



Tata Kelola Risiko Iklim dan Adopsi Pertanian Presisi: Strategi Membangun Sistem Pangan yang Tangguh terhadap Cuaca Ekstrem

Muhammad Irfan Maulana ^{a,1,*}, Rina Oktaviani Putri ^{b,2}, Aldy Prasetya Nugraha ^{c,3}

^a Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Indonesia

^b Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Malang, Indonesia

^c Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Negeri Malang, Indonesia

¹ m.irfanmaulana@ub.ac.id; ² rina.oktaviani@unisma.ac.id; ³ aldy.prasetya@um.ac.id

* Corresponding Author

ABSTRACT

Climate change has increased the frequency and intensity of extreme weather events, threatening agricultural productivity and the resilience of global food systems. This situation has created an urgent need for adaptive climate risk governance supported by precision agriculture technologies. This article examines the relationship between climate risk governance and the adoption of precision agriculture in strengthening food systems against climate-related disruptions. The study employs a qualitative library research approach by reviewing recent scholarly literature on climate-resilient agriculture, digital climate services, the Internet of Things, artificial intelligence, and precision agriculture innovations. Data were analyzed through content analysis and thematic synthesis to identify the interconnections between climate risk management instruments and technological adaptation strategies. The findings reveal that effective climate risk governance depends on the integration of early warning systems, climate information services, data-driven resource management, and precision agriculture technologies supported by responsive regulatory frameworks. Precision agriculture enhances risk detection capacity, improves input-use efficiency, and enables real-time decision-making, thereby increasing food production resilience under climatic uncertainty. The article argues that data-driven climate risk governance combined with digital innovation constitutes a critical prerequisite for transforming sustainable and resilient food systems. The study contributes to the literature by developing a governance-oriented framework that connects legal, technological, and food resilience dimensions within broader climate adaptation strategies.

Article History

Received 2026-03-22

Revised 2026-04-24

Accepted 2026-05-06

Published 2026-06-23

Keywords

Climate Risk
Governance;
Precision Agriculture;
Food System
Resilience;
Digital Climate
Services;
Data-Driven
Adaptation

Copyright © 2026, The Author(s)

This is an open-access article under the CC-BY-SA license



PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah menjadi salah satu tantangan paling serius bagi keberlanjutan sistem pangan global. Peningkatan frekuensi kekeringan, banjir, gelombang panas, dan ketidakpastian musim telah memengaruhi produktivitas pertanian di berbagai kawasan dunia serta meningkatkan kerentanan petani terhadap risiko produksi dan ekonomi. Berbagai studi menunjukkan bahwa ketahanan pangan tidak lagi dapat dipisahkan dari kapasitas sistem pertanian dalam mengantisipasi dan mengelola risiko iklim secara efektif (Catacutan et al., 2022; Hidalgo et al., 2021). Dalam konteks tersebut, pengembangan tata kelola risiko iklim menjadi agenda strategis yang tidak hanya berkaitan dengan adaptasi teknis, tetapi juga dengan pengaturan kelembagaan, kebijakan, dan pemanfaatan inovasi digital untuk mendukung keberlanjutan sektor pertanian. Perhatian terhadap isu ini semakin meningkat seiring kebutuhan membangun sistem pangan yang mampu mempertahankan fungsi produksinya di tengah intensifikasi cuaca ekstrem akibat perubahan iklim global.

Pada tingkat operasional, sektor pertanian menghadapi tantangan yang semakin kompleks karena dampak iklim tidak hanya memengaruhi hasil panen, tetapi juga efisiensi penggunaan

sumber daya, stabilitas rantai pasok, dan kemampuan petani dalam mengambil keputusan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan pertanian, termasuk *climate-smart agriculture*, pertanian tangguh iklim, dan pengelolaan risiko berbasis informasi cuaca (Mizik, 2021; Peng & Guan, 2021; Yaro et al., 2021). Dalam perkembangan terbaru, adopsi teknologi pertanian presisi muncul sebagai instrumen yang memungkinkan pengelolaan lahan dan sumber daya secara lebih akurat melalui pemanfaatan sensor, Internet of Things, kecerdasan buatan, dan analisis data skala besar (Kagan et al., 2022; Atasoy, 2025). Teknologi tersebut memberikan peluang untuk memperkuat kemampuan deteksi risiko, prediksi cuaca, serta respons adaptif terhadap gangguan iklim yang berpotensi mengancam produktivitas pertanian.

