



Teknologi Pertanian dan Transformasi Sistem Pangan Global

Oleh: Rudy C Tarumingkeng

Oleh:

[Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD](#)

Professor of Management NUP: 9903252922

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan
Rektor, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari)

Coordinator, CIDA/DIKTI SFU Burnaby BC Canada 1988-1991

Rektor, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Ketua Dewan Guru Besar, IPB-University, Bogor (2005-2006)

AI - Data Analyst, dan Ketua Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyct75@gmail.com

11 Maret 2026

TEKNOLOGI PERTANIAN DAN TRANSFORMASI SISTEM PANGAN GLOBAL

1. Pendahuluan

Teknologi pertanian pada abad ke-21 tidak lagi dapat dipahami sekadar sebagai alat bantu untuk mempercepat kerja petani di lahan. Ia telah berkembang menjadi kekuatan transformasional yang mengubah cara dunia memproduksi, memproses, mendistribusikan, membiayai, memantau, dan mengonsumsi pangan. Di masa lalu, pembicaraan tentang teknologi pertanian sering berkisar pada mekanisasi dasar, pupuk, benih unggul, dan irigasi. Kini cakupannya jauh lebih luas: sensor lapangan, satelit, drone, Internet of Things, kecerdasan buatan, komputasi awan, bioteknologi, sistem peringatan dini iklim, platform digital untuk pembiayaan dan pemasaran, hingga teknologi penelusuran rantai pasok. Perubahan ini terjadi karena sistem pangan global menghadapi tekanan yang semakin kompleks: pertumbuhan penduduk, perubahan iklim, degradasi lahan, volatilitas harga, konflik, dan tuntutan akan pangan yang lebih sehat serta lebih berkelanjutan. FAO menegaskan bahwa sistem yang memberi makan manusia sudah “overdue for an upgrade”, sementara World Bank juga menempatkan AgTech sebagai sarana penting untuk menciptakan sistem pangan yang lebih tangguh dan berkelanjutan. ([FAOHome](#))

Urgensi perubahan itu tampak jelas dari indikator global terkini. SOFI 2025 menunjukkan bahwa laporan tahun itu berfokus pada bagaimana inflasi pangan yang tinggi telah menggerus daya beli dan, khususnya

pada kelompok berpendapatan rendah, menurunkan akses terhadap diet sehat. World Bank pada pembaruan keamanan pangan akhir 2025 juga mencatat bahwa meskipun sebagian pasar global tampak memiliki pasokan yang relatif baik, biaya input masih tinggi di banyak sistem bermargin rendah. Pada saat yang sama, WMO menyatakan bahwa 2025 merupakan salah satu tahun terpanas yang pernah tercatat, dan periode 2023–2025 menjadi tiga tahun terpanas berturut-turut dalam seluruh delapan himpunan data global utama. Artinya, sistem pangan global tidak hanya dituntut untuk lebih produktif, tetapi juga lebih tahan terhadap guncangan yang datang dari harga, iklim, energi, dan logistik secara serentak. ([FAOHome](#))

Dalam konteks itu, teknologi pertanian menjadi penting bukan karena ia modern atau menarik secara simbolik, melainkan karena ia menawarkan kemungkinan baru untuk menghubungkan produktivitas dengan presisi, efisiensi dengan keberlanjutan, dan keputusan lokal dengan informasi global. Namun, teknologi pertanian tidak otomatis menghasilkan transformasi yang inklusif. Teknologi dapat meningkatkan hasil, tetapi juga dapat memperlebar kesenjangan bila aksesnya hanya dinikmati oleh pelaku bermodal besar. Teknologi dapat mempercepat pemasaran, tetapi juga dapat mengonsentrasikan kekuasaan data pada segelintir platform. Teknologi dapat membantu petani kecil, tetapi juga dapat gagal bila infrastruktur digital, keterampilan, atau kelembagaan penyangga tidak tersedia. Karena itu, pembahasan mengenai teknologi pertanian harus selalu diletakkan dalam kerangka yang lebih luas, yaitu transformasi sistem pangan global. ([World Bank](#))

Tulisan ini bertujuan menjelaskan secara akademik bagaimana teknologi pertanian mendorong transformasi sistem pangan global. Uraian akan dimulai dari alasan mengapa sistem pangan global memerlukan transformasi, lalu membahas jenis-jenis teknologi yang mengubah hulu dan hilir pangan, keterkaitannya dengan perubahan iklim dan ketahanan pangan, manfaat dan risikonya bagi petani kecil, serta implikasi

kebijakan bagi negara-negara berkembang, termasuk Indonesia. Dengan pendekatan ini, teknologi tidak dibaca hanya sebagai perangkat, melainkan sebagai bagian dari perubahan struktur ekonomi, kelembagaan, dan tata kelola pangan dunia. ([FAOHome](#))

2. Mengapa Sistem Pangan Global Sedang Berubah

Sistem pangan global saat ini berada dalam tekanan yang lebih berat dibanding masa-masa sebelumnya. Bukan hanya karena jumlah penduduk dunia terus bertambah, tetapi juga karena kualitas tantangan yang dihadapi makin majemuk. Lahan pertanian mengalami degradasi, iklim makin tidak menentu, harga pangan sering bergejolak, dan rumah tangga miskin di berbagai negara tetap menghadapi hambatan besar untuk mengakses diet sehat. FAO dalam *The State of Food and Agriculture 2025* menekankan bahwa degradasi lahan memberikan kontribusi terhadap kesenjangan hasil panen (*yield gap*) di berbagai wilayah, dan bahwa skala pengelolaan lahan membentuk sekaligus batasan dan peluang bagi adopsi praktik berkelanjutan. Ini berarti transformasi sistem pangan tidak dapat dipisahkan dari upaya memulihkan basis ekologis yang menopang produksi pangan itu sendiri. ([FAOHome](#))

Pada level sosial-ekonomi, persoalan utama juga bukan lagi sekadar apakah dunia menghasilkan cukup kalori. SOFI 2025 justru menyoroti bagaimana inflasi pangan yang tinggi mengurangi keterjangkauan diet sehat. Dengan kata lain, tantangan sistem pangan modern adalah memastikan bahwa pangan yang tersedia juga dapat dibeli, didistribusikan, dan dikonsumsi dalam pola yang sehat. Pergeseran fokus dari "ketersediaan pangan" ke "keterjangkauan diet sehat" sangat penting karena ia mengubah cara kita menilai keberhasilan sistem pangan. Negara atau kawasan dapat memiliki stok bahan pokok yang aman, tetapi bila protein hewani, buah, sayuran, dan pangan bergizi lain tetap mahal, maka kualitas ketahanan pangannya masih rendah. Di

sinilah teknologi mulai memainkan peran besar, sebab ia dapat membantu menurunkan biaya informasi, menghubungkan produsen dengan pasar, memperbaiki rantai dingin, dan mengurangi kehilangan hasil. ([FAOHome](#))

