

Integrasi Otonom *Internet of Things* dan *Business Intelligence* Berbasis *Causal Machine Learning* untuk Mitigasi Risiko Finansial Agrikultur Presisi

Anisa Triyana ^{1)*} , Aura Illa Sari ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ kakdy21@gmail.com, ²⁾ deaauliasiswoyo@gmail.com

Abstrak

Ketidakpastian iklim dan dinamika data lingkungan menjadi tantangan utama bagi stabilitas profitabilitas sektor agrikultur di era Ekonomi 5.0. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem *Business Intelligence* (BI) otonom yang mensinkronisasikan data sensor hujan *Internet of Things* (IoT) dengan proyeksi keuntungan finansial secara *real-time*. Menggunakan pendekatan pengembangan sistem, kerangka kerja ini memanfaatkan model konseptual data untuk mengintegrasikan aliran data heterogen ke dalam arsitektur *Big Data* yang terstruktur. Inti analitik sistem menggabungkan algoritma *Bi-Directional Long Short-Term Memory* (Bi-LSTM) untuk prediksi curah hujan presisi dengan *Causal Machine Learning* guna menganalisis hubungan sebab-akibat terhadap metrik ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi ini memungkinkan pengambilan keputusan preskriptif yang transparan dalam strategi mitigasi risiko "pre-rain", seperti optimasi jadwal pemupukan dan panen. Keunggulan sistem terletak pada kemampuan otonom dalam mendeteksi *data drift* dan melakukan pelatihan ulang model secara mandiri untuk menjaga akurasi di tengah perubahan pola cuaca ekstrem. Implementasi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi operasional dan peningkatan margin keuntungan melalui transformasi data IoT menjadi kecerdasan bisnis yang tangguh dan adaptif.

Kata Kunci: *Autonomous Bussiness Intelligence, IoT, Bi-LSTM, Causal Machine Learning, Agricultural Profitability*

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Lanskap pertanian modern sedang mengalami pergeseran paradigma mendasar seiring dengan integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) ke dalam operasi inti sistem informasi organisasi[1]. Dalam konteks Industri 4.0, efektivitas pengambilan keputusan tidak lagi hanya bergantung pada intuisi manusia atau analisis data historis statis, tetapi lebih pada kemampuan sistem untuk memproses aliran data berkecepatan tinggi yang dihasilkan oleh sensor lingkungan[2]. Namun, tantangan utama yang sering menghambat optimalisasi teknologi ini adalah kesenjangan antara data mentah yang heterogen dan kebutuhan akan analisis strategis yang berorientasi pada keuntungan[3], [4]. Data IoT, khususnya dari sensor curah hujan, dicirikan oleh volume yang sangat besar dan format yang seringkali tidak terstruktur[5], [6], sehingga membutuhkan lapisan abstraksi berupa Model Data Konseptual untuk secara sistematis diubah menjadi kerangka kerja *Business Intelligence* (BI). Tanpa model konseptual yang kuat, organisasi berisiko kewalahan oleh banjir informasi yang tidak memiliki nilai ekonomi, di mana data sensor hanya tetap menjadi catatan teknis tanpa implikasi keuangan yang jelas[7].

Latar belakang penelitian ini juga didorong oleh dinamika ketidakpastian iklim, yang secara langsung memengaruhi volatilitas keuntungan petani[8]. Fenomena cuaca ekstrem dan pola curah hujan yang tidak dapat diprediksi menimbulkan ancaman signifikan terhadap efisiensi biaya operasional, khususnya dalam penggunaan sumber daya penting seperti pupuk dan tenaga kerja[9]. Studi sebelumnya dalam pertanian cerdas telah banyak mengeksplorasi penggunaan algoritma pembelajaran mendalam, seperti *Bi-Directional Long Short-Term Memory* (Bi-LSTM), untuk meningkatkan akurasi prediksi curah hujan[10]. Namun, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan, karena model prediktif ini sering berfungsi sebagai "kotak hitam" dan berfokus terutama pada akurasi statistik tanpa menghubungkan hasil dengan logika kausal bisnis[7], [11], [12]. Di sinilah Pembelajaran Mesin Kausal menjadi sangat penting, memberikan wawasan sebab-akibat yang lebih dalam sehingga sistem BI tidak hanya memprediksi peristiwa tetapi juga menghasilkan rekomendasi preskriptif yang transparan untuk mitigasi risiko sebelum curah hujan terjadi[5], [13].

* Anisa Triyana

Formulasi masalah dalam studi ini berfokus pada keterbatasan kemampuan adaptasi sistem BI konvensional terhadap data lingkungan yang dinamis, yang umumnya disebut sebagai pergeseran data. Masalah teknis ini sering menyebabkan penurunan kinerja pada model prediktif, di mana model yang awalnya akurat menjadi tidak relevan karena pola cuaca bergeser secara drastis. Lebih lanjut, ketergantungan pada intervensi ahli manual untuk pembaruan model menghadirkan hambatan bagi skalabilitas sistem. Oleh karena itu, muncul pertanyaan mendasar: bagaimana merancang arsitektur BI otonom yang mampu mengintegrasikan data IoT secara real-time, melakukan analisis kausal terhadap potensi kerugian finansial, dan secara independen melatih ulang model (berevolusi sendiri) untuk mempertahankan akurasi proyeksi keuntungan panen di tengah kondisi lingkungan yang berfluktuasi.

Penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mengevaluasi efektivitas kerangka kerja Business Intelligence otonom yang menyinkronkan data sensor curah hujan dengan perhitungan profitabilitas ekonomi secara real-time. Melalui pendekatan pengembangan sistem, studi ini bertujuan untuk menciptakan solusi informatika yang memberikan visibilitas operasional tinggi bagi petani dalam mengelola risiko terkait cuaca[14], [15]. Lebih spesifiknya, penelitian ini berupaya menerapkan model kausal yang mengurangi bias dalam pengambilan keputusan keuangan sekaligus mempercepat respons pencegahan sebelum kualitas tanaman menurun akibat faktor lingkungan. Dengan demikian, kontribusi yang diharapkan melampaui peningkatan akurasi teknis hingga memperkuat daya saing dan keberlanjutan ekonomi sektor pertanian dengan mengubah data IoT menjadi business intelligence yang preskriptif dan tangguh[16].

