

PENERAPAN TEKNOLOGI ENERGI TERBARUKAN PADA SEKTOR PERTANIAN: TINJAUAN KRITIS

Application of Renewable Energy Technology in the Agricultural Sector: A Critical Review

Ropiudin^{1,*}, Kavadya Syska², Christian Soolany², Agus Margiwiyatno¹

¹ Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

* Email: ropiudin@unsoed.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2024.5.2.14506>

Naskah ini diterima pada 3 Januari 2025; revisi pada 27 Januari 2025;
disetujui untuk dipublikasikan pada 31 Januari 2025

ABSTRAK

Kajian ini berfokus tinjauan kritis pada pemanfaatan bioenergi sebagai alternatif sumber energi dalam sektor pertanian. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi potensi teknologi seperti fotovoltaik, biogas, dan energi biomassa dalam memperkuat integrasi energi terbarukan di sektor ini. Selain itu, kajian ini juga mengidentifikasi dinamika konsumsi energi di sektor pertanian, termasuk tantangan utama dalam transformasi pertanian menjadi prosumer energi yang mandiri dan berkelanjutan. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan teknologi energi terbarukan mampu meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi ketergantungan pada energi fosil di sektor pertanian. Teknologi seperti biogas, yang berbasis pada pengelolaan limbah organik, terbukti dapat menyediakan energi yang berkelanjutan sekaligus mendukung pengelolaan lingkungan. Strategi yang melibatkan integrasi teknologi modern, efisiensi energi, dan kerjasama multisektor direkomendasikan untuk mempercepat transformasi sektor pertanian ke arah yang lebih ramah lingkungan. Kajian ini memberikan wawasan penting bagi pengembangan sektor pertanian yang berorientasi pada efisiensi energi dan keberlanjutan. Dampak hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi panduan bagi pemerintah, akademisi, dan praktisi dalam mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam sistem pertanian modern.

Kata kunci: bioenergi, pertanian, energi terbarukan, agrivoltaik, prosumer energi

ABSTRACT

This study presents a critical review of bioenergy utilization as an alternative energy source in the agricultural sector. The analysis evaluates the potential of technologies such as photovoltaics, biogas, and biomass energy in strengthening the integration of renewable energy in this field. Additionally, the study identifies the dynamics of energy consumption in the agricultural sector, including the key challenges in transforming agriculture into an independent and sustainable energy prosumer. The findings reveal that the application of renewable energy technologies can significantly enhance energy efficiency while reducing reliance on fossil fuels in agriculture. Technologies like biogas, which are based on organic waste management, have been proven to provide sustainable energy while simultaneously supporting environmental management. Strategies involving the integration of modern technologies, energy efficiency, and multisectoral collaboration are recommended to accelerate the transformation of the agricultural sector toward more environmentally friendly practices. This research offers essential insights for developing an energy-efficient and sustainable agricultural sector. The implications of the findings are expected to guide policymakers, academics, and practitioners in integrating renewable energy into modern agricultural systems.

Keywords: bioenergy, agriculture, renewable energy, agrivoltaics, energy prosumer

PENDAHULUAN

Sektor pertanian memiliki peran strategis dalam kehidupan manusia, tidak hanya sebagai penyedia pangan tetapi juga sebagai kontributor utama dalam penggunaan energi dan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) global (Crippa *et al.*, 2021). Kegiatan pertanian seperti pengolahan lahan, irigasi, penyimpanan, dan transportasi memerlukan energi dalam jumlah besar, yang sebagian besar masih bergantung pada bahan bakar fosil (Majeed *et al.*, 2023). Ketergantungan ini menciptakan berbagai tantangan, termasuk emisi GRK yang signifikan, degradasi lingkungan, dan ketidakseimbangan ekosistem yang dapat memperburuk dampak perubahan iklim (Ropiudin *et al.*, 2023).

Dalam beberapa dekade terakhir, Loboguerrero *et al.* (2019) menjelaskan bahwa perhatian global terhadap dampak perubahan iklim telah mendorong transformasi sistem energi, termasuk di sektor pertanian. Teknologi energi terbarukan seperti energi biomassa, fotovoltaik, dan bioenergi muncul sebagai solusi potensial untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Teknologi ini tidak hanya menawarkan alternatif ramah lingkungan, tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi emisi karbon yang dihasilkan oleh kegiatan pertanian (Majeed *et al.*, 2023).