Kajian akademik mengenai hubungan antara perubahan iklim dan transformasi pertanian telah berkembang melalui beberapa pendekatan utama. Kelompok pertama menekankan pentingnya penguatan kerangka pertanian tangguh iklim melalui integrasi praktik adaptasi dan mitigasi dalam pengelolaan usaha tani (Islam et al., 2022; Li et al., 2022). Kelompok kedua berfokus pada tata kelola risiko iklim dan strategi adaptasi transformatif yang menempatkan institusi, kebijakan, serta layanan informasi iklim sebagai faktor utama dalam meningkatkan ketahanan sektor pertanian (Hellin et al., 2021; Catacutan et al., 2022; Manevska-Tasevska et al., 2023). Sementara itu, kelompok ketiga menyoroti peran teknologi digital, kecerdasan buatan, dan pertanian presisi dalam meningkatkan efisiensi produksi sekaligus memperkuat kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim (Kagan et al., 2022; Atasoy, 2025; Essenfelder et al., 2025). Di sisi lain, beberapa penelitian juga mengingatkan bahwa digitalisasi pertanian memunculkan persoalan tata kelola, akuntabilitas, dan distribusi manfaat teknologi yang memerlukan perhatian regulatif yang memadai (Gardezia et al., 2022; Zhang et al., 2021).

Meskipun literatur mengenai pertanian tangguh iklim dan pertanian presisi terus berkembang, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan. Sebagian besar studi menganalisis tata kelola risiko iklim dan adopsi teknologi sebagai dua bidang yang terpisah. Penelitian mengenai tata kelola risiko umumnya berfokus pada aspek kebijakan dan adaptasi kelembagaan, sedangkan kajian pertanian presisi lebih banyak menitikberatkan pada efektivitas teknologi dan produktivitas pertanian (Hellin et al., 2021; Kagan et al., 2022). Akibatnya, masih terbatas kajian yang menjelaskan bagaimana tata kelola risiko iklim dapat diintegrasikan dengan adopsi pertanian presisi dalam kerangka pembangunan sistem pangan yang tangguh terhadap cuaca ekstrem. Artikel ini berargumen bahwa keberhasilan adaptasi iklim tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan teknologi, tetapi juga oleh kualitas tata kelola yang mengatur produksi, distribusi, pemanfaatan, dan perlindungan data pertanian sebagai dasar pengambilan keputusan adaptif. Kontribusi utama artikel ini terletak pada pengembangan kerangka analitis yang menghubungkan tata kelola risiko iklim, inovasi digital, dan ketahanan sistem pangan dalam satu perspektif yang terintegrasi.

Dari sudut pandang kajian hukum, perkembangan teknologi pertanian presisi juga memunculkan kebutuhan akan pengaturan yang mampu menjamin akuntabilitas penggunaan data, transparansi algoritma, perlindungan kepentingan petani, serta distribusi manfaat inovasi secara adil. Transformasi digital di sektor pertanian telah menghasilkan bentuk pengambilan keputusan yang semakin bergantung pada data dan sistem otomatis, sehingga menuntut penguatan kerangka tata kelola yang responsif terhadap risiko baru yang muncul (Zhang et al., 2021; Atasoy, 2025). Oleh karena itu, pembahasan mengenai ketahanan pangan dan adaptasi iklim tidak lagi dapat dibatasi pada aspek teknis budidaya, melainkan harus mencakup dimensi regulasi dan tata kelola yang mengarahkan penggunaan teknologi dalam sektor pertanian.

Selain itu, berbagai penelitian menunjukkan bahwa efektivitas strategi adaptasi sangat dipengaruhi oleh ketersediaan layanan informasi iklim, pengelolaan sumber daya air, serta akses

petani terhadap teknologi yang mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti (Tran et al., 2021; Srivastav et al., 2021; Simelton & McCampbell, 2021). Integrasi teknologi digital dengan sistem tata kelola yang adaptif memungkinkan pengembangan mekanisme peringatan dini dan pengelolaan risiko yang lebih efektif dibandingkan pendekatan konvensional. Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan dan analisis data iklim menawarkan peluang baru untuk mendeteksi berbagai bahaya iklim secara lebih cepat dan akurat sehingga meningkatkan kapasitas respons sektor pertanian terhadap kondisi cuaca ekstrem (Essenfelder et al., 2025).