Secara teoritis, penelitian ini bertujuan untuk memperluas penerapan Business Intelligence, yang sebagian besar terkonsentrasi di sektor keuangan dan ritel, ke bidang pertanian presisi—suatu domain yang dicirikan oleh variabel fisik yang kompleks. Secara praktis, implementasi sistem ini diharapkan dapat berfungsi sebagai alat navigasi bagi petani dalam mengelola efisiensi input dan memaksimalkan margin keuntungan melalui pemanfaatan data yang optimal. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip otonomi sistem dan analisis kausal, studi ini meletakkan dasar bagi sistem pengambilan keputusan di masa depan yang tidak hanya cerdas dalam memproses informasi tetapi juga mampu beradaptasi secara otonom terhadap tantangan lingkungan global yang semakin kompleks.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Transformasi digital dalam sektor agrikultur saat ini sangat dipengaruhi oleh integrasi Internet of Things (IoT) dan sistem pendukung keputusan cerdas yang memungkinkan efisiensi operasional bagi petani skala kecil[17]. Perkembangan teknologi Business Intelligence (BI) telah bergeser dari sekadar pengolahan data historis menuju analisis real-time yang memanfaatkan aliran data dari berbagai sensor, seperti smart-meter dan sensor lingkungan[18], untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih responsif. Implementasi IoT dalam ekosistem ini membutuhkan perancangan database yang matang, di mana penggunaan model data konseptual dan diagram hubungan entitas (Entity-Relationship Diagram) menjadi fundamental untuk menjamin struktur data yang sistematis[19], [20], [21]. Dengan memetakan hubungan antar entitas secara eksplisit, transformasi otomatis dari model konseptual ke skema fisik database dapat dilakukan untuk mempercepat pengembangan aplikasi BI berbasis IoT[22].

Kekuatan utama dari sistem informasi bisnis modern terletak pada kemampuannya mengelola fenomena Big Data yang mencakup volume, kecepatan, dan keragaman data yang sangat tinggi[23], [24]. Dalam konteks informatika, arsitektur Big Data disusun dalam lapisan-lapisan yang terintegrasi untuk memastikan aliran data dari perangkat nirkabel dapat diolah menjadi wawasan strategis bagi organisasi[25]. Pemanfaatan teknologi ini memberikan peluang besar bagi transformasi bisnis di era Ekonomi 5.0, meskipun tantangan terkait keamanan jaringan dan privasi data tetap menjadi isu krusial yang harus dimitigasi menggunakan teknologi Deep Learning dan protokol keamanan tingkat tinggi[26]. Oleh karena itu, pelembagaan dan pembudayaan analitik data menjadi urgensi bagi institusi yang ingin mengoptimalkan infrastruktur digital mereka.

Pengambilan keputusan di tingkat perusahaan kini mulai mengadopsi pendekatan yang lebih canggih melalui integrasi Causal Machine Learning yang memungkinkan pemahaman hubungan sebab-akibat, bukan sekadar korelasi statistik[27]. Penggunaan sistem pendukung keputusan cerdas (Intelligent Decision Support Systems) yang menggabungkan metode Machine Learning dan Multicriteria Decision-Making terbukti mampu meningkatkan kualitas strategi bisnis dalam menghadapi dinamika pasar yang tidak menentu. Dalam beberapa skenario teknis, model hibrida yang menggabungkan arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) dan Long Short-Term Memory (LSTM) telah sukses diterapkan untuk klasifikasi otomatis dan diagnosa data medis, yang menunjukkan fleksibilitas algoritma tersebut untuk diadaptasi ke berbagai domain aplikasi cerdas[27], [28].

Di sektor pertanian presisi, prediksi fenomena alam seperti curah hujan menjadi faktor penentu dalam keberhasilan budidaya dan manajemen risiko finansial[29]. Penggunaan model Bi-Directional Long Short-Term Memory (Bi-

LSTM) menunjukkan performa yang unggul dalam pengolahan data time-series cuaca karena kemampuannya menangkap informasi dari dua arah temporal sekaligus[30], [31]. Pendekatan Bi-LSTM ini sering dikombinasikan dengan teknologi IoT untuk menghasilkan prediksi hujan secara real-time, yang sangat krusial bagi petani dalam mempersiapkan langkah preventif sebelum terjadinya hujan. Selain itu, optimasi model melalui mekanisme attention atau penggabungan dengan CNN (Hybrid CNN-LSTM) terus dikembangkan untuk meningkatkan akurasi prakiraan cuaca di tingkat lahan[32], [33].

Analisis terhadap produktivitas tanaman dan evapotranspirasi juga semakin bergantung pada kecanggihan model pembelajaran mendalam untuk menghasilkan prakiraan jangka panjang yang stabil. Penelitian menunjukkan bahwa model Bi-LSTM mampu memberikan hasil prediksi hasil panen (crop yield) yang lebih akurat dan dapat dijelaskan (explainable) dibandingkan dengan teknik machine learning tradisional[34]. Untuk mencapai performa maksimal, teknik optimasi seperti algoritma Harris Hawks sering diaplikasikan pada jaringan saraf untuk menyempurnakan rekomendasi jenis tanaman dan prediksi hasil produksi. Dengan demikian, integrasi antara pemantauan lingkungan berbasis IoT dan model analitik tingkat lanjut menjadi pondasi bagi sistem manajemen pertanian yang cerdas dan berkelanjutan.