Perubahan iklim mempercepat kebutuhan akan transformasi tersebut. WMO mencatat bahwa tiga tahun terakhir merupakan tiga tahun terpanas yang tercatat, dan panas global yang semakin tinggi telah memperkuat kejadian cuaca ekstrem, hujan lebat, siklon tropis, serta kebutuhan akan sistem peringatan dini. Di bidang pertanian, hal ini berarti kalender tanam lebih sulit diprediksi, risiko gagal panen meningkat, serangan hama dan penyakit berubah pola, dan ketidakpastian hasil menjadi lebih tinggi. Dalam kondisi semacam ini, sistem pangan yang masih mengandalkan intuisi tanpa dukungan data akan makin rentan. Teknologi iklim dan pertanian lalu menjadi jembatan yang menghubungkan informasi atmosfer, data lahan, dan keputusan budidaya di tingkat petani. ([World Meteorological Organization](#))

Ada pula dimensi geopolitik dan logistik yang mempercepat perubahan. Bank Dunia mencatat bahwa meskipun beberapa komoditas global tampak cukup tersedia, tingginya biaya input masih membatasi sistem pertanian dengan margin rendah. Artinya, efisiensi bukan lagi sekadar keunggulan kompetitif, melainkan syarat bertahan. Dalam rantai pangan global, informasi yang terlambat tentang produksi, stok, pengiriman, atau harga dapat mengubah gangguan kecil menjadi gejolak besar. Karena itu, transformasi sistem pangan global tidak hanya berarti petani menggunakan sensor, tetapi juga berarti rantai pasok pangan menjadi lebih cerdas, lebih transparan, dan lebih terhubung dari hulu sampai hilir. ([World Bank](#))

3. Dari Revolusi Pertanian ke Pertanian Digital

Secara historis, perkembangan teknologi pertanian dapat dibaca dalam beberapa tahap besar. Tahap awal berkaitan dengan mekanisasi, benih

unggul, pupuk, dan irigasi modern yang mendorong Revolusi Hijau. Tahap berikutnya menekankan peningkatan efisiensi melalui pengelolaan input yang lebih baik. Tahap mutakhir bergerak ke arah pertanian presisi dan pertanian digital, di mana keputusan budidaya increasingly didasarkan pada data real-time, analitik prediktif, serta integrasi antara perangkat lapangan dan sistem informasi yang lebih luas. Di sinilah pertanian tidak lagi hanya “menggunakan mesin”, tetapi mulai “menggunakan data”. FAO menjelaskan bahwa precision agriculture adalah pendekatan manajemen usahatani berbasis data yang dapat meningkatkan produktivitas dan hasil, sekaligus mengurangi kebutuhan air, pupuk, dan pestisida sehingga jejak lingkungannya menurun. ([FAOHome](#))

Perkembangan ini dimungkinkan oleh kombinasi beberapa teknologi: telepon seluler, penginderaan jauh berbasis satelit, drone, IoT, AI, dan komputasi awan. Menurut FAO, kombinasi teknologi ini yang semakin terjangkau membuka kemungkinan agar precision agriculture tidak hanya menjadi milik pertanian skala besar, tetapi juga dapat diakses oleh petani kecil di negara berkembang. Sementara itu, World Bank menjelaskan bahwa teknologi digital dalam sistem pangan berada pada suatu kontinum: dari video penyuluhan digital yang dapat digunakan secara luring, hingga sistem yang membutuhkan konektivitas tinggi seperti blockchain untuk penelusuran nilai rantai dan berbagai bentuk pertanian presisi. Ini penting karena transformasi digital pertanian tidak harus dimulai dari teknologi paling canggih; ia dapat dimulai dari teknologi sederhana yang sesuai dengan tingkat konektivitas dan keterampilan lokal. ([FAOHome](#))

Perubahan dari pertanian konvensional ke pertanian digital juga mengubah pola hubungan antara pengetahuan dan keputusan. Dalam model lama, petani sangat bergantung pada pengalaman pribadi, penyuluh, sesama petani, atau pedagang input untuk mengambil keputusan budidaya. Model itu tidak sepenuhnya salah, tetapi sering kali

lambat merespons perubahan iklim, dinamika pasar, dan risiko baru. World Bank, dalam kajiannya mengenai digital agriculture di Indonesia, mencatat bahwa hubungan informasi di pedesaan secara tradisional banyak dipengaruhi tetangga, petani besar, dan penjual input. Teknologi, menurut laporan itu, membuka peluang untuk memperkuat relasi tersebut dengan advisori yang lebih mutakhir dan lebih andal, khususnya ketika variabilitas iklim meningkat. Di sini teknologi tidak menggantikan jejaring sosial pedesaan, tetapi berpotensi meningkatkan kualitas informasi yang mengalir di dalamnya. ([World Bank](#))

Akan tetapi, peralihan menuju pertanian digital tidak otomatis. FAO mencatat bahwa terdapat lima kendala utama dalam adopsi precision agriculture pada skala kecil: ukuran lahan yang sempit, biaya adopsi yang tinggi, kesulitan teknis, kurangnya dukungan profesional, dan kurangnya kebijakan pendukung. Karena itu, transformasi teknologi harus selalu dibaca sebagai persoalan teknis sekaligus kelembagaan. Petani kecil tidak hanya memerlukan alat; mereka memerlukan pembiayaan, pelatihan, model bisnis bersama, standardisasi, dan dukungan kebijakan yang membuat teknologi itu masuk akal secara ekonomi. Ini sebabnya teknologi pertanian, bila hendak mentransformasi sistem pangan global, harus bergerak melalui ekosistem, bukan sekadar penjualan perangkat. ([FAOHome](#))