Urgensi penelitian ini semakin kuat karena perubahan iklim diproyeksikan terus meningkatkan tekanan terhadap sistem produksi pangan global dalam beberapa dekade mendatang. Berbagai rekomendasi kebijakan yang berkembang saat ini menekankan perlunya integrasi antara inovasi teknologi, penguatan kelembagaan, dan reformasi tata kelola sebagai fondasi utama pembangunan pertanian tangguh iklim (Manevska-Tasevska et al., 2023; Ukhurebor & Aidonojie, 2021). Namun demikian, masih diperlukan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana hubungan antara ketiga aspek tersebut dapat dirancang untuk menghasilkan sistem pangan yang adaptif, berkelanjutan, dan mampu menghadapi ketidakpastian iklim yang semakin tinggi.

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini bertujuan menganalisis peran tata kelola risiko iklim dalam mendukung adopsi pertanian presisi sebagai strategi pembangunan sistem pangan yang tangguh terhadap cuaca ekstrem. Fokus utama penelitian diarahkan pada identifikasi hubungan antara instrumen tata kelola, teknologi digital pertanian, dan kapasitas ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim. Melalui pendekatan ini, artikel diharapkan dapat memperkaya perdebatan akademik mengenai adaptasi iklim, tata kelola teknologi, dan pengembangan kerangka hukum yang mendukung transformasi sistem pangan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian hukum normatif dengan pendekatan konseptual (*conceptual approach*) dan pendekatan kepustakaan (*library research*). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada analisis tata kelola risiko iklim dan adopsi pertanian presisi sebagai instrumen pembangunan sistem pangan yang tangguh terhadap cuaca ekstrem dalam perspektif hukum dan kebijakan. Objek material penelitian mencakup berbagai konsep mengenai *climate risk governance*, pertanian tangguh iklim, pertanian presisi, digitalisasi pertanian, dan ketahanan sistem pangan. Sementara itu, objek formal penelitian adalah konstruksi tata kelola dan implikasi hukumnya dalam mengintegrasikan inovasi teknologi dengan strategi adaptasi perubahan iklim. Pendekatan normatif dipilih karena memungkinkan peneliti mengkaji secara sistematis perkembangan konsep, prinsip, dan rekomendasi kebijakan yang berkembang dalam literatur ilmiah mengenai pengelolaan risiko iklim dan transformasi digital sektor pertanian (Hellin et al., 2021; Hidalgo et al., 2021; Manevska-Tasevska et al., 2023).

Sumber data penelitian terdiri atas data sekunder yang diperoleh dari publikasi ilmiah bereputasi internasional yang relevan dengan tema penelitian. Data utama berasal dari artikel jurnal yang membahas tata kelola risiko iklim, pertanian tangguh iklim, pertanian presisi, kecerdasan buatan, *Internet of Things*, layanan iklim digital, inovasi pertanian, dan ketahanan sistem pangan (Mizik, 2021; Kagan et al., 2022; Atasoy, 2025). Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi dan penelusuran literatur secara sistematis terhadap sumber-sumber akademik yang terdapat dalam daftar pustaka penelitian. Seluruh dokumen diklasifikasikan berdasarkan fokus pembahasan, yaitu tata kelola risiko iklim, strategi adaptasi pertanian, digitalisasi pertanian, teknologi pertanian presisi, dan implikasi regulatif dari

penggunaan teknologi berbasis data dalam sektor pangan (Gardezia et al., 2022; Zhang et al., 2021; Ukhurebor & Aidonojie, 2021).