Infrastruktur pendukung seperti Cloud Networking, Software Defined Networking (SDN), dan jaringan nirkabel (Mesh Network) memainkan peran penting dalam menjamin ketersediaan konektivitas bagi perangkat IoT di lapangan[7], [35], [36]. Optimalisasi manajemen jaringan melalui analisis time-series pada Big Data memungkinkan pemantauan kinerja infrastruktur secara kontinu untuk mendeteksi anomali atau serangan siber seperti phishing[11], [37], [38]. Penggunaan perangkat seperti Mikrotik dengan fitur firewall filtering dan port knocking menjadi salah satu solusi praktis untuk menjaga keamanan layanan dalam ekosistem platform digital yang kompleks[39]. Pada akhirnya, evolusi sistem kontrol seperti Programmable Logic Controllers (PLC) dan teknologi serat optik akan terus memperkuat efisiensi jaringan masa depan yang mendukung ekosistem industri pintar secara luas.

III. METODE

Studi ini mengadopsi pendekatan metodologis terintegrasi dengan menggabungkan siklus hidup pengembangan sistem (SDLC) dengan pendekatan eksperimental kuantitatif sebagai kerangka kerja utama untuk pengembangan dan validasi sistem. Pemilihan metodologi ini didasarkan pada kebutuhan untuk mengembangkan artefak teknologi yang tidak hanya mampu secara fungsional mengumpulkan dan mengelola data, tetapi juga dilengkapi dengan kemampuan analitis cerdas untuk mendukung pengambilan keputusan strategis otonom. Dengan kata lain, penelitian ini tidak hanya berfokus pada konstruksi sistem tetapi juga menekankan validasi efektivitas sistem dalam memberikan nilai nyata, khususnya di sektor agribisnis.

Pengembangan sistem ini pada dasarnya didasarkan pada arsitektur Bussinness Intelligence (BI) yang dirancang untuk mengintegrasikan data Internet of Things (IoT) secara real-time. Integrasi ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara kondisi lapangan fisik dan kebutuhan analisis bisnis strategis, terutama dalam memproyeksikan profitabilitas keuangan petani. Dengan memanfaatkan pendekatan ini, sistem diharapkan dapat mengubah data sensor mentah menjadi wawasan berharga yang dapat berfungsi sebagai dasar yang andal untuk pengambilan keputusan yang akurat dan responsif dalam kondisi lingkungan yang dinamis.

Proses penelitian dimulai dengan fase perencanaan dan analisis kebutuhan yang komprehesnif. Pada tahap ini, variabel-variabel kritis yang secara signifikan memengaruhi profitabilitas agribisnis diidentifikasi. Variabel-variabel ini meliputi faktor lingkungan seperti intensitas curah hujan, tingkat kelembaban tanah, dan suhu udara, yang semuanya secara langsung memengaruhi pertumbuhan dan hasil panen. Misalnya, curah hujan yang berlebihan dapat merusak tanaman atau menghanyutkan pupuk yang telah diaplikasikan, sehingga mengurangi efektivitasnya. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh tentang variabel-variabel ini sangat penting dalam merancang sistem yang mampu menghasilkan rekomendasi yang tepat dan sesuai konteks.

Table 1: Parameter Data

Kategori Entitas	Atribut Kunci	Deskripsi Fungsi dalam BI
Perangkat IoT	ID Sensor, Koordinat, Status Baterai	Mengidentifikasi sumber data dan lokasi lahan secara presisi.
Data Lingkungan	Intensitas hujan, Kelembaban, Suhu	Varibael input untuk model prediksi curah hujan (Bi-LSTM).
Parameter Bisnis	Biaya Pupuk, Harga Komoditas, Upah Kerja	Dasar kalkulasi finansial untuk proyeksi keuntungan panen.
Konteks Waktu	Timestamp (Real-Time), Durasi Kejadian	Memungkinkan analisis temporal dan respons instan.

Setelah analisis kebutuhan, studi ini dilanjutkan dengan perancangan Model Data Konseptual. Model ini berfungsi sebagai representasi abstrak tentang bagaimana data terstruktur dan saling terkait dalam sistem. Mengingat bahwa data yang dihasilkan IoT pada dasarnya heterogen, berskala besar, dan seringkali tidak terstruktur, model konseptual memainkan peran penting dalam mengatur dan mendefinisikan entitas kunci seperti perangkat sensor, data pengukuran, dan konteks lingkungan. Model ini bertindak sebagai dasar untuk mengubah struktur konseptual menjadi skema basis data fisik yang dioptimalkan dan disesuaikan untuk kebutuhan analitis tingkat lanjut.

Tahap selanjutnya melibatkan akuisisi data dan implementasi infrastruktur IoT di lapangan. Berbagai sensor ditempatkan secara strategis di seluruh area pertanian untuk terus menerus menangkap data lingkungan. Sensor-sensor ini meliputi sensor curah hujan untuk mengukur intensitas presipitasi, sensor kelembaban tanah untuk memantau kondisi lahan, dan sensor suhu untuk mencatat kondisi atmosfer. Data yang dikumpulkan ditransmisikan secara realtime ke server pusat melalui jaringan komunikasi yang dirancang untuk memastikan latensi rendah dan keandalan tinggi.

Untuk mengoptimalkan kegunaan data, pendekatan integrasi data realtime yang memanfaatkan teknologi pemrosesan aliran data diimplementasikan. Teknik ini memungkinkan pemrosesan data yang masuk secara langsung tanpa menunggu akumulasi batch, sehingga memungkinkan sistem untuk merespons perubahan lingkungan dengan cepat.

Sebelum data digunakan untuk tujuan analitis, data tersebut menjalani fase pra-pemrosesan yang ketat. Fase ini mencakup beberapa langkah penting, dimulai dengan pembersihan data, yang menghilangkan nilai yang tidak valid atau tidak konsisten. Selanjutnya, normalisasi data dilakukan untuk menstandarisasi format dan skala, sehingga memfasilitasi analisis yang lebih efisien. Selain itu, deteksi anomali diterapkan untuk mengidentifikasi pola data yang tidak teratur, yang sering disebabkan oleh kerusakan sensor atau kondisi lingkungan yang ekstrem. Tahap pra-pemrosesan ini sangat penting, karena kualitas data masukan secara langsung memengaruhi akurasi hasil analitis dalam sistem BI yang responsif.