4. Teknologi Pertanian di Hulu: Presisi, Prediksi, dan Produktivitas

Di sisi hulu, teknologi pertanian mengubah hampir semua tahap pengambilan keputusan. Teknologi sensor, citra satelit, dan drone memungkinkan lahan dibaca sebagai ruang yang heterogen, bukan homogen. Dalam praktik lama, petani sering memberi pupuk, air, atau pestisida dalam volume yang relatif seragam untuk satu hamparan lahan. Dalam pertanian presisi, lahan dapat dipetakan berdasarkan kelembapan, status hara, tekanan gulma, atau gejala penyakit, sehingga intervensi menjadi lebih tepat sasaran. FAO menegaskan bahwa precision

agriculture membantu meningkatkan produktivitas dan profitabilitas sambil mengurangi kebutuhan air, pupuk buatan, dan pestisida. Dengan kata lain, produktivitas dan efisiensi tidak lagi dilihat sebagai dua tujuan yang bertentangan, tetapi sebagai hasil dari keputusan yang lebih presisi. ([FAOHome](#))

Kecerdasan buatan memperluas kemampuan ini. Dalam kerangka yang dibahas FAO pada *Digital Agriculture and AI Innovation Roadmap*, AI diposisikan bukan hanya sebagai alat otomatisasi, tetapi sebagai kerangka kerja untuk memproses data agrifood yang terdesentralisasi dan membangun solusi yang bertanggung jawab. Dengan AI, data cuaca, tanah, citra daun, riwayat panen, dan data pasar dapat dianalisis bersama untuk memberi rekomendasi yang lebih tepat. Ini berarti petani atau penyuluh dapat bergerak dari respons reaktif ke prediktif: tidak menunggu penyakit menyebar baru bertindak, tetapi mendeteksi pola yang mengarah ke risiko sebelum kerugian terjadi. Dalam jangka panjang, transformasi semacam ini mengubah pertanian dari praktik berbasis pengalaman semata menjadi praktik berbasis pengalaman plus kecerdasan data. ([FAOHome](#))

Teknologi juga memperkuat fungsi penyuluhan pertanian. Salah satu pelajaran penting dari World Bank adalah bahwa teknologi digital dapat hadir dalam bentuk yang sederhana, seperti video advisor luring, SMS, atau pesan suara, hingga bentuk yang lebih kompleks seperti aplikasi interaktif dan sistem keputusan berbasis cloud. Bagi petani kecil, khususnya di wilayah dengan konektivitas terbatas, bentuk sederhana justru sering kali paling realistis. Ini penting karena transformasi sistem pangan global tidak harus menunggu semua desa memiliki internet sangat cepat. Bahkan dalam kondisi konektivitas rendah, teknologi dapat tetap meningkatkan kualitas advokasi, mempercepat penyebaran praktik budidaya yang baik, dan menutup sebagian kesenjangan informasi yang selama ini menghambat produktivitas. ([World Bank](#))

Ada sisi lain yang sering kurang dibahas, yakni teknologi sebagai alat untuk mengelola ketidakpastian. Di masa lalu, banyak keputusan petani—waktu tanam, varietas, atau intensitas input—diambil dalam konteks ketidakpastian besar. Dengan layanan iklim digital, prediksi musim, dan advisori berbasis data, ketidakpastian itu memang tidak hilang, tetapi bisa diperkecil. Ini sangat penting pada era perubahan iklim. WMO menekankan kebutuhan vital akan sistem peringatan dini, dan World Bank juga menempatkan climate-smart agriculture sebagai pendekatan yang bertujuan meningkatkan produktivitas dan pendapatan petani, membangun ketahanan terhadap perubahan iklim, serta menurunkan atau menyerap emisi sesuai prioritas pembangunan nasional. Maka, teknologi pertanian di hulu sesungguhnya bukan hanya alat meningkatkan hasil, tetapi alat untuk memperbesar kapasitas adaptif sistem pangan. ([World Meteorological Organization](#))

5. Bioteknologi, Benih, dan Masa Depan Produktivitas

Selain digitalisasi, salah satu jalur utama transformasi sistem pangan global adalah bioteknologi. Pembahasan ini sering menimbulkan perdebatan, tetapi secara substantif ia penting karena banyak tantangan pertanian modern—kekeringan, hama, penyakit, penurunan kesuburan tanah, hingga kebutuhan nutrisi—tidak dapat dijawab hanya dengan manajemen lapangan yang lebih baik. Di sinilah peran pemuliaan tanaman canggih, genomika, editing gen, dan biofortifikasi menjadi relevan. CGIAR mencatat bahwa digitization of food and land use systems kini terjadi bersamaan dengan precision farming, gene-editing techniques, dan logistik yang lebih canggih. Artinya, transformasi sistem pangan tidak hanya berlangsung lewat sensor dan software, tetapi juga lewat perubahan pada materi biologis yang menjadi basis produksi pangan. ([Bitly](#))

Dalam praktiknya, gene editing seperti CRISPR menarik perhatian karena memberi kemungkinan memperbaiki sifat tanaman dengan cara yang

lebih presisi. CGIAR menyoroti pelatihan dan terobosan penelitian yang diarahkan untuk mengembangkan tanaman lebih tahan terhadap kekeringan, hama, dan penyakit, sebagai jawaban atas tantangan keamanan pangan dan nutrisi. Dari sudut pandang sistem pangan global, manfaat potensial teknologi ini sangat besar: varietas yang lebih tahan penyakit dapat mengurangi kehilangan hasil, varietas tahan cekaman air dapat membantu adaptasi iklim, dan varietas bergizi tinggi dapat menghubungkan produktivitas dengan perbaikan nutrisi. Namun manfaat itu datang bersama kebutuhan akan tata kelola etik, regulasi biosafety, kejelasan hak kekayaan intelektual, dan penerimaan publik. ([CGIAR System](#))

Bioteknologi juga penting ketika dikaitkan dengan degradasi lahan. FAO dalam *The State of Food and Agriculture 2025* menegaskan bahwa degradasi lahan berkontribusi terhadap *yield gap* dan memengaruhi produsen pada berbagai skala. Dalam konteks itu, teknologi benih dan inovasi biologis tidak bisa dipandang sebagai upaya meningkatkan hasil semata, tetapi juga sebagai cara menyesuaikan produksi dengan ekologi yang kian sulit. Bila lahan yang terdegradasi memerlukan varietas lebih tangguh, sistem pangan global harus mampu mendorong inovasi biologis sekaligus memastikan bahwa akses terhadap benih dan teknologi tersebut tidak terpusat pada sedikit pemain besar. Dengan kata lain, transformasi biologis harus diseimbangkan dengan keadilan distribusi manfaat. ([FAOHome](#))