Biomassa menyediakan sumber energi yang melimpah dari limbah pertanian seperti jerami, sekam padi, dan limbah organik lainnya (Syska & Ropiudin, 2023). Dengan teknologi seperti pirolisis dan gasifikasi, limbah ini dapat dikonversi menjadi bahan bakar yang efisien, sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular (Porshnov, 2022). Selain itu, menurut Soto-Gómez (2024) bahwa agrivoltaik yang mengintegrasikan panel surya dengan sistem pertanian, memungkinkan produksi pangan dan energi secara simultan, mengoptimalkan penggunaan lahan tanpa mengorbankan produktivitas.

Selain potensi tersebut, menurut Alengebawy *et al.* (2024) bahwa sektor pertanian juga dapat berkontribusi pada produksi bioenergi melalui proses digestasi anaerobik untuk menghasilkan biogas. Proses ini memanfaatkan limbah organik dari peternakan dan pertanian, menghasilkan energi yang dapat digunakan kembali serta mengurangi polusi lingkungan (Koul *et al.*, 2022). Dengan demikian, integrasi teknologi energi terbarukan pada pertanian memiliki implikasi besar tidak hanya bagi ketahanan pangan tetapi juga bagi transisi energi global menuju ekonomi rendah karbon.

Namun demikian, implementasi teknologi ini masih menghadapi berbagai tantangan. Efisiensi energi di sektor pertanian cenderung rendah, terutama di negara-negara berkembang, dimana akses terhadap teknologi modern terbatas (Rahman *et al.*, 2022). Selain itu, ditambahkan oleh Streimikiene *et al.* (2021) bahwa biaya awal yang tinggi, kurangnya infrastruktur, serta kurangnya pengetahuan di kalangan petani menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi energi terbarukan. Kebijakan yang kurang mendukung juga sering menjadi faktor penghambat dalam mengintegrasikan teknologi ini ke dalam praktik pertanian (Xie & Huang, 2021).

Di sisi lain, teknologi modern seperti kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* - AI) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning* - ML) membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi teknologi energi terbarukan di sektor pertanian (Morkūnas *et al.*, 2024). AI memungkinkan optimasi desain dan operasional sistem energi terbarukan, seperti simulasi efisiensi energi dari biomassa atau fotovoltaik (Sayed *et al.*, 2023). Dengan pendekatan berbasis data, sektor pertanian dapat mengadopsi teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, mendukung keberlanjutan ekonomi dan ekologi secara bersamaan (Kamble *et al.*, 2020).

Guna menghadapi tantangan perubahan iklim, sektor pertanian memiliki potensi untuk bertransformasi dari konsumen energi menjadi prosumer energi, yang tidak hanya menggunakan

tetapi juga memproduksi energi terbarukan (Strielkowski *et al.*, 2021). Dengan dukungan teknologi, kebijakan yang tepat, dan kerjasama multisektor, sektor pertanian dapat memainkan peran kunci dalam transisi energi global, mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*, SDGs) serta *net zero emissions* pada tahun 2060 bahkan bisa lebih cepat lagi (Mangal *et al.*, 2025).

Tujuan khusus tinjauan kritis ini yaitu: (1) Menganalisis dinamika konsumsi energi di sektor pertanian, termasuk pemanfaatan energi fosil dan energi terbarukan. (2) Mengevaluasi potensi teknologi seperti fotovoltaik dan biogas dalam memperkuat peran pertanian sebagai produsen energi terbarukan. (3) Mengidentifikasi tantangan utama dalam mewujudkan pertanian sebagai prosumer energi. (4) Menyusun strategi untuk meningkatkan efisiensi energi dalam sektor pertanian serta integrasinya dengan teknologi modern.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan kritis (*critical review*) untuk mengevaluasi penerapan teknologi energi terbarukan, khususnya dalam sektor pertanian, yang mencakup teknologi seperti agrivoltaik, digester anaerobik, dan biorefineri. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren, peluang, dan tantangan yang muncul dalam penerapan teknologi ini, serta mengevaluasi efisiensi energi, dampak lingkungan, dan relevansinya terhadap keberlanjutan.