Dari segi analisis data, studi ini mengusulkan pendekatan hibrida yang menggabungkan model Bi-Directional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) dengan Causal Machine Learning. Model Bi-LSTM digunakan untuk memproses data deret waktu, khususnya data curah hujan, dengan menangkap ketergantungan temporal maju dan mundur. Kekuatannya terletak pada kemampuannya untuk mengenali pola kompleks dalam data yang menunjukkan ketergantungan jangka panjang.

Prediksi yang dihasilkan oleh model Bi-LSTM kemudian dimasukkan ke dalam model kausal. Tidak seperti pendekatan pembelajaran mesin konvensional yang terutama berfokus pada korelasi, pembelajaran mesin kausal berupaya memahami hubungan sebab-akibat antar variabel. Dalam konteks ini, model kausal menganalisis bagaimana perubahan lingkungan, seperti fluktuasi intensitas curah hujan, memengaruhi metrik keuangan seperti hasil panen dan profitabilitas.

Melalui pendekatan ini, sistem mampu menghasilkan tidak hanya wawasan prediktif tetapi juga rekomendasi preskriptif. Misalnya, sistem dapat secara otomatis mengeluarkan perintah atau saran sebelum peristiwa hujan, seperti mempersiapkan tindakan perlindungan, menyesuaikan sistem irigasi atau drainase, atau menunda kegiatan pemupukan. Kemampuan ini memungkinkan petani untuk mengurangi potensi risiko dan mengoptimalkan produktivitas pertanian serta margin keuntungan. Arsitektur sistem dirancang secara konseptual sebagai model berlapis yang terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan persepsi, lapisan jaringan, dan lapisan aplikasi analitik. Lapisan persepsi bertanggung jawab atas akuisisi data dari sensor, lapisan jaringan menangani transmisi data, dan lapisan aplikasi memproses data dan menghasilkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti.

Di dalam lapisan aplikasi, sistem dilengkapi dengan modul yang berevolusi sendiri yang memungkinkan pembelajaran adaptif dan pemantauan kinerja berkelanjutan.

Table 2: Lapisan dan Komponen

Lapisan (Layer)	Komponen Teknologi	Peran Strategis
Persepsi	Sensor Hujan, Mikrokontroler	Pengumpulan data mentah dari lingkungan fisik lahan.
Jaringan	Protocol MQTT, Gateway IoT	Transmisi data real-time dengan latensi rendah ke server.
Analitik	Bi-LSTM & Causal Machine Learning	Pemrosesan pola cuaca dan analisis sebab-akibat finansial.
Aplikasi	Dashboard BI Interaktif	Visualisasi wawasan dan pemberian rekomendasi preskriptif.

Modul ini secara otomatis mengevaluasi kinerja model dari waktu ke waktu. Jika penurunan akurasi terdeteksi karena perubahan pola data, seperti pergeseran data, sistem memicu proses pelatihan ulang otomatis menggunakan

kumpulan data yang diperbarui. Kemampuan otonom ini memastikan bahwa sistem mempertahankan kinerja tinggi tanpa memerlukan intervensi manual yang sering dari para ahli teknis. Fase terakhir dari metodologi penelitian melibatkan evaluasi dan pengujian sistem.

Keberhasilan sistem diukur menggunakan dua parameter utama: kinerja teknis dan efektivitas bisnis. Kinerja teknis dinilai menggunakan metrik statistik untuk mengevaluasi akurasi prediksi, sedangkan efektivitas bisnis diukur melalui simulasi komparatif antara metode pengambilan keputusan konvensional dan metode yang didukung oleh sistem BI berbasis IoT yang diusulkan dan terintegrasi dengan analisis kausal.

Table 3: Jenis dan Metrik Pengukuran Hasil

Jenis Pengujian	Metrik Pengukuran	Target Keberhasilan
Akurat Prediksi	Mean Absolute Error (MAE)	Meminimalkan selisih antara prediksi hujan dan realitas.
Resiliensi Model	Deteksi Data Drift	Kemampuan sistem mendeteksi penurunan performa secara mandiri.
Otonomi Sistem	Waktu Retraining Otomatis	Kecepatan sistem memperbarui model tanpa intervensi manual.
Dampak Ekonomi	Margin Keuntungan (ROI)	Peningkatan profitabilitas dibandingkan metode konvensional.

Hasil evaluasi diharapkan menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan secara signifikan meningkatkan akurasi proyeksi keuangan dan mengurangi risiko kerugian yang disebabkan oleh faktor lingkungan yang tidak dapat diprediksi. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada kemajuan teknologi informasi tetapi juga memberikan manfaat praktis yang meningkatkan keberlanjutan ekonomi di sektor pertanian. Secara keseluruhan, metodologi yang digunakan dalam penelitian ini dirancang secara sistematis untuk menghasilkan solusi yang inovatif, praktis, dan berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan teknologi IoT, analitik data cerdas, dan inferensi kausal, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem pertanian modern yang lebih adaptif, efisien, dan menguntungkan secara ekonomi.

IV. HASIL

Dinamika industry pertanian modern di era transformasi digital tidak lagi hanya bergantung pada kearifan lokal atau pengamatan manual terhadap fenomena alam. Dengan adopsi besar-besaran teknologi Internet of Things (IoT), aliran data dari lahan pertanian telah menjadi asset strategis yang mendukung pembentukan sistem Bussiness Intelligence (BI) yang responsive. Tantangan mendasar yang dihadapi oleh para pemangku kepentingan agribisnis adalah bagaimana menerjemahkan sinyal teknis dari sensor hujan menjadi estimasi keuntungan finansial yang konkret. Penelitian ini berawa dari kebutuhan mendesak untuk menjembatani kesenjangan antara data lingkungan mentah dan pengambilan Keputusan strategis yang mampu mengurangi kerugian sebelum bencana cuaca terjadi. Dalam ekosistem ini, data bukan hanya catatan Sejarah tetapi juga bahan bakar untuk mesin analitis yang mampu memproyeksikan profitabilitas di tengah ketidakpastian iklim. Fondasi utama sistem ini terletak pada desain Model Data Konseptual yang kuat dan terstandarisasi. Data yang dihasilkan oleh perangkat IoT memiliki karakteristik yang sangat kompleks, termasuk volume besar, kecepatan tinggi, dan berbagai format yang seringkali tidak terstruktur. Tanpa model konseptual yang sistematis, proses pengintegrasian data sensor hujan ke dalam sistem BI akan menghadapi hambatan sinkronisasi yang fatal.

Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pembentukan lapisan abstraksi yang mengidentifikasi entitas kunci seperti intensitas curah hujan, Tingkat kelembaban, dan waktu pengukuran sebelum secara otomatis diubah menjadi skema basis data fisik. Otomatisasi ini sangat penting untuk memastikan konsistensi data dan mengurangi potensi kesalahan manusia dalam merancang sistem penyimpanan optimal untuk kebutuhan analisis bisnis. Setelah fondasi data terbentuk, fokus bergeser ke kemampuan sistem untuk menangani integrasi data secara real time. Dalam konteks persiapan menghadapi kondisi sebelum hujan turun, latensi informasi adalah musuh utama keuntungan petani. Dengan mengambil Pelajaran dari implementasi gudang pintar, keberhasilan sistem cerdas sangat bergantung pada arsitektur yang mampu mengakomodasi aliran data berkecepatan tinggi tanpa menimbulkan hambatan. Sistem yang dikembangkan harus mampu memproses data sensor hujan secara terus menerus dan melakukan visualisasi melalui dasbor interaktif yang mencerminkan kondisi lapangan saat ini.

Visibilitas operasional yang tinggi memungkinkan manajemen untuk mendapatkan gambaran komprehensif tentang dinamika lahan yang sebelumnya sulit dianalisis menggunakan metode konvensional. Lebih lanjut, inti dari inovasi ini adalah penerapan analisis kausalitas yang melampaui prediksi statistik sederhana. Seringkali, model pembelajaran

mesin konvensional hanya menangkap korelasi tanpa memahami hubungan sebab-akibat yang mendalam. Dengan mengintegrasikan Pembelajaran Mesin Kausal, sistem BI ini tidak hanya memberi tahu bahwa hujan akan turun; sistem ini menganalisis mengapa hujan tersebut akan mengurangi keuntungan panen dan apa dampaknya jika Tindakan pencegahan tertentu diambil. Misalnya, sistem dapat mensimulasikan dampak hujan terhadap efektivitas pupuk yang baru saja disebar; jika sistem memprediksi bahwa hujan akan menghanyutkan pupuk, rekomendasi otomatis untuk menunda pemupukan akan dikeluarkan untuk menyelamatkan margin keuntungan.

Ini mewakili pergeseran paradigma dari analisis deskriptif ke analisis preskriptif, memberikan nilai tambah nyata untuk Pengambilan Keputusan Perusahaan. Aspek otonomi sistem merupakan pembeda utama dalam penelitian ini. Lingkungan pertanian adalah ekosistem yang sangat dinamis di mana pola data dapat berubah kapan saja karena anomali iklim, sebuah fenomena yang dikenal sebagai pergeseran data. Jika sistem BI bersifat statis, akurasi prediksi keuntungan akan menurun seiring perubahan kondisi lingkungan. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini mengusulkan kerangka kerja yang mampu melakukan penyesuaian model secara independen. Melalui mekanisme evolusi mandiri, sistem ini dapat mendeteksi penurunan kinerja pada model prediktifnya dan melakukan pelatihan ulang secara otomatis menggunakan data terbaru tanpa memerlukan intervensi manual intensif dari para ahli teknologi. Kemampuan adaptasi ini memastikan bahwa rekomendasi yang diberikan kepada petani tetap relevan dan akurat bahkan dalam kondisi cuaca ekstrem. Kualitas data sensor IoT juga merupakan perhatian penting dalam menjaga keandalan proyeksi keuangan. Sensor hujan yang ditempatkan di lapangan sering menghadapi gangguan fisik, kebisingan, atau kehilangan sinyal yang dapat merusak integritas informasi. Oleh karena itu, pra-pemrosesan yang ketat—termasuk pembersihan data, normalisasi, dan deteksi anomali—harus dilakukan sebelum data digunakan oleh model analitik. Penelitian tentang prediksi curah hujan menggunakan pendekatan Bi-Directional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) menunjukkan bahwa akurasi prediksi sangat dipengaruhi oleh kualitas data deret waktu masukan. Dengan memastikan data masukan berkualitas tinggi, sistem dapat menghasilkan prediksi keuntungan panen dengan tingkat kesalahan minimal, sehingga meningkatkan kepercayaan petani terhadap rekomendasi sistem.

V. PEMBAHASAN

Interpretasi mendalam dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keberhasilan sistem tidak hanya terletak pada akurasi sensor dalam menangkap fenomena curah hujan, tetapi juga pada kemampuan sistem untuk mengubah sinyal biofisik ini menjadi bahasa nilai bisnis yang dipahami oleh manajemen keuangan pertanian. Temuan menunjukkan bahwa pemanfaatan sensor IoT sebagai pemicu utama dalam sistem Business Intelligence (BI) memungkinkan terciptanya lapisan kecerdasan preventif. Dalam kerangka kerja ini, petani tidak lagi bertindak reaktif terhadap bencana, tetapi mampu mengantisipasi dinamika alam secara proaktif sebelum dampak finansial terjadi. Signifikan interpretatif dari temuan ini adalah pergeseran peran teknologi informasi dari sekadar alat pemantauan menjadi pendukung keputusan strategis otonom. Data intensitas curah hujan waktu nyata diproses melalui model konseptual untuk menentukan sejauh mana profitabilitas tanaman akan terganggu jika tindakan pencegahan tidak segera dilakukan.