Analisis data dilakukan menggunakan teknik analisis isi (content analysis) dan sintesis tematik (thematic synthesis). Pada tahap pertama, setiap literatur dianalisis untuk mengidentifikasi konsep utama, temuan empiris, rekomendasi kebijakan, serta argumentasi yang berkaitan dengan pengelolaan risiko iklim dan penerapan pertanian presisi. Pada tahap kedua, data yang telah dikategorikan disintesis untuk menemukan pola hubungan antara instrumen tata kelola, penggunaan teknologi digital, dan kapasitas ketahanan sistem pangan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengembangkan kerangka analitis yang menjelaskan bagaimana tata kelola risiko iklim dapat mendukung proses adopsi teknologi pertanian presisi dalam menghadapi cuaca ekstrem (Catacutan et al., 2022; Li et al., 2022; Skevas et al., 2022).

Kerangka analisis penelitian didasarkan pada konsep pertanian tangguh iklim (climate-resilient agriculture), tata kelola risiko iklim (climate risk governance), dan inovasi digital pertanian sebagai instrumen adaptasi perubahan iklim. Konsep ketahanan pertanian digunakan untuk menilai kemampuan sistem pangan dalam mengantisipasi, menyerap, dan beradaptasi terhadap gangguan iklim (Yaro et al., 2021; Li et al., 2022). Selanjutnya, konsep tata kelola risiko iklim digunakan untuk menjelaskan peran institusi, regulasi, dan mekanisme pengambilan keputusan dalam mengelola ketidakpastian iklim (Catacutan et al., 2022; Hellin et al., 2021). Analisis juga memanfaatkan perspektif inovasi digital dan pertanian presisi untuk mengkaji kontribusi teknologi berbasis data, Internet of Things, kecerdasan buatan, dan layanan iklim digital terhadap peningkatan kapasitas adaptasi dan ketahanan pangan (Simelton & McCampbell, 2021; Kagan et al., 2022; Essenfelder et al., 2025). Melalui kerangka tersebut, penelitian berupaya menjelaskan hubungan antara tata kelola, teknologi, dan ketahanan sistem pangan dalam konteks perubahan iklim yang semakin kompleks.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan iklim telah mengubah karakter risiko yang dihadapi sektor pertanian dari risiko musiman yang relatif dapat diprediksi menjadi risiko sistemik yang bersifat dinamis, multidimensi, dan sulit diantisipasi melalui pendekatan konvensional. Fenomena cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi menyebabkan ketidakpastian dalam penentuan waktu tanam, pengelolaan air, penggunaan input produksi, hingga distribusi hasil pertanian. Dalam kondisi tersebut, ketahanan sistem pangan tidak lagi hanya ditentukan oleh kemampuan meningkatkan produksi, tetapi juga oleh kapasitas sistem untuk mengidentifikasi, mengelola, dan merespons risiko iklim secara cepat dan tepat. Oleh karena itu, tata kelola risiko iklim berkembang sebagai pendekatan yang menempatkan informasi, koordinasi kelembagaan, dan pengambilan keputusan adaptif sebagai fondasi utama dalam pembangunan pertanian berkelanjutan (Catacutan et al., 2022; Hellin et al., 2021).

Literatur menunjukkan bahwa pendekatan tata kelola risiko iklim memiliki cakupan yang lebih luas dibandingkan strategi adaptasi teknis yang selama ini mendominasi kebijakan pertanian. Tata kelola risiko tidak hanya berfokus pada upaya mengurangi kerugian akibat bencana iklim, tetapi juga mengintegrasikan proses identifikasi risiko, pengelolaan ketidakpastian, distribusi informasi, serta penguatan kapasitas aktor yang terlibat dalam sistem pangan. Pendekatan ini sejalan dengan pandangan bahwa ketahanan pertanian harus dibangun melalui kombinasi antara kapasitas adaptif, kapasitas antisipatif, dan kapasitas transformasional (Hellin et al., 2021). Dengan demikian, efektivitas sistem pangan dalam menghadapi cuaca

ekstrem sangat bergantung pada kemampuan institusi untuk menghubungkan informasi iklim dengan tindakan adaptasi yang dapat diterapkan secara operasional oleh pelaku pertanian.