Dalam tinjauan kritis ini, berbagai literatur ilmiah dianalisis untuk memberikan perspektif yang menyeluruh terhadap integrasi teknologi energi terbarukan. Analisis mencakup evaluasi teknis, ekonomis, dan sosial untuk memastikan relevansi teknologi dengan kebutuhan lokal dan global. Kajian ini juga memanfaatkan data dari berbagai sumber untuk mengidentifikasi parameter kritis, seperti efisiensi energi, emisi karbon, dan potensi manfaat pertanian jangka panjang, guna menyusun rekomendasi strategis bagi pengembangan teknologi berkelanjutan.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam ulasan kritis ini dilakukan melalui beberapa langkah strategis untuk memastikan analisis yang komprehensif dan relevan terhadap topik teknologi energi terbarukan di sektor pertanian: (1) Literatur yang Relevan: Pencarian literatur dilakukan secara luas untuk mengumpulkan informasi dari sumber terpercaya, termasuk jurnal ilmiah, artikel konferensi, laporan teknis, dan publikasi terkait lainnya. Fokus utama adalah pada penelitian terbaru yang mengevaluasi teknologi energi terbarukan seperti agrivoltaik, digester anaerobik, dan biorefineri. Literatur yang dipilih berfokus pada dampak teknologi ini terhadap efisiensi energi, produktivitas pertanian, dan pengurangan emisi karbon. (2) Kriteria Inklusif dan Eksklusif: Untuk memastikan relevansi dan kualitas data, kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan. Studi yang disertakan adalah penelitian yang menilai efisiensi teknologi energi terbarukan, dampaknya terhadap lingkungan, serta potensinya untuk diadaptasi di berbagai kondisi pertanian global. Penelitian dengan metodologi yang jelas dan valid serta kontribusi signifikan terhadap transisi energi di sektor pertanian menjadi prioritas. Studi yang memiliki fokus terbatas atau kurang valid secara metodologis dikecualikan untuk menjaga kualitas ulasan ini. Fokus utama adalah pada evaluasi efisiensi sistem dan optimasi desain untuk integrasi energi.

Analisis dan Sintesis Data

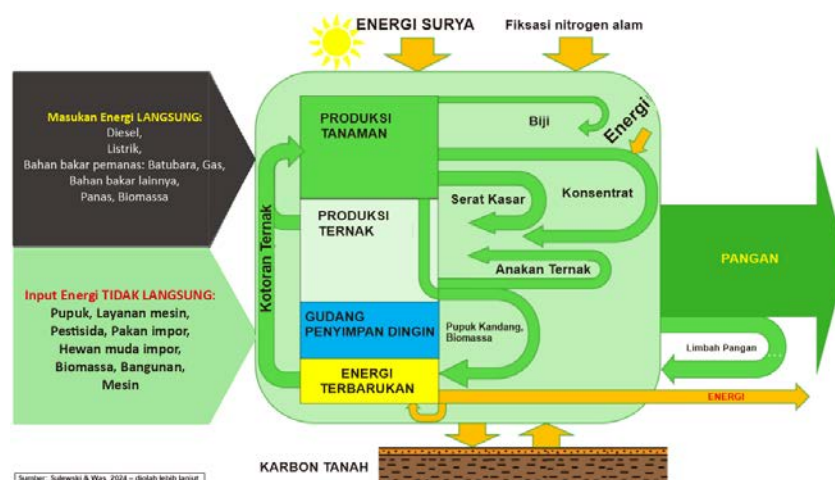
Dalam ulasan kritis ini, analisis dan sintesis data dilakukan melalui pendekatan sistematis sebagai berikut: (1) Kategorisasi Data: Data yang dikumpulkan dari berbagai literatur diklasifikasikan berdasarkan tema utama yang relevan dengan teknologi energi terbarukan di sektor pertanian. Tema-tema tersebut meliputi teknologi agrivoltaik, digester anaerobik, dan pemanfaatan