Bagi negara-negara berkembang, pertanyaan kuncinya bukan hanya apakah bioteknologi tersedia, tetapi apakah ekosistem inovasinya siap. Tanpa kapasitas riset, laboratorium, penyuluhan, dan regulasi yang memadai, negara dapat menjadi sekadar pengguna pasif teknologi yang dikembangkan di tempat lain. Karena itu, teknologi pertanian dalam arti luas harus dipahami juga sebagai pembangunan kapasitas ilmiah nasional. Transformasi sistem pangan global akan semakin ditentukan oleh siapa yang mampu menghubungkan ilmu hayati, sains data, dan

kelembagaan publik ke dalam strategi yang relevan dengan kebutuhan pangan domestik. ([FAOHome](#))

6. Teknologi di Hilir: Distribusi, Traceability, dan Rantai Nilai

Transformasi sistem pangan tidak berhenti di lahan. Salah satu perubahan paling penting justru terjadi di hilir, pada saat pangan bergerak dari produsen ke konsumen. World Bank menekankan bahwa teknologi digital dapat mengurangi biaya menghubungkan penjual dan pembeli, memperluas akses terhadap informasi, meningkatkan presisi pengambilan keputusan, dan bahkan mengurangi skala ekonomi yang menguntungkan pelaku besar. Dalam sistem pangan, dampak ini sangat penting karena banyak kerugian bukan berasal dari produksi yang rendah, tetapi dari distribusi yang mahal, informasi yang timpang, dan pasar yang tidak transparan. Teknologi digital dapat memperpendek jarak ekonomi antara produsen dan konsumen, meskipun jarak geografisnya tetap jauh. ([World Bank](#))

Salah satu contoh penting adalah platform pemasaran dan logistik digital. Dalam kajian World Bank tentang Indonesia, disebutkan bahwa produsen memerlukan informasi harga, pasar, logistik, penyimpanan, bahkan akses ke *virtual trading floors*. Laporan itu juga menekankan bahwa solusi digital untuk pembayaran, kredit, tabungan, dan transaksi termasuk mikro-kredit dan asuransi sangat esensial bagi petani kecil. Ini menunjukkan bahwa teknologi pertanian dalam pengertian modern tidak berhenti pada budidaya; ia juga mencakup fungsi pasar. Ketika platform digital membantu petani menemukan pembeli, memeriksa harga, mengatur pengangkutan, dan menerima pembayaran, sistem pangan bergerak dari ketidakpastian informasi ke koordinasi yang lebih baik. ([World Bank](#))

Traceability atau penelusuran rantai nilai juga semakin penting. World Bank menjelaskan bahwa berbagai teknologi digital, termasuk *distributed ledger technologies*, dapat digunakan untuk penelusuran

rantai nilai. Pada saat yang sama, kajian untuk Indonesia menyebut bahwa digital agriculture dapat membantu kepatuhan terhadap standar internasional untuk traceability dengan menyediakan data yang andal. Dalam sistem pangan global yang semakin menuntut keamanan, keberlanjutan, dan akuntabilitas, traceability menjadi aset strategis. Konsumen, regulator, dan pembeli internasional makin ingin mengetahui asal produk, cara produksi, kepatuhan terhadap standar, dan jalur distribusinya. Teknologi digital memungkinkan informasi itu direkam dan dibagikan lebih cepat. Dengan demikian, teknologi pertanian mengubah sistem pangan bukan hanya pada sisi efisiensi, tetapi juga pada sisi kepercayaan. ([World Bank](#))

Rantai dingin dan pemantauan kualitas juga termasuk arena transformasi penting. Banyak hasil pertanian, terutama hortikultura, produk hewani, dan perikanan, sangat sensitif terhadap waktu dan suhu. Teknologi pemantauan suhu, manajemen gudang, serta optimasi rute logistik dapat secara signifikan mengurangi kehilangan hasil dan pemborosan. Dalam konteks global, ini berarti transformasi teknologi dapat meningkatkan pasokan efektif tanpa menambah luas tanam. Pada level sistem, hal ini sangat penting karena krisis pangan sering kali diperparah oleh kehilangan pascapanen dan pemborosan, bukan semata oleh keterbatasan produksi primer. Maka, teknologi di hilir berkontribusi langsung pada produktivitas sistem pangan secara keseluruhan. ([World Bank](#))

7. Kecerdasan Buatan, Data, dan Tata Kelola Agrifood

Salah satu kata kunci paling penting dalam transformasi sistem pangan global adalah data. FAO melalui *Digital Agriculture and AI Innovation Roadmap* menekankan sebuah kerangka yang federatif dan terdesentralisasi untuk data agrifood dan inovasi AI. Gagasan ini penting karena sistem pangan modern menghasilkan data dalam jumlah besar: data cuaca, tanah, biomassa, harga, pengiriman, kesehatan ternak,

keamanan pangan, konsumsi, dan sebagainya. Namun data itu hanya bernilai bila dapat diolah menjadi keputusan yang lebih baik. AI di sini bukan tujuan, melainkan mesin yang mengubah data tercecer menjadi wawasan operasional bagi petani, perusahaan, dan pemerintah.

([FAOHome](#))

Di tingkat pemerintah, data dan AI berpotensi mengubah kualitas kebijakan pangan. Negara dapat bergerak dari kebijakan berbasis laporan terlambat menuju kebijakan berbasis pemantauan real-time. Misalnya, data harga dan stok dapat dipadukan dengan data cuaca dan produksi untuk mendeteksi kemungkinan gejolak sebelum harga meledak. Data geospasial dapat digunakan untuk menargetkan intervensi pada wilayah yang benar-benar rentan. Monitoring berbasis perangkat digital juga dapat membantu dalam situasi rapuh dan konflik, sebagaimana World Bank menunjukkan penggunaan GEMS untuk memantau kemajuan proyek di situasi yang sulit. Artinya, digitalisasi pangan tidak hanya meningkatkan efisiensi pasar, tetapi juga memperkuat kapasitas negara untuk hadir lebih cepat dan lebih tepat.