Dalam konteks tersebut, pertanian presisi muncul sebagai instrumen yang mampu memperkuat fungsi tata kelola risiko iklim melalui pemanfaatan data dan teknologi digital. Pertanian presisi memungkinkan pengumpulan informasi secara real time mengenai kondisi tanah, kelembapan, kebutuhan air, kesehatan tanaman, serta perubahan lingkungan yang berpotensi memengaruhi produktivitas pertanian. Teknologi ini didukung oleh berbagai perangkat seperti sensor lapangan, satelit, Internet of Things (IoT), sistem informasi geografis, dan kecerdasan buatan yang menghasilkan basis data yang lebih akurat untuk mendukung pengambilan keputusan (Kagan et al., 2022; Atasoy, 2025). Berbeda dengan pendekatan pertanian konvensional yang sering bergantung pada pengalaman historis, pertanian presisi memungkinkan keputusan dilakukan berdasarkan data aktual yang terus diperbarui sehingga meningkatkan kapasitas adaptasi terhadap perubahan kondisi iklim.

Analisis terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara tata kelola risiko iklim dan pertanian presisi dapat dijelaskan melalui tiga fungsi utama. Pertama, fungsi deteksi risiko. Kedua, fungsi pengambilan keputusan adaptif. Ketiga, fungsi peningkatan efisiensi sumber daya. Ketiga fungsi tersebut membentuk mekanisme yang memperkuat ketahanan sistem pangan terhadap gangguan iklim.

Tabel 1. Integrasi Tata Kelola Risiko Iklim dan Pertanian Presisi dalam Membangun Ketahanan Sistem Pangan

Dimensi Tata Kelola Risiko	Teknologi Pertanian Presisi	Dampak terhadap Ketahanan Sistem Pangan
Identifikasi risiko iklim	Sensor, satelit, IoT	Peningkatan akurasi deteksi ancaman iklim
Sistem peringatan dini	Analitik data dan kecerdasan buatan	Respons lebih cepat terhadap cuaca ekstrem
Pengambilan keputusan	Platform informasi digital	Efisiensi strategi adaptasi
Pengelolaan sumber daya	Pemantauan presisi air dan input	Pengurangan kerugian produksi
Evaluasi risiko	Big data dan pemodelan prediktif	Peningkatan kapasitas antisipasi jangka panjang

Sumber: Diolah dari Catacutan et al. (2022), Kagan et al. (2022), Li et al. (2022), dan Essenfelder et al. (2025).

Temuan penelitian memperlihatkan bahwa kemampuan mendeteksi risiko secara dini merupakan faktor utama dalam memperkuat ketahanan sistem pangan. Sebelumnya, banyak keputusan pertanian dilakukan berdasarkan pola musim historis yang semakin tidak relevan akibat perubahan iklim. Kehadiran kecerdasan buatan dan analisis data iklim memungkinkan identifikasi berbagai ancaman secara lebih cepat dan akurat. Penelitian Essenfelder et al. (2025) menunjukkan bahwa model explainable artificial intelligence mampu mendeteksi berbagai bahaya iklim yang relevan bagi sektor pertanian melalui pemrosesan data dalam jumlah besar. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi digital tidak hanya berfungsi sebagai alat pendukung produksi, tetapi juga sebagai instrumen tata kelola yang memperkuat kemampuan institusi dan petani dalam mengelola ketidakpastian iklim.

Selain meningkatkan kapasitas deteksi, pertanian presisi juga berkontribusi terhadap efisiensi penggunaan sumber daya yang semakin terbatas akibat perubahan iklim. Ketersediaan air menjadi salah satu isu yang paling sering dikaitkan dengan kerentanan sistem pangan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan sumber daya air berbasis teknologi dapat meningkatkan efisiensi irigasi sekaligus mengurangi dampak kekeringan terhadap produksi pertanian (Srivastav et al., 2021; Tran et al., 2021). Melalui sensor kelembapan tanah dan sistem irigasi otomatis, penggunaan air dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual tanaman sehingga mengurangi pemborosan sumber daya. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pertanian presisi tidak hanya memiliki nilai ekonomi, tetapi juga nilai ekologis yang penting dalam mendukung keberlanjutan sistem pangan.