biomassa dalam biorefineri. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi yang lebih terarah terhadap manfaat dan tantangan yang dihadapi dalam penerapan teknologi ini. Selain itu, evaluasi mencakup dampak teknologi terhadap efisiensi energi, produktivitas pertanian, dan keberlanjutan lingkungan. (2) Evaluasi Metodologi: Dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap metodologi yang digunakan dalam berbagai studi, termasuk desain sistem agrivoltaik, parameter proses digestasi anaerobik (seperti rasio limbah dan suhu), serta teknik konversi biomassa menjadi bioenergi. Evaluasi ini mencakup analisis efisiensi teknologi, pengurangan emisi karbon, dan potensi dampak lingkungan. Pendekatan yang lebih presisi dalam pengaturan panel surya pada sistem agrivoltaik untuk memastikan kinerja optimum baik dari segi produksi energi maupun produktivitas tanaman. (3) Identifikasi Tren dan Inovasi: Tren penelitian terkini dalam integrasi teknologi energi terbarukan di sektor pertanian diidentifikasi untuk mengevaluasi kemajuan dan tantangan yang dihadapi. Penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* - AI) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning* - ML) juga dikaji, termasuk potensinya untuk memodelkan output energi dan memprediksi efisiensi teknologi seperti digester anaerobik atau agrivoltaik. Selain itu, simulasi komputer digunakan untuk mengevaluasi optimasi desain dan interaksi teknologi dengan kondisi lingkungan lokal, memberikan wawasan baru bagi pengembangan teknologi yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Teknologi Energi Terbarukan yang Relevan dengan Sektor Pertanian

Teknologi energi terbarukan telah menjadi fokus penting dalam transformasi sistem energi sektor pertanian. Pemanfaatan biomassa, agrivoltaik, dan produksi bioenergi merupakan beberapa pendekatan yang relevan untuk mendukung keberlanjutan energi pertanian.



Gambar 1. Aliran energi di sektor pertanian

Gambar 1 menunjukkan sebuah sistem pertanian berbasis energi terbarukan yang mengintegrasikan berbagai komponen, seperti produksi tanaman, ternak, energi, dan pengelolaan limbah. Energi surya menjadi sumber utama yang mendukung fotosintesis dalam produksi tanaman dan fiksasi nitrogen alami. Sistem ini juga mengandalkan masukan energi langsung, seperti diesel, listrik, dan biomassa, serta masukan energi tidak langsung berupa pupuk, layanan mesin, dan pakan impor. Hasil produksi tanaman dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk sektor ternak, sementara limbah ternak, seperti kotoran, digunakan sebagai biomassa untuk menghasilkan energi terbarukan dan meningkatkan karbon tanah melalui kompos. Selain itu, energi terbarukan ini juga mendukung infrastruktur penting, seperti gudang penyimpanan dingin, yang membantu menjaga kualitas hasil pertanian dan produk pangan.

Gambar 1 ini menggambarkan ekonomi sirkular di mana limbah dari sektor tanaman dan ternak diolah kembali menjadi sumber energi dan pupuk, sehingga mengurangi emisi karbon dan limbah. Proses ini sejalan dengan konsep bioenergi dan prinsip keberlanjutan (Toplicean *et al.*, 2024). Pemanfaatan biomassa, efisiensi konversi energi, serta pengelolaan limbah secara terintegrasi memungkinkan sistem ini mendukung produktivitas pertanian sekaligus menjaga keseimbangan ekologis. Model tersebut juga mencerminkan tantangan dan solusi yang dibahas dalam dokumen, seperti kebutuhan akan infrastruktur energi yang efisien, pengelolaan karbon tanah, dan penerapan prinsip ekonomi rendah emisi dalam pertanian modern. Dengan pendekatan seperti ini, sektor pertanian dapat berjalan secara berkelanjutan tanpa mengabaikan keseimbangan antara kebutuhan pangan dan kelestarian lingkungan (Béné *et al.*, 2019).



Gambar 2. Kategori energi terbarukan dari pertanian

Gambar 2 mengilustrasikan berbagai kategori utama sumber energi terbarukan dengan fokus pada kontribusi sektor pertanian dalam mendukung transisi menuju energi berkelanjutan. Energi terbarukan dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu bioenergi dan sumber energi terbarukan lainnya. Bioenergi melibatkan pemanfaatan biomassa yang bersumber dari berbagai sektor, seperti limbah pertanian, limbah dari industri pengolahan makanan, tanaman energi khusus, biomassa laut, biomassa hutan, limbah tempat pembuangan akhir, dan air limbah perkotaan (Syska, 2022). Kategori ini menekankan peran strategis sektor pertanian dalam menyediakan bahan baku untuk bioenergi, termasuk produksi biogas, bioetanol, dan biodiesel, yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Selain itu, pengembangan tanaman energi khusus menunjukkan potensi budidaya pertanian untuk mendukung ketahanan energi berkelanjutan (Gorjian *et al.*, 2022).