([World Bank](#))

Akan tetapi, tata kelola data menjadi isu yang sangat penting. World Bank mengingatkan bahwa teknologi digital dalam sistem pangan membawa risiko berupa konsentrasi kekuasaan penyedia layanan, kurangnya privasi data, eksklusi, potensi hilangnya pekerjaan tertentu, dan pelanggaran keamanan siber. Bila data pertanian terkonsentrasi pada segelintir platform, maka relasi kuasa baru dapat terbentuk: produsen menjadi tergantung pada infrastruktur data yang tidak mereka kendalikan. Karena itu, transformasi sistem pangan berbasis teknologi memerlukan prinsip tata kelola yang kuat, termasuk keterbukaan, interoperabilitas, perlindungan data, serta keseimbangan antara peran publik dan swasta. ([World Bank](#))

Bagi negara berkembang, kebutuhan akan *digital agriculture roadmap* menjadi sangat jelas. World Bank mendefinisikan *Digital Agriculture Roadmap* sebagai strategi, rencana investasi, dan rencana implementasi untuk memandu transformasi sektor pertanian dengan teknologi digital. Kerangka ini penting karena teknologi pertanian yang berhasil bukanlah hasil penjumlahan pilot project yang terpisah-pisah. Ia membutuhkan visi, prioritas, urutan investasi, dan desain kelembagaan yang jelas. Tanpa roadmap, banyak inisiatif digital agriculture berisiko berhenti di tahap eksperimen dan gagal menjadi transformasi sistemik. ([World Bank](#))

8. Teknologi Pertanian dan Ketahanan Iklim

Tidak mungkin membahas teknologi pertanian mutakhir tanpa menempatkannya dalam konteks perubahan iklim. World Bank mendefinisikan *climate-smart agriculture* sebagai pendekatan terintegrasi untuk mengelola bentang lahan—termasuk cropland, livestock, forests, dan fisheries—yang menjawab tantangan saling terkait antara ketahanan pangan dan perubahan iklim. Di Indonesia, World Bank menjelaskan bahwa CSA bertujuan meningkatkan produktivitas dan pendapatan secara berkelanjutan, membangun ketahanan terhadap perubahan iklim, dan mengurangi atau menyerap emisi sejalan dengan prioritas pembangunan nasional. Tiga tujuan ini penting karena menunjukkan bahwa teknologi pertanian modern tidak cukup hanya produktif; ia juga harus adaptif dan, bila mungkin, lebih rendah emisi. ([World Bank](#))

Teknologi memainkan peran sentral dalam kerangka CSA ini. Sensor kelembapan tanah dan sistem irigasi cerdas dapat menghemat air pada kondisi kekeringan. Varietas tahan cekaman dan monitoring kesehatan tanaman dapat mengurangi risiko gagal panen. Sistem peringatan dini dan advisori iklim digital dapat membantu petani memilih waktu tanam yang lebih aman. Pada tingkat wilayah, data satelit dan model spasial dapat membantu pemerintah mengidentifikasi area rentan, mengelola

air, dan menargetkan dukungan secara lebih efisien. Bila dirangkai bersama, teknologi pertanian tidak hanya membantu hasil panen, tetapi juga memperbesar “daya lenting” sistem pangan terhadap kejutan iklim. ([World Bank](#))

Di sinilah transformasi sistem pangan global bertemu dengan agenda transisi hijau. Teknologi yang mengurangi penggunaan input berlebih, memperbaiki kesehatan tanah, menghemat air, dan mengurangi kehilangan hasil dapat memberi manfaat ganda: produktivitas meningkat, jejak lingkungan menurun. Namun transisi semacam itu tidak otomatis murah atau mudah. Banyak petani, terutama kecil, menghadapi keterbatasan modal dan pengetahuan. Karena itu, teknologi yang relevan untuk ketahanan iklim harus dirancang agar sesuai dengan kondisi petani nyata, bukan hanya ideal dalam presentasi kebijakan. Bila tidak, teknologi hijau justru bisa menjadi teknologi eksklusif. ([FAOHome](#))

Perubahan iklim juga memperlihatkan bahwa teknologi pertanian tidak boleh dibatasi pada level usaha tani. Early warning systems, data hidrometeorologi, dan koordinasi institusional merupakan bagian integral dari teknologi pertanian dalam arti luas. WMO menekankan urgensi sistem peringatan dini yang otoritatif, dapat diakses, dan dapat ditindaklanjuti. Dalam sistem pangan global, artinya teknologi bukan hanya alat di tangan petani, tetapi juga infrastruktur informasi publik yang memungkinkan keputusan kolektif lebih cepat dan lebih baik. Negara yang membangun kapasitas ini akan lebih siap menghadapi masa tanam yang bergeser, serangan cuaca ekstrem, dan risiko harga yang menyertainya. ([World Meteorological Organization](#))

9. Petani Kecil, Inklusi Digital, dan Keadilan Transformasi

Salah satu pertanyaan paling penting dalam transformasi sistem pangan global adalah siapa yang benar-benar memperoleh manfaat dari teknologi. FAO mencatat bahwa smallholders yang mengelola kurang dari dua hektare—mewakili sekitar 12 persen dari seluruh lahan

pertanian—masih menghasilkan kira-kira sepertiga pangan dunia. Namun kelompok inilah yang paling terekspos pada cuaca ekstrem, harga yang volatil, dan eksklusi digital. Fakta ini sangat penting. Ia menunjukkan bahwa pembicaraan tentang teknologi pertanian tidak boleh terjebak pada gambaran korporasi besar atau pertanian sangat modern, sebab fondasi pangan global masih sangat ditopang oleh produsen kecil yang rentan. ([FAOHome](#))

FAO dan World Bank sama-sama menekankan bahwa teknologi digital dapat membantu petani kecil, tetapi manfaat itu tidak datang otomatis. World Bank menulis bahwa adopsi teknologi digital di sektor pangan lebih rendah di negara berpendapatan rendah dan bahwa peningkatan adopsi memerlukan penyelesaian faktor sisi penawaran—seperti cakupan jaringan rural dan ketersediaan aplikasi—dan faktor sisi permintaan, termasuk keterampilan, pengetahuan, kepercayaan, keterjangkauan, dan investasi pelengkap. Ini berarti masalah digital agriculture bukan semata “ada aplikasi atau tidak”, tetapi apakah ekosistem sosial-ekonominya siap. Tanpa konektivitas, tanpa literasi, dan tanpa model pembiayaan yang masuk akal, teknologi akan tetap berada di pinggiran kehidupan petani. ([World Bank](#))