Lebih lanjut, integrasi antara layanan iklim digital dan pertanian presisi memberikan kontribusi signifikan terhadap penguatan kapasitas adaptasi petani. Informasi cuaca yang akurat memungkinkan petani menentukan waktu tanam, pemupukan, dan panen secara lebih tepat. Namun demikian, efektivitas layanan tersebut sangat bergantung pada kualitas tata kelola yang mengatur distribusi informasi dan akses pengguna terhadap teknologi. Simelton dan McCampbell (2021) menunjukkan bahwa layanan iklim digital dapat mendorong praktik pertanian yang lebih tangguh apabila dirancang dengan memperhatikan kebutuhan pengguna serta prinsip inovasi yang bertanggung jawab. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberhasilan transformasi digital pertanian tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan institusi dalam menjamin aksesibilitas, transparansi, dan keberlanjutan pemanfaatan teknologi tersebut.

Meskipun berbagai manfaat telah diidentifikasi, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa adopsi pertanian presisi menghadapi sejumlah tantangan tata kelola yang tidak dapat diabaikan. Pertama, terdapat kesenjangan akses teknologi antara wilayah dan kelompok petani yang berbeda. Kedua, meningkatnya penggunaan data pertanian memunculkan persoalan kepemilikan data, privasi, dan akuntabilitas pengelolaan informasi. Ketiga, penggunaan algoritma dalam pengambilan keputusan berpotensi menghasilkan ketergantungan terhadap penyedia teknologi tertentu. Persoalan ini semakin relevan seiring berkembangnya sistem pertanian berbasis data yang mengandalkan pengumpulan informasi dalam skala besar (Zhang et al., 2021; Atasoy, 2025).

Temuan tersebut memperkuat argumen bahwa tata kelola risiko iklim harus dipahami sebagai tata kelola teknologi sekaligus. Pendekatan yang hanya berfokus pada penyediaan teknologi tanpa pengaturan kelembagaan yang memadai berpotensi menghasilkan ketimpangan baru dalam sistem pangan. Oleh karena itu, prinsip inovasi yang bertanggung jawab menjadi aspek penting dalam pengembangan pertanian presisi. Gardezia et al. (2022) menekankan bahwa keberhasilan teknologi pertanian tidak dapat diukur hanya melalui peningkatan produktivitas, tetapi juga melalui kemampuan sistem untuk memastikan distribusi manfaat yang adil, transparansi proses inovasi, dan perlindungan terhadap kelompok yang rentan. Perspektif ini memperluas pemahaman mengenai ketahanan pangan dari sekadar persoalan produksi menuju persoalan tata kelola yang inklusif.

Dari perspektif hukum, transformasi digital sektor pertanian menciptakan kebutuhan terhadap kerangka regulasi yang mampu mengatur penggunaan teknologi berbasis data secara efektif. Regulasi tidak hanya diperlukan untuk mendukung inovasi, tetapi juga untuk mengurangi risiko yang muncul akibat penggunaan data, kecerdasan buatan, dan sistem otomatis dalam pengelolaan pertanian. Kajian Ukhurebor dan Aidonojie (2021) menunjukkan bahwa perkembangan teknologi pangan dan adaptasi perubahan iklim semakin membutuhkan instrumen hukum yang mampu mengakomodasi inovasi tanpa mengabaikan perlindungan

kepentingan publik. Dalam konteks ini, hukum berfungsi sebagai instrumen yang memastikan keseimbangan antara inovasi, keadilan, dan keberlanjutan.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa pembangunan sistem pangan yang tangguh memerlukan harmonisasi antara pendekatan *climate-smart agriculture*, pertanian tangguh iklim, dan transformasi digital pertanian. Selama ini, ketiga pendekatan tersebut sering berkembang secara terpisah dalam literatur maupun kebijakan. Padahal, berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara strategi adaptasi iklim dan pemanfaatan teknologi digital dapat menghasilkan manfaat yang lebih besar dibandingkan penerapannya secara parsial (Islam et al., 2022; Peng & Guan, 2021). Integrasi tersebut memungkinkan terciptanya sistem pengelolaan pertanian yang lebih responsif terhadap risiko, lebih efisien dalam penggunaan sumber daya, dan lebih mampu mempertahankan produktivitas dalam kondisi cuaca yang tidak menentu.