Di sisi lain, kelompok sumber energi terbarukan lainnya mencakup teknologi seperti energi angin, energi surya (baik melalui panel fotovoltaik, agrivoltaik, maupun energi termal surya), energi air kecil (*small hydro plants*), serta sumber daya laut seperti energi gelombang, pasang surut, energi panas bumi, dan energi angin lepas pantai. Pendekatan agrivoltaik menjadi salah satu inovasi kunci, mengombinasikan pembangkitan energi surya dengan aktivitas pertanian untuk meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan hasil panen secara bersamaan (Agostini *et al.*, 2021).

Penekanan pada bioenergi dan diversifikasi sumber energi terbarukan ini sejalan dengan pembahasan tentang pemanfaatan limbah pertanian untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan efisiensi energi rendah karbon (Bathaei & Štreimikienė, 2023). Gambar 2 ini memberikan representasi visual yang relevan untuk memahami peluang

menciptakan sistem energi sirkular berbasis pertanian yang tidak hanya rendah emisi, tetapi juga mendukung efisiensi sumber daya. Implementasi pendekatan ini membutuhkan kerjasama lintas sektor dan inovasi berkelanjutan untuk mencapai tujuan energi terbarukan global.

A.1. Biomassa

Pemanfaatan teknologi energi terbarukan di sektor pertanian memainkan peran sentral dalam mendorong transisi dari bahan bakar fosil menuju sumber daya yang lebih berkelanjutan (Kalair *et al.*, 2021). Salah satu teknologi yang paling relevan adalah penggunaan biomassa, yang terdiri atas limbah organik hasil pertanian seperti sekam padi, jerami, dan residu tanaman lainnya. Dengan memanfaatkan sumber daya ini, sektor pertanian dapat mengurangi limbah organik sekaligus menciptakan energi bersih yang dapat menggantikan bahan bakar fosil konvensional. Biomassa memiliki potensi besar dalam sistem energi terbarukan karena ketersediaannya yang melimpah dan mudah diakses di daerah perdesaan (Mahapatra *et al.*, 2021). Teknologi termokimia, seperti pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran langsung, telah memungkinkan konversi limbah biomassa menjadi bioenergi. Pirolisis mengubah biomassa menjadi biochar, bio-oil, dan gas sintetis, yang semuanya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Sementara itu, menurut Tezer *et al.* (2022), gasifikasi menghasilkan gas sintetis (syngas) dengan kandungan energi tinggi, yang dapat digunakan untuk pembangkitan listrik atau bahan bakar industri.

Konversi biomassa dalam sistem *co-firing* pada pembangkit listrik menjadi langkah strategis untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. *Co-firing* adalah proses pencampuran biomassa dengan batu bara dalam pembangkit listrik termal, yang tidak hanya mengurangi emisi karbon tetapi juga memanfaatkan limbah biomassa yang melimpah (Liu *et al.*, 2023). Dengan teknologi ini, efisiensi sistem pembangkitan energi meningkat, sementara emisi karbon dapat ditekan secara signifikan.

Tidak hanya sebagai energi, biomassa juga dapat dimanfaatkan untuk sistem pertanian berkelanjutan melalui aplikasi langsung sebagai bahan pupuk organik. Limbah hasil pirolisis, seperti biochar, dapat meningkatkan kualitas tanah dengan memperbaiki kapasitas retensi air dan mengembalikan kandungan karbon dalam tanah (Li *et al.*, 2021). Hal ini menjadikan biomassa sebagai solusi ganda, yaitu penghasil energi terbarukan sekaligus pendukung praktik pertanian yang ramah lingkungan.