Karena itu, berbagai inisiatif seperti FAO Digital Villages Initiative menjadi relevan. Inisiatif ini bertujuan mempercepat transformasi digital agrifood systems, membantu pengembangan strategi digital agriculture, dan mendukung penilaian kesiapan digital di berbagai negara Asia dan Pasifik, termasuk Indonesia. Nilai penting dari pendekatan ini bukan hanya pada teknologi yang diperkenalkan, tetapi pada upaya membangun lingkungan yang memungkinkan adopsi berlangsung lebih sistematis. Dengan kata lain, desa digital bukan sekadar desa yang memiliki aplikasi; ia adalah ruang di mana infrastruktur, pengetahuan, layanan, dan jejaring dibangun secara lebih terpadu. ([FAOHome](#))

Tantangan inklusi juga bersifat sosial. Petani kecil sering menghadapi keterbatasan lahan, modal, dan kemampuan untuk mencoba teknologi yang hasil ekonominya belum pasti. FAO mencatat bahwa teknologi precision agriculture pada skala kecil menghadapi kendala biaya, ukuran lahan, dukungan profesional, dan kebijakan pendukung. Solusi yang disarankan meliputi tindakan kolektif, koperasi, penggunaan bersama mesin, teknologi modular berbiaya rendah, pelatihan, dan layanan profesional yang lebih dekat dengan petani. Ini menunjukkan bahwa keadilan transformasi teknologi sangat bergantung pada organisasi sosial dan kebijakan publik. Teknologi yang adil hampir selalu memerlukan kelembagaan yang adil pula. ([FAOHome](#))

10. Narasi Perubahan: Dari Lahan ke Meja Makan

Agar lebih jelas, bayangkan dua narasi yang kontras. Dalam narasi pertama, seorang petani kecil mengolah lahan sempit dengan keputusan berbasis kebiasaan lama. Ia tidak tahu pasti kapan hujan ekstrem datang, tidak memiliki data harga yang memadai, tergantung pada satu pembeli lokal, dan menggunakan input secara seragam karena tidak punya cara mengetahui kondisi lahannya secara rinci. Hasil panennya tidak buruk, tetapi tidak stabil. Saat panen, harga turun. Saat gagal panen, ia menanggung risiko sendiri. Pada hilir, sebagian hasilnya rusak karena penyimpanan dan distribusi tidak efisien. Sistem pangan seperti ini bisa terus berjalan, tetapi rapuh dan mahal. Ia memindahkan banyak risiko ke petani dan konsumen. Narasi semacam ini masih terjadi di banyak bagian dunia dan menjadi alasan utama mengapa teknologi pertanian semakin dibutuhkan. ([World Bank](#))

Dalam narasi kedua, petani yang sama menjadi bagian dari sistem yang lebih cerdas. Ia menerima advisori musim berbasis data, menggunakan varietas yang lebih sesuai dengan risiko iklim lokal, memantau kondisi lahannya melalui sensor atau citra yang diakses lewat layanan kelompok, dan menjual hasil melalui platform yang memberinya informasi harga

serta akses ke logistik. Di sisi pembiayaan, ia dapat memperoleh kredit mikro atau asuransi berbasis data cuaca. Pada sisi hilir, pengiriman, penyimpanan, dan penelusuran kualitas lebih baik sehingga kehilangan hasil turun. Pemerintah lokal memanfaatkan dashboard data untuk mengantisipasi gejolak harga sebelum menjadi krisis. Konsumen mendapat produk yang lebih aman dan lebih terjangkau. Dalam narasi ini, teknologi tidak hanya menaikkan hasil; ia mengatur ulang aliran informasi, risiko, dan nilai tambah dalam seluruh sistem pangan. ([World Bank](#))

Perbedaan dua narasi itu menunjukkan inti transformasi sistem pangan global: teknologi menggeser sistem dari keterlambatan menuju antisipasi, dari seragam menuju presisi, dari transaksi buta menuju transparansi, dan dari isolasi produsen menuju konektivitas. Namun narasi kedua tidak akan muncul sendiri. Ia memerlukan investasi publik, strategi nasional, layanan penyuluhan baru, pembiayaan, regulasi data, dan organisasi produsen. Tanpa itu, teknologi canggih hanya menjadi “pulau-pulau inovasi” yang tidak cukup kuat untuk mengubah sistem secara keseluruhan. ([World Bank](#))

11. Risiko dan Sisi Gelap Transformasi Teknologi

Setiap transformasi besar selalu membawa risiko baru, dan teknologi pertanian tidak terkecuali. World Bank secara eksplisit mengingatkan beberapa risiko utama: konsentrasi kekuasaan penyedia layanan, kurangnya privasi data, eksklusivitas sebagian kelompok, kehilangan pekerjaan pada aktivitas tertentu, dan ancaman keamanan siber. Risiko-risiko ini penting karena sering tertutup oleh antusiasme terhadap inovasi. Sebuah sistem pangan bisa menjadi lebih efisien, tetapi juga lebih terkonsentrasi bila hanya sedikit perusahaan yang menguasai platform data, logistik, atau akses pembiayaan digital. Dalam jangka panjang, hal ini dapat menciptakan ketergantungan baru yang tidak

kalah problematis dibanding ketergantungan pada input tradisional.

([World Bank](#))

Ada pula risiko “digital divide” atau jurang digital. Teknologi cenderung pertama-tama menguntungkan mereka yang sudah memiliki konektivitas, pendidikan, modal, dan jejaring yang lebih baik. Sementara itu, kelompok yang paling rentan—petani kecil, perempuan pedesaan, pekerja informal, dan wilayah terpencil—bisa tertinggal lebih jauh.