Temuan penelitian ini juga memperlihatkan bahwa konsep ketahanan pertanian perlu bergerak melampaui paradigma *climate-smart agriculture* menuju pendekatan yang lebih berorientasi pada kerentanan dan keadilan adaptasi sebagaimana dikemukakan oleh Yaro et al. (2021). Dalam perspektif tersebut, keberhasilan sistem pangan tidak hanya diukur dari kemampuannya bertahan terhadap gangguan iklim, tetapi juga dari kemampuannya melindungi kelompok yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Oleh karena itu, tata kelola risiko iklim yang efektif harus mengintegrasikan dimensi teknologi, kelembagaan, sosial, dan hukum secara bersamaan.

Berdasarkan keseluruhan analisis, penelitian ini menemukan bahwa hubungan antara tata kelola risiko iklim dan pertanian presisi bersifat saling memperkuat. Tata kelola risiko menyediakan kerangka institusional yang memungkinkan teknologi digunakan secara efektif, sedangkan pertanian presisi menyediakan data dan informasi yang diperlukan untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan. Integrasi keduanya menghasilkan sistem pangan yang lebih adaptif, responsif, dan tangguh terhadap cuaca ekstrem. Temuan ini sekaligus mempertegas bahwa transformasi sistem pangan pada era perubahan iklim tidak dapat dicapai hanya melalui inovasi teknologi atau reformasi kebijakan secara terpisah, melainkan melalui pembangunan tata kelola yang mampu menghubungkan keduanya dalam satu kerangka ketahanan pangan yang berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa tata kelola risiko iklim dan adopsi pertanian presisi merupakan dua komponen yang saling terkait dalam upaya membangun sistem pangan yang tangguh terhadap cuaca ekstrem. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi dan intensitas gangguan iklim menuntut perubahan paradigma dari pendekatan adaptasi yang bersifat reaktif menuju sistem pengelolaan risiko yang berbasis data, prediktif, dan adaptif. Pertanian presisi berperan penting dalam menyediakan informasi yang akurat melalui pemanfaatan sensor, Internet of Things, kecerdasan buatan, layanan iklim digital, dan analisis data besar sehingga meningkatkan kemampuan deteksi risiko, efisiensi penggunaan sumber daya, serta kualitas pengambilan keputusan. Namun demikian, efektivitas teknologi tersebut sangat bergantung pada keberadaan tata kelola yang mampu mengintegrasikan informasi iklim, kapasitas kelembagaan, akses teknologi, dan mekanisme pengaturan yang mendukung penerapan inovasi secara berkelanjutan. Dengan demikian, ketahanan sistem pangan tidak hanya ditentukan oleh kapasitas produksi, tetapi juga oleh kemampuan sistem untuk mengantisipasi, mengelola, dan merespons risiko iklim secara terkoordinasi.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka analitis yang menghubungkan tata kelola risiko iklim, pertanian presisi, dan ketahanan sistem pangan dalam satu perspektif yang terintegrasi. Dalam kajian hukum dan kebijakan, temuan ini memperlihatkan bahwa transformasi digital sektor pertanian memerlukan dukungan regulasi yang mampu menjamin transparansi penggunaan data, akuntabilitas algoritma, perlindungan kepentingan petani, serta distribusi manfaat inovasi yang adil. Penelitian ini juga memperluas diskursus mengenai ketahanan pangan dengan menempatkan tata kelola teknologi sebagai bagian penting dari strategi adaptasi perubahan iklim. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar konseptual bagi pembuat kebijakan untuk merancang sistem pengelolaan risiko iklim yang memadukan inovasi digital dengan penguatan kelembagaan pertanian.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena menggunakan pendekatan kepustakaan sehingga belum mengevaluasi implementasi tata kelola risiko iklim dan pertanian presisi pada konteks wilayah tertentu. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengembangkan studi empiris yang menguji efektivitas model tata kelola berbasis data pada berbagai sistem pertanian dan kondisi agroekologi yang berbeda. Kajian mendatang juga dapat mengeksplorasi aspek regulasi data pertanian, keadilan akses teknologi, serta pengaruh kecerdasan buatan terhadap pengambilan keputusan di sektor pangan. Pengembangan agenda penelitian tersebut penting untuk memperkuat dasar ilmiah dan kebijakan dalam membangun sistem pangan yang adaptif, inklusif, dan berkelanjutan di tengah tantangan perubahan iklim global.