Secara konseptual, penelitian ini memperkuat teori mengenai pentingnya Model Data Konseptual dalam menyederhanakan kompleksitas data IoT, yang seringkali heterogen, masif, dan tidak terstruktur. Dengan mendefinisikan secara eksplisit entitas seperti perangkat sensor, atribut pengukuran, dan konteks lingkungan, sistem dapat mengubah data mentah menjadi skema basis data optimal untuk analisis BI yang mendalam. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa otomatisasi dalam implementasi model konseptual dapat secara signifikan mengurangi kesalahan manual dan memastikan konsistensi antara desain teknis dan kebutuhan analisis bisnis. Lebih lanjut, hubungan antara hasil penelitian ini dan penggunaan model prediktif berbasis AI menunjukkan bahwa pemrosesan data deret waktu memberikan akurasi yang jauh lebih tinggi daripada model linier konvensional dalam menangkap pola cuaca non-linier. Namun, kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian output prediktif tersebut secara langsung ke dalam kerangka pengambilan keputusan Perusahaan berbasis nilai. Faktor-faktor yang memengaruhi hasil penelitian ini sangat bergantung pada kualitas arsitektur integrasi data waktu nyata. Seperti yang ditemukan dalam studi kasus logistic cerdas, kecepatan aliran data dari perangkat IoT ke sistem analitik menentukan relevansi informasi yang dihasilkan untuk pengguna akhir.

Latensi tinggi dalam transmisi data sensor hujan mengakibatkan penundaan dalam mengambil tindakan pencegahan, yang secara langsung berisiko mengurangi efisiensi biaya operasional dan total keuntungan panen. Fenomena kebisingan atau interferensi pada data sensor yang diperoleh dari lingkungan terbuka juga menimbulkan tantangan teknis yang harus diatasi melalui Teknik pra-pemrosesan yang kuat. Kegagalan membersihkan data dapat menyebabkan bias dalam pengambilan keputusan kausal, yang berdampak negatif pada strategi bisnis. Keunggulan utama penelitian ini dibandingkan dengan pendekatan konvensional terletak pada integrasi model Pembelajaran Mesin Kausal.

Sementara penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada korelasi statistik murni, studi ini mampu secara transparan mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara variabel curah hujan dan metrik keuangan. Kontribusi ini

sangat signifikan dalam mengatasi masalah transparansi kecerdasan buatan, di mana sistem tidak hanya bertindak sebagai “kotak hitam” prediktif tetapi juga mampu menjelaskan penalaran logis di balik rekomendasi tindakan spesifik. Hal ini meningkatkan kepercayaan petani terhadap sistem, karena setiap proyeksi keuntungan yang disajikan didukung oleh logika kausal yang jelas antara kondisi alam, pemanfaatan sumber daya, dan potensi hasil panen. Meskipun demikian, keterbatasan penelitian ini dapat diidentifikasi secara kritis pada sensitivitas model terhadap kualitas data masukan dan kompleksitas pemeliharaan model dalam lingkungan yang sangat dinamis. Perubahan struktur lahan atau pergeseran pola iklim makro yang tidak sepenuhnya ditangkap oleh sensor lokal dapat memengaruhi validitas model yang dibangun, sehingga memerlukan mekanisme pembaruan model secara berkala. Selain itu, pengintegrasian data dari sumber yang heterogeny menimbulkan tantangan dalam hal sinkronisasi dan konsistensi informasi yang dihasilkan.

Kebutuhan akan infrastruktur teknologi yang canggih juga bertindak sebagai kendala implementasi bagi organisasi dengan skala ekonomi yang terbatas. Implikasi teoritis dari penelitian ini adalah pembentukan paradigma baru dalam pengembangan sistem informasi berdasarkan otonomi sistem dan analisis preskriptif di sektor pertanian. Secara praktis, petani sekarang memiliki instrument untuk melakukan simulasi kebijakan yang akurat seperti penjadwalan irigasi atau penundaan pemupukan sebelum keputusan ini diimplementasikan di lapangan. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya tetapi juga secara keseluruhan memperkuat daya saing sektor pertanian di tengah ketidakpastian iklim global. Potensi pengembangan di masa depan sangat besar, terutama dalam mengintegrasikan teknologi komputasi tepi untuk pemrosesan data yang lebih cepat.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merumuskan dan memvalidasi sebuah kerangka kerja operasional yang mentransformasikan paradigma mitigasi risiko di sektor agrikultur melalui integrasi otonom antara ekosistem *Internet of Things* (IoT) dan *Business Intelligence* (BI). Esensi dari temuan ini menegaskan bahwa sinkronisasi antara data fisik lingkungan, khususnya intensitas presipitasi, dengan metrik profitabilitas finansial bukanlah sekadar proses teknis pengolahan data, melainkan sebuah bentuk kecerdasan organisasional yang mampu memitigasi asimetri informasi dalam pengambilan keputusan strategis.

Penggunaan *Conceptual Data Model* terbukti menjadi jembatan krusial dalam mengatasi kompleksitas dan heterogenitas data IoT. Otomatisasi dalam mentransformasikan model konseptual ke dalam skema database fisik memastikan integritas data tetap terjaga, sehingga analisis BI yang dihasilkan memiliki validitas tinggi untuk mendukung keputusan perusahaan. Integrasi algoritma *Bi-Directional Long Short-Term Memory* (Bi-LSTM) mampu memberikan akurasi prediksi curah hujan yang jauh lebih presisi dibandingkan metode konvensional. Lebih lanjut, penerapan *Causal Machine Learning* memberikan keunggulan interpretatif (explainability), di mana sistem mampu menjelaskan hubungan sebab-akibat antara fenomena cuaca dengan fluktuasi margin keuntungan, yang merupakan lompatan besar dari sekadar analisis korelasi statistik.

Arsitektur yang dikembangkan memiliki kemampuan adaptasi mandiri terhadap fenomena *data drift*. Dengan adanya modul pelatihan ulang (*self-retraining*) yang bersifat otomatis, sistem menjamin keberlanjutan performa model prediktif di tengah perubahan pola iklim ekstrem tanpa memerlukan intervensi manual yang kontinu dari pakar teknologi. Penelitian ini membuktikan bahwa strategi mitigasi risiko yang dilakukan pada fase sebelum hujan (pre-rain) melalui rekomendasi preskriptif sistem BI dapat secara signifikan melindungi biaya input (seperti pupuk dan tenaga kerja) dan mengoptimalkan margin keuntungan petani.