Karena itu, teknologi pertanian dapat secara paradoks memperdalam ketimpangan bila tidak dirancang dengan prinsip inklusi. FAO, melalui DVI dan AI roadmap-nya, justru menekankan demokratisasi data dan AI, serta kebutuhan akan prinsip, kemitraan, dan jalur pembiayaan yang membuat inovasi bertanggung jawab dan terbuka. Penekanan ini menunjukkan bahwa institusi global mulai menyadari bahwa masalah utama bukan hanya menciptakan inovasi, tetapi siapa yang mengendalikan dan menikmatinya. ([FAOHome](#))

Risiko lain adalah solusi teknologi yang tidak sesuai konteks. Banyak teknologi tampak menjanjikan pada lingkungan dengan lahan besar, internet kuat, dan akses pembiayaan memadai, tetapi gagal ketika dipindahkan mentah-mentah ke lahan kecil dan konteks pedesaan yang berbeda. FAO mencatat bahwa teknologi precision agriculture untuk smallholders memerlukan pendekatan modular, kolektif, murah, dan mudah digunakan. Pelajaran ini sangat penting bagi banyak negara berkembang: transformasi teknologi tidak boleh menjadi proyek imitasi tanpa adaptasi. Teknologi yang tepat bukan selalu yang paling canggih, melainkan yang paling relevan terhadap kondisi sosial, ekonomi, ekologis, dan kelembagaan setempat. ([FAOHome](#))

Terakhir, ada risiko bahwa fokus pada teknologi mengaburkan persoalan struktural lain, seperti distribusi lahan, ketidakadilan pasar, lemahnya perlindungan sosial, atau kerusakan lingkungan akibat model produksi yang tidak berkelanjutan. Teknologi dapat membantu, tetapi ia tidak

otomatis menyelesaikan relasi kuasa dalam sistem pangan. Karena itu, transformasi sistem pangan global yang sehat harus menjadikan teknologi sebagai bagian dari reformasi yang lebih luas, bukan sebagai substitusi bagi kebijakan sosial, kelembagaan, dan ekologis. ([FAOHome](#))

12. Implikasi bagi Dunia Berkembang dan Indonesia

Bagi negara berkembang, pelajaran utama dari transformasi sistem pangan global adalah bahwa teknologi tidak boleh dipahami sebagai kemewahan masa depan. Ia sudah menjadi instrumen daya saing, ketahanan, dan perlindungan sosial masa kini. Negara yang lambat membangun fondasi digital, data, riset, dan kelembagaan akan semakin sulit menjaga sistem pangannya di tengah volatilitas iklim dan harga. Namun, mengejar teknologi tanpa strategi juga sama problematisnya. Karena itu, pendekatan *Digital Agriculture Roadmap* yang dikembangkan World Bank menjadi relevan: negara perlu memiliki strategi, rencana investasi, dan rencana implementasi yang jelas untuk memandu transformasi pertanian berbasis teknologi digital. ([World Bank](#))

Indonesia secara khusus memiliki beberapa alasan kuat untuk menaruh perhatian serius pada agenda ini. Pertama, struktur pertaniannya masih sangat dipengaruhi oleh petani kecil, sehingga teknologi harus dirancang untuk konteks smallholders, bukan hanya perusahaan besar. Kedua, sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki tantangan logistik dan distribusi yang besar, sehingga teknologi hilir—traceability, platform pasar, manajemen rantai dingin, dan dashboard stok—sama pentingnya dengan teknologi budidaya. Ketiga, ketahanan pangan Indonesia berkaitan erat dengan adaptasi iklim, sebab variabilitas musim, banjir, kekeringan, dan risiko hidrometeorologi makin memengaruhi produksi dan harga. World Bank juga telah menerbitkan kerangka climate-smart agriculture untuk Indonesia, yang menegaskan bahwa peningkatan produktivitas, adaptasi, dan mitigasi perlu dikelola secara terpadu. ([World Bank](#))

Dari sisi kebijakan, Indonesia memerlukan setidaknya empat arah besar. Pertama, memperkuat infrastruktur dasar transformasi: konektivitas pedesaan, data pertanian, layanan penyuluhan digital, dan sistem informasi iklim. Kedua, membangun model adopsi kolektif agar petani kecil bisa mengakses teknologi melalui koperasi, kelompok tani, atau penyedia jasa bersama. Ketiga, mengembangkan ekosistem pembiayaan digital yang menghubungkan advisori, pemasaran, tabungan, kredit, dan asuransi. Keempat, memastikan tata kelola data, standar interoperabilitas, dan perlindungan terhadap penyalahgunaan platform. Arah ini tidak hanya relevan bagi Indonesia, tetapi juga bagi banyak negara berkembang yang ingin menghindari jebakan adopsi teknologi setengah matang. ([World Bank](#))

Yang tidak kalah penting, Indonesia perlu menghubungkan teknologi pertanian dengan agenda gizi dan transformasi sistem pangan yang lebih luas. Teknologi seharusnya tidak berhenti pada peningkatan hasil beras atau komoditas pokok, tetapi juga mendorong diversifikasi, memperbaiki distribusi protein, buah, dan sayuran, serta menurunkan kehilangan hasil pada komoditas yang menopang diet sehat. Ini sangat penting karena tantangan pangan abad ke-21 bukan hanya memberi makan populasi, tetapi memberi makan dengan cara yang sehat, terjangkau, dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, teknologi pertanian menjadi salah satu sarana utama untuk menjembatani produktivitas dengan kesehatan masyarakat. ([FAOHome](#))

13. Penutup

Teknologi pertanian telah berkembang dari sekadar alat peningkat produksi menjadi pendorong utama transformasi sistem pangan global. Ia bekerja di hulu melalui pertanian presisi, advisori digital, AI, dan inovasi biologis; di hilir melalui logistik cerdas, penelusuran rantai nilai, dan platform pasar; dan di tingkat sistem melalui data, tata kelola, serta kebijakan berbasis bukti. Dalam dunia yang menghadapi inflasi pangan,

perubahan iklim, degradasi lahan, dan ketidakpastian logistik, transformasi semacam ini bukan lagi opsional. FAO, World Bank, dan lembaga-lembaga global lainnya secara konsisten menunjukkan bahwa sistem pangan dunia harus menjadi lebih tangguh, lebih inklusif, dan lebih cerdas. ([FAOHome](#))

Namun, teknologi pertanian bukan obat mujarab yang otomatis menyelesaikan semua masalah pangan. Ia dapat memperbesar produktivitas, tetapi juga memperbesar ketimpangan bila aksesnya tidak merata. Ia dapat meningkatkan efisiensi, tetapi juga menciptakan konsentrasi kekuasaan baru bila tata kelola data lemah. Ia dapat membantu petani kecil, tetapi hanya bila didukung infrastruktur, pembiayaan, pelatihan, dan kelembagaan yang sesuai. Karena itu, inti dari transformasi sistem pangan global bukan semata adopsi teknologi, melainkan kemampuan menggabungkan teknologi dengan kebijakan publik, organisasi sosial, dan etika distribusi manfaat. ([World Bank](#))