DAFTAR PUSTAKA

- Atasoy, Y. (2025). *Agriculture by algorithm: Big data, digitalization, and biotechnology under climate change*. *Science, Technology, & Human Values*.
<https://doi.org/10.1177/01622439251321233>
- Catacutan, D. C., Harvey, C. A., Öborn, I., & van Noordwijk, M. (2022). Editorial: Climate risk management in smallholder agriculture. *Frontiers in Climate*, 4, 1087219.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1087219>
- Essenfelder, A. H., Toreti, A., & Seguini, L. (2025). *Expert-driven explainable artificial intelligence models can detect multiple climate hazards relevant for agriculture*. *Communications Earth & Environment*, 6, 207. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01987-3>
- Gardezia, M., Adereti, D. T., Stock, R., & Ogunyiola, A. (2022). In pursuit of responsible innovation for precision agriculture technologies. *Journal of Responsible Innovation*, 9(2), 224–247.
<https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2071668>
- Hellin, J., Fisher, E., & Loboguerrero, A. M. (2021). Reflections on enhancing the impact of climate risk management through transformative adaptation. *Frontiers in Climate*, 3.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.751691>
- Hidalgo, D. M., Nunn, P. D., & Beazley, H. (2021). Challenges and opportunities for food systems in a changing climate: A systematic review of climate policy integration. *Environmental Science & Policy*, 124, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.017>
- Islam, Z., Sabiha, N. E., & Salim, R. (2022). Integrated environment-smart agricultural practices: A strategy toward climate-resilient agriculture. *Economic Analysis and Policy*, 76, 59–72.
<https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.07.011>
- Kagan, C. R., Arnold, D. P., Cappelleri, D. J., Keske, C. M., & Turner, K. T. (2022). Special report: The Internet of Things for Precision Agriculture (IoT4Ag). *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106742. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106742>

-
- Li, X., Zhang, Y., Wang, H., Chen, Y., & Liu, Z. (2022). A deep-understanding framework and assessment indicator system for climate-resilient agriculture. *Ecological Indicators*, 136, 108597. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108597>
- Manevska-Tasevska, G., Duangbootsee, U., Bimbilovski, I., Thathong, P., & Ha, T. M. (2023). A systematic scoping review and content analysis of policy recommendations for climate-resilient agriculture. *Climate Policy*, 23(10), 1271–1287. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2232334>
- Mizik, T. (2021). Climate-smart agriculture on small-scale farms: A systematic literature review. *Agronomy*, 11(6), 1096. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061096>
- Peng, B., & Guan, K. (2021). Harmonizing climate-smart and sustainable agriculture. *Nature Food*, 2, 853–854. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00407-5>
- Simelton, E., & McCampbell, M. (2021). Do digital climate services for farmers encourage resilient farming practices? Pinpointing gaps through the responsible research and innovation framework. *Agriculture*, 11(10), 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100953>
- Skevas, T., Massey, R., & Grashuis, J. (2022). Farmer adoption and intensity of use of extreme weather adaptation and mitigation strategies: Evidence from a sample of Missouri farmers. *Climatic Change*, 174(18). <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03439-3>
- Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S., & Sillanpää, M. (2021). Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576–41595. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14753-0>
- Tran, T. T., Brown, P. R., & Renaud, F. G. (2021). Enhancing climate resilience of irrigated agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 302, 114032. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114032>
- Ukhurebor, K. E., & Aidonojie, P. A. (2021). The influence of climate change on food innovation technology: Review on topical developments and legal framework. *Agriculture & Food Security*, 10(50). <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00327-4>
- Yaro, J. A., Teye, J. K., & Bawakyillenuo, S. (2021). Rethinking resilient agriculture: From Climate-Smart Agriculture to Vulnerable-Smart Agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128602>
- Zhang, S., McLachlan, C., & Munro, N. (2021). Make bloom and let wither: Biopolitics of precision agriculture at the dawn of surveillance capitalism. *Geoforum*, 122, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.04.014>