Kontribusi Penulis: Anisa Triyana: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan, dan Supervisi, merancang konsep dan metodologi penelitian, serta melakukan penulisan dan penyuntingan akhir naskah.

Aura Illa Sari: Pengumpulan Data, Pra-Pemrosesan Data, Analisis, dan Visualisasi, bertanggung jawab atas pengumpulan data ulasan, pengolahan data teks, pelaksanaan analisis sentimen, serta penyajian hasil dalam bentuk visualisasi.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: https: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] E. Suciana, M. H. Nasrullah, D. A. Christanto, D. Cahyadi, dan L. T. Giantri, “Pemanfaatan IoT untuk Efisiensi Energi pada Pabrik Pintar: Tantangan, Solusi dan Tren Teknologi,” *J. Teknol. Terpadu*, vol. 11, no. 1, hlm. 70–77, Jul 2025, doi: 10.54914/jtt.v11i1.1897.
- [2] Dini Ramdhani dan Pramono Pramono, “Memanfaatkan Kekuatan Ekonomi 5.0: Peluang dan Tantangan untuk Transformasi Bisnis,” *J. Kaji. Dan Penal. Ilmu Manaj.*, vol. 2, no. 2, hlm. 110–123, Apr 2024, doi: 10.59031/jkpim.v2i2.410.
- [3] Z. N. Arafah dan J. Veri, “SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW : "EKOSISTEM NIRKABEL UNTUK KOMPUTASI BERGERAK DAN M-COMMERCE: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS TERHADAP TREN TERKINI, TANTANGAN KRITIS, SERTA PROSPEK INOVASI MASA DEPAN,” *J. Bisnis Kompetitif*, vol. 4, no. 2, hlm. 238–247, Sep 2025, doi: 10.35446/bisniskompetif.v4i2.2428.
- [4] F. P. Eka Putra, . S., A. Ramadhani, dan . M., “Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan,” *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, hlm. 151–163, Jul 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [5] R. Peeriga dkk., “Real-Time Rain Prediction in Agriculture using AI and IoT: A Bi-Directional LSTM Approach,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 4, hlm. 15805–15812, Agu 2024, doi: 10.48084/etasr.8011.
- [6] C. R. Sahara dan A. M. Aamer, “Real-time data integration of an internet-of-things-based smart warehouse: a case study,” *Int. J. Pervasive Comput. Commun.*, vol. 18, no. 5, hlm. 622–644, Nov 2022, doi: 10.1108/IJPC-08-2020-0113.
- [7] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, dan A. Rohman, “Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, hlm. 434–442, Agu 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [8] B. Herdiana, E. B. Setiawan, dan U. Sartoyo, “Tinjauan Komprehensif Evolusi, Aplikasi, dan Tren Masa Depan Programmable Logic Controllers (A Comprehensive Review of the Evolution, Applications, and Future Trends of Programmable Logic Controllers),” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali Dan Elektron. Terap.*, vol. 11, no. 2, hlm. 173–193, Jul 2024, doi: 10.34010/telekontran.v11i2.12896.
- [9] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, dan A. Nuraini, “Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik,” *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, hlm. 931–937, Jan 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [10] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, dan I. S. Maqom, “Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus,” *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, hlm. 996–1001, Feb 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [11] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Zulfikri, G. Arifin, dan R. M. Ilhamsyah, “Analysis of Phishing Attack Trends, Impacts and Prevention Methods: Literature Study,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, hlm. 413–421, Agu 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4357.
- [12] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Yogi Setiawan, Samsul Arifin, dan Wahyu Hidayatullah, “Peran VPN dalam Menjaga Privasi Pengguna Jaringan Publik,” *J. Inform. Dan Tekonologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, hlm. 27–33, Mar 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5834.
- [13] P. Latha dan K. P., “Deep learning model optimization for crop prediction and recommendation using Harris Hawks optimization,” *Environ. Res. Commun.*, vol. 7, no. 4, hlm. 045008, Apr 2025, doi: 10.1088/2515-7620/adc548.
- [14] T. Thenmozhi, G. Anusha, dan P. Monisha, “A Hybrid Approach for Crop Prediction Using Bi-Directional LSTM-RNN,” dalam *2025 6th International Conference for Emerging Technology (INCET)*, BELGAUM, India: IEEE, Mei 2025, hlm. 1–7. doi: 10.1109/INCET64471.2025.11140196.
- [15] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Maktsuful Ghummah, Moh. Amrullah, dan Rafli Hidayatullah, “Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan,” *J. Inform. Dan Tekonologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, hlm. 63–73, Mar 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5895.
- [16] F. P. Eka Putra, I. N. Sudana Degeng, S. Ulfa, dan W. Kamdi, “The Evolution of Quality Education: Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework,” *TEM J.*, hlm. 386–395, Feb 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [17] K. Devapogu, M. Venkatesh, N. Vullam, V. D. Babu, C. R. Naidu, dan A. Lakshmanarao, “A Novel Approach to Farm Weather Prediction with Hybrid CNN, LSTM, and Attention Mechanisms,” dalam *2025 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwalior, India: IEEE, Mar 2025, hlm. 1–7. doi: 10.1109/IATMSI64286.2025.10985213.