Namun demikian, tantangan terhadap implementasi teknologi biomassa perlu diperhatikan. Kendala utama meliputi biaya awal yang tinggi untuk infrastruktur pengolahan, ketersediaan teknologi yang terbatas di beberapa daerah, serta kurangnya pengetahuan dan akses bagi petani kecil (Tagwi & Chipfupa, 2023). Meski demikian, dukungan pemerintah melalui kebijakan insentif dan subsidi dapat mempercepat adopsi teknologi ini. Integrasi teknologi berbasis data, seperti pemodelan energi biomassa menggunakan kecerdasan buatan (AI), juga menawarkan peluang besar untuk mengoptimalkan penggunaan biomassa di sektor pertanian, meningkatkan efisiensi energi, dan mendukung keberlanjutan sistem.

A.2. Agrivoltaik

Agrivoltaik merupakan pendekatan inovatif yang mengintegrasikan produksi energi surya dengan aktivitas pertanian, menciptakan sistem penggunaan lahan ganda yang efisien dan berkelanjutan. Dalam teknologi ini, panel surya ditempatkan di atas lahan pertanian, memungkinkan sinergi antara kebutuhan energi dan kebutuhan lahan pertanian untuk produksi pangan. Dengan menempatkan panel surya secara strategis, teknologi agrivoltaik tidak hanya menghasilkan listrik tetapi juga memberikan naungan parsial bagi tanaman, yang dapat melindungi mereka dari panas berlebihan dan mengurangi evaporasi air, dan agrivoltaik terletak pada kemampuannya untuk mengoptimalkan penggunaan lahan. Di daerah dengan intensitas iradiasi surya tinggi, penggunaan panel surya dapat menurunkan stres termal pada tanaman, serta meningkatkan produktivitas. Studi Gorjian *et al.* (2022) menunjukkan bahwa di bawah kondisi agrivoltaik, tanaman seperti tomat, paprika, atau gandum dapat mencapai hasil panen lebih baik dibandingkan dengan lahan yang terekspos langsung

sinar matahari intensif. Naungan dari panel surya juga berkontribusi terhadap konservasi air dengan mengurangi tingkat penguapan pada tanah (Wu *et al.*, 2022).

Selain produktivitas pertanian, agrivoltaik memberikan dampak positif dalam hal ketersediaan energi terbarukan untuk masyarakat perdesaan. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat digunakan untuk keperluan irigasi, pengeringan, pendinginan hasil panen, dan bahkan meningkatkan akses energi di masyarakat desa. Teknologi ini secara langsung menjembatani kesenjangan energi, terutama di daerah yang menghadapi keterbatasan akses listrik (Syska, 2022).

Namun demikian, penerapan tidak lepas dari tantangan teknis dan ekonomi. Pengaturan panel surya yang optimum untuk memastikan penetrasi cahaya yang cukup bagi tanaman membutuhkan desain yang teliti (Al-Shahri *et al.*, 2021). Investasi awal yang tinggi juga sering menjadi hambatan bagi petani kecil untuk mengadopsi teknologi ini. Meskipun demikian, dukungan kebijakan pemerintah, insentif, dan kerjasama antara sektor publik dan swasta dapat mempercepat adopsi agrivoltaik sebagai strategi utama dalam memajukan sektor pertanian berkelanjutan.

Dengan meningkatnya fokus pada rendah karbon dan keberlanjutan, agrivoltaik menjadi salah satu teknologi kunci dalam mendukung transformasi sektor pertanian. Kombinasi antara penghasil energi dan produksi pangan ini menunjukkan jalan bagi pertanian modern yang lebih efisien, produktif, dan berwawasan lingkungan (Çakmakçı *et al.*, 2023). Dengan inovasi lanjutan dan peningkatan efisiensi desain, agrivoltaik memiliki potensi besar untuk berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan global.

A.3. Produksi Bioenergi

Produksi bioenergi merupakan salah satu pendekatan strategis yang menggunakan limbah pertanian dan biomassa sebagai sumber energi terbarukan. Teknologi seperti digester anaerobik telah terbukti efektif untuk mengolah limbah ternak dan biomassa cair menjadi biogas, terutama metana, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar atau diubah menjadi energi listrik (Kabeyi, & Olanrewaju, 2022). Proses ini menawarkan solusi ganda: pengelolaan limbah organik yang lebih efisien sekaligus pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Digester anaerobik bekerja dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam kondisi bebas oksigen untuk mengurai bahan organik, menghasilkan biogas dan sisa biomassa yang dapat digunakan sebagai pupuk organik (Zamri *et al.*, 2021). Teknologi ini sangat cocok diterapkan di daerah perdesaan dengan potensi biomassa melimpah, seperti limbah ternak, residu tanaman, dan sisa hasil panen. Selain mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dari limbah pertanian, energi yang dihasilkan melalui digester anaerobik dapat dimanfaatkan langsung untuk kebutuhan domestik atau industri pertanian, seperti pemanas rumah kaca dan irigasi berbasis energi terbarukan.

