review of current status and future prospects. *Agronomy*, 12(3), 694.
- Gluckman, P. D., Bardsley, A., & Kaiser, M. (2021). Brokerage at the science–policy interface: From conceptual framework to practical guidance. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8, 84.
- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Rama Krishna, C. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine Learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 41–49.

- IPBES. (2024). *Assessment report on the interlinkages among biodiversity, water, food and health*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.
- Liu, J., Tao, F., & Zhang, Z. (2023). Remote sensing-based monitoring of crop growth and agricultural land use in China: A review of recent advances. *Remote Sensing of Environment*, 287, 113465.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: An emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1484.
- Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A., & Cobo, M. J. (2020). *Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review*. *Profesional de la Información*, 29(1), e290103.
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2017). Pesticide productivity and food security: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 243–255.
- Sarkar, S., Pramanik, M., Panda, S., & Dey, S. K. (2023). Application of machine learning in smart agriculture: Recent trends and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138457>
- Sugiyono, M. E., & Widiyanto, B. (2023). Pemetaan agenda riset pertanian Indonesia berbasis analisis bibliometrik Scopus 2018–2022: Implikasi terhadap kebijakan riset nasional. *Jurnal Kebijakan Pertanian*, 17(2), 115–134.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). *VOSviewer manual (Version 1.6.20)*. Leiden University.
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). *Remote sensing for agricultural applications: A meta-review*. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402.
- Woolf, D., Solomon, D., & Lehmann, J. (2021). Land restoration in food security programmes: Synergies with climate change mitigation. *Climate Policy*, 21(Suppl. 1), 40–55.
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472.