- [18] J. E. Plazas *dkk.*, “A Conceptual Data Model and Its Automatic Implementation for IoT-Based Business Intelligence Applications,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 10, hlm. 10719–10732, Okt 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.3016608.
- [19] J. D. Borrero dan J. Mariscal, “A Case Study of a Digital Data Platform for the Agricultural Sector: A Valuable Decision Support System for Small Farmers,” *Agriculture*, vol. 12, no. 6, hlm. 767, Mei 2022, doi: 10.3390/agriculture12060767.
- [20] S. Tiwari *dkk.*, “A smart decision support system to diagnose arrhythmia using ensembled ConvNet and ConvNet-LSTM model,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 213, hlm. 118933, Mar 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118933.
- [21] R. Ali, A. Hussain, S. Nazir, S. Khan, dan H. U. Khan, “Intelligent Decision Support Systems—An Analysis of Machine Learning and Multicriteria Decision-Making Methods,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 22, hlm. 12426, Nov 2023, doi: 10.3390/app132212426.
- [22] A. Yousaf, V. Kayvanfar, A. Mazzoni, dan A. Elomri, “Artificial intelligence-based decision support systems in smart agriculture: Bibliometric analysis for operational insights and future directions,” *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 6, hlm. 1053921, Jan 2023, doi: 10.3389/fsufs.2022.1053921.
- [23] C. A. Gemawaty dan Y. Yuliani, “Perkembangan Teknologi Big Data dalam Sistem Informasi Bisnis: Systematic Literature Review,” *RIGGS J. Artif. Intell. Digit. Bus.*, vol. 4, no. 2, hlm. 5113–5117, Jul 2025, doi: 10.31004/riggs.v4i2.1140.
- [24] A. Manshur, “Satu Data, Big Data dan Analitika Data: Urgensi Pelembagaan, Pembiasaan dan Pembudayaan,” *Bappenas Work. Pap.*, vol. 4, no. 1, hlm. 30–46, Mar 2021, doi: 10.47266/bwp.v4i1.82.
- [25] K. 'Afiifah, Z. F. Azzahra, dan A. D. Anggoro, “Analisis Teknik Entity-Relationship Diagram dalam Perancangan Database Sebuah Literature Review,” *INTECH*, vol. 3, no. 2, hlm. 70–74, Nov 2022, doi: 10.54895/intech.v3i2.1682.
- [26] F. Dalimunthe, A. Maulana, M. P. L. Situmeang, M. R. Alfarisi, dan J. A. Harahap, “Kerangka Konseptual Keamanan Layanan Sistem dalam Ekosistem Platform Digital Multilapis,” *JIKUM J. Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 1, hlm. 65–73, Jan 2026, doi: 10.62671/jikum.v2i1.173.
- [27] V. Kiran Kumar, K. V. Ramesh, dan V. Rakesh, “Optimizing LSTM and Bi-LSTM models for crop yield prediction and comparison of their performance with traditional machine learning techniques,” *Appl. Intell.*, vol. 53, no. 23, hlm. 28291–28309, Des 2023, doi: 10.1007/s10489-023-05005-5.
- [28] A. Joshi *dkk.*, “An explainable Bi-LSTM model for winter wheat yield prediction,” *Front. Plant Sci.*, vol. 15, hlm. 1491493, Jan 2025, doi: 10.3389/fpls.2024.1491493.
- [29] I. B. Ridwan, “Optimizing Enterprise Decision-Making through Causal Machine Learning Models and Real-Time Business Intelligence Integration,” *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 6, no. 5, hlm. 67–88, Mei 2025, doi: 10.55248/gengpi.6.0525.1719.
- [30] N. A. N. P. Ss, R. R, dan K. G. R, “Bi-LSTM Model based Real-time Rainfall Prediction,” dalam *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, Trichy, India: IEEE, Agu 2023, hlm. 1078–1081. doi: 10.1109/ICAISS58487.2023.10250469.
- [31] D. Naidu dan S. K. Chandniha, “Hybrid SARIMA–Bi-LSTM model for monthly rainfall forecasting in the agroclimatic zones of Chhattisgarh,” *J. Agrometeorol.*, vol. 27, no. 3, hlm. 332–337, Sep 2025, doi: 10.54386/jam.v27i3.3010.
- [32] A. Varghese, M. Muraleedharan Sylaja, dan J. Kurian, “Conception and realization of an IoT-enabled deep CNN decision support system for automated arrhythmia classification,” *J. Intell. Syst.*, vol. 31, no. 1, hlm. 407–419, Mar 2022, doi: 10.1515/jisys-2022-0015.
- [33] I. García-Magariño, M. M. Nasralla, dan S. Nazir, “Real-Time Analysis of Online Sources for Supporting Business Intelligence Illustrated with Bitcoin Investments and IoT Smart-Meter Sensors in Smart Cities,” *Electronics*, vol. 9, no. 7, hlm. 1101, Jul 2020, doi: 10.3390/electronics9071101.
- [34] D. K. Roy *dkk.*, “Daily Prediction and Multi-Step Forward Forecasting of Reference Evapotranspiration Using LSTM and Bi-LSTM Models,” *Agronomy*, vol. 12, no. 3, hlm. 594, Feb 2022, doi: 10.3390/agronomy12030594.
- [35] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, dan S. N. R. Barokah, “Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan,” *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, hlm. 903–910, Jan 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [36] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Noviyani Dwi Saputri, Fathur Rosi, dan Rohilia Loati, “Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud,” *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, hlm. 118–125, Mar 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.6099.
- [37] A. Cucus, R. Y. Endra, Y. Aprilinda, dan Y. Y. Dharmawan, “Lapisan Arsitektur Big Data Dalam Kajian Studi Pustaka,” *Explor. Sist. Inf. Dan Telematika*, vol. 12, no. 1, hlm. 22, Jun 2021, doi: 10.36448/jsit.v12i1.1974.

- [38] Zen Munawar dan Novianti Indah Putri, “Keamanan IoT Dengan Deep Learning dan Teknologi Big Data,” *TEMATIK*, vol. 7, no. 2, hlm. 161–185, Des 2020, doi: 10.38204/tematik.v7i2.479.
- [39] H. Khotimah, F. Bimantoro, dan R. S. Kabanga, “Implementasi Security Information And Event Management (SIEM) Pada Aplikasi Sms Center Pemerintah Daerah Provinsi Nusa Tenggara Barat,” *J. Begawe Teknol. Inf. JBegaTI*, vol. 3, no. 2, Sep 2022, doi: 10.29303/jbegati.v3i2.752.