Di sisi lain, biorefineri modern telah menjadi pusat transformasi biomassa menjadi berbagai produk biofuel bernilai tinggi, termasuk bioetanol, biodiesel, dan bioplastik. Biorefineri mengintegrasikan teknologi canggih untuk mengoptimalkan pemanfaatan semua komponen biomassa sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular (Velvizhi *et al.*, 2022). Dalam sektor pertanian, bioetanol yang diproduksi dari biomassa lignoselulosa, seperti sekam padi atau jerami, tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi tetapi juga membuka peluang tambahan pendapatan bagi petani (Khan *et al.*, 2022).

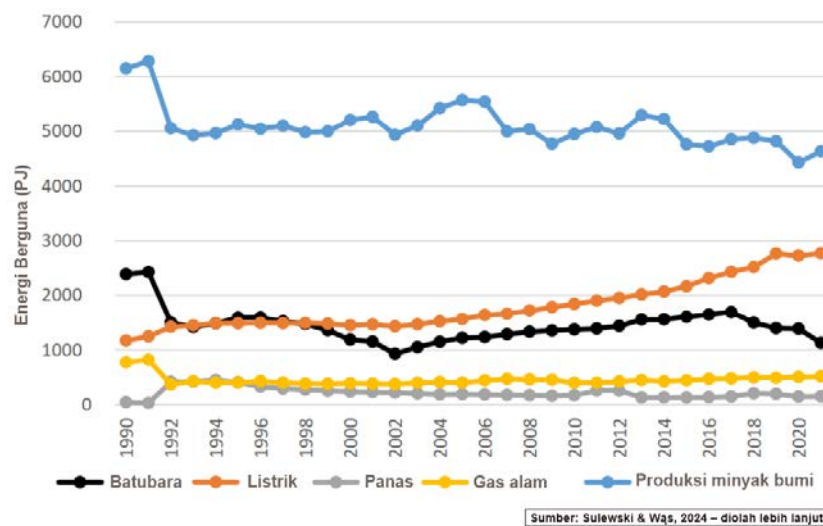
Selain menghasilkan energi, produk samping dari proses bioenergi memiliki manfaat di bidang pertanian. Biochar yang dihasilkan dari pirolisis, dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas tanah dan mengurangi pencemaran logam berat di lahan pertanian. Produk limbah dari digester anaerobik juga dapat digunakan sebagai pupuk organik kaya nutrisi, meningkatkan siklus karbon alami dan produktivitas tanah (Chojnacka & Moustakas, 2024). Hal ini menunjukkan potensi

besar bioenergi sebagai solusi holistik yang tidak hanya mendukung keberlanjutan energi tetapi juga efisiensi pertanian yang lebih tinggi.

Meski demikian, implementasi produksi bioenergi menghadapi beberapa kendala, seperti biaya infrastruktur awal yang tinggi dan kurangnya keahlian teknis di kalangan petani. Untuk mengatasi tantangan ini, perlu ada insentif pemerintah, kebijakan yang mendukung, serta transfer teknologi melalui kerjasama antara akademisi dan industri. Dengan pendekatan yang holistik, produksi bioenergi dapat memperkuat ketahanan energi di sektor pertanian, sekaligus mendukung transisi menuju pembangunan rendah karbon dan keberlanjutan global (Kwakye *et al.*, 2024).

B. Evaluasi Efisiensi dan Dampak Lingkungan Teknologi Energi

Teknologi energi terbarukan memberikan dampak signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi di sektor pertanian, sekaligus mengurangi emisi karbon. Namun demikian, setiap teknologi memiliki profil efisiensi dan dampak lingkungan yang bervariasi.



Gambar 3. Penggunaan energi global di bidang pertanian pada periode 1990–2021 menurut pembawa energi (input langsung) (Sulewski, P. & Wąs, 2024 – diolah lebih lanjut)