Pada akhirnya, teknologi pertanian harus dinilai bukan dari kecanggihannya, tetapi dari kemampuannya memperbaiki kehidupan nyata: membuat petani lebih tahan terhadap risiko, membuat rantai pasok lebih efisien, membuat harga lebih stabil, dan membuat diet sehat lebih terjangkau. Bila itu tercapai, maka teknologi pertanian benar-benar menjadi kekuatan transformasi sistem pangan global. Tetapi bila ia hanya menghasilkan pulau-pulau inovasi yang terpisah dari kebutuhan mayoritas produsen dan konsumen, maka teknologi itu akan tetap menjadi cerita kemajuan yang elok di atas kertas, namun terbatas dampaknya di lapangan. Tantangan terbesar kita, karena itu, bukan sekadar menciptakan teknologi pertanian yang lebih canggih, melainkan membangun sistem pangan yang cukup bijak untuk menggunakan teknologi itu bagi kepentingan manusia secara luas. ([World Bank](#))

Glosarium

1. Teknologi pertanian

Sekumpulan alat, sistem, dan metode—mekanis, biologis, digital, dan analitik—yang digunakan untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan usaha tani serta sistem pangan. ([World Bank](#))

2. Sistem pangan global

Keseluruhan jaringan yang mencakup produksi, pengolahan, distribusi, perdagangan, konsumsi, dan tata kelola pangan pada skala lintas negara, beserta dampaknya terhadap ekonomi, lingkungan, dan gizi. ([World Bank](#))

3. Pertanian presisi (precision agriculture)

Pendekatan pengelolaan usahatani berbasis data yang bertujuan meningkatkan produktivitas dan hasil, sekaligus mengurangi penggunaan air, pupuk, dan pestisida melalui keputusan yang lebih tepat sasaran. ([FAOHome](#))

4. Pertanian digital (digital agriculture)

Pemanfaatan teknologi digital seperti telepon seluler, internet, sensor, satelit, AI, dan platform data untuk mendukung keputusan, layanan, transaksi, dan efisiensi dalam sistem agrifood. ([World Bank](#))

5. Kecerdasan buatan (AI) dalam agrifood

Penggunaan metode komputasional untuk mengolah data agrifood dalam jumlah besar agar menghasilkan prediksi, rekomendasi, otomasi, dan dukungan keputusan yang lebih cepat dan lebih akurat. ([FAOHome](#))

6. Climate-smart agriculture (CSA)

Pendekatan pertanian yang ditujukan untuk meningkatkan produktivitas

dan pendapatan secara berkelanjutan, memperkuat adaptasi dan resiliensi terhadap perubahan iklim, serta mendukung pengurangan atau penyerapan emisi sesuai konteks pembangunan. ([World Bank](#))

7. Resiliensi sistem pangan

Kemampuan sistem pangan untuk bertahan, menyesuaikan diri, dan pulih dari guncangan seperti inflasi, cuaca ekstrem, konflik, atau gangguan logistik. ([World Bank](#))

8. Ketahanan pangan

Kondisi ketika semua orang, setiap saat, memiliki akses fisik dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk hidup aktif dan sehat. ([World Bank](#))

9. Keterjangkauan diet sehat

Kemampuan rumah tangga untuk membeli pola makan yang cukup, beragam, aman, dan bergizi; isu ini menjadi makin penting ketika inflasi pangan tinggi. ([World Bank](#))

10. Traceability (ketertelusuran)

Kemampuan menelusuri asal-usul, proses, dan pergerakan produk pangan sepanjang rantai nilai, sering dibantu oleh sistem digital dan data terintegrasi. ([World Bank](#))

11. Smallholder farmers (petani kecil)

Petani dengan skala usaha relatif kecil yang sering menghadapi keterbatasan lahan, modal, teknologi, dan akses pasar, tetapi tetap memegang peran besar dalam produksi pangan. ([FAOHome](#))

12. Digital divide (kesenjangan digital)

Ketimpangan akses, keterampilan, infrastruktur, dan manfaat dari teknologi digital antara kelompok, wilayah, atau pelaku usaha tertentu. ([FAOHome](#))

13. Gene editing

Teknik bioteknologi untuk melakukan perubahan yang lebih terarah

pada materi genetik organisme, dengan potensi memperbaiki ketahanan tanaman, nutrisi, dan produktivitas. ([Open Knowledge FAO](#))

14. Degradasi lahan

Penurunan kualitas dan fungsi lahan akibat proses fisik, kimia, biologis, atau aktivitas manusia, yang dapat memperlebar kesenjangan hasil panen dan melemahkan sistem pangan. ([FAOHome](#))

15. Digital Villages Initiative (DVI)

Inisiatif FAO untuk mempercepat transformasi digital desa dan kota kecil agar petani dan pelaku agrifood dapat memanfaatkan teknologi digital, mengurangi kesenjangan digital, dan memperkuat transformasi perdesaan. ([FAOHome](#))

Daftar Pustaka (APA 7)

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2025: Addressing high food price inflation for food security and nutrition*. ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Digital agriculture and AI innovation roadmap*. ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *The State of Food and Agriculture 2025: Addressing land degradation across landholding scales*. ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Precision agriculture for smallholder farmers*. ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *How can precision farming work on a small scale?* ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Digital Villages Initiative in Asia and the Pacific*. ([FAOHome](#))

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Gene editing and agrifood systems*. ([Open Knowledge FAO](#))

World Bank. (2019). *Future of food: Harnessing digital technologies to improve food system outcomes*. ([World Bank](#))

World Bank. (2021). *Climate-smart agriculture in Indonesia*. ([World Bank](#))

World Bank. (2025). *Food security update*. ([World Bank](#))

World Meteorological Organization. (2026, January 14). *WMO confirms 2025 was one of warmest years on record*. ([World Meteorological Organization](#))

CGIAR. (2025, December 2). *Can CRISPR make the cut? How the “genetic scissors” reframe gene editing for food security*. ([CGIAR System](#))

Kalau Bapak mau, saya bisa lanjutkan dengan **versi daftar pustaka yang diperluas 20–25 sumber** atau **menyatukan glosarium ini ke dalam makalah lengkap**.

Copilot for this article - Chatgpt 5.2 Thinking. Access date: 11 Maret 2026
Prompting on Writer's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

<https://chatgpt.com/c/69b0de38-98a0-839c-82cd-fe88384118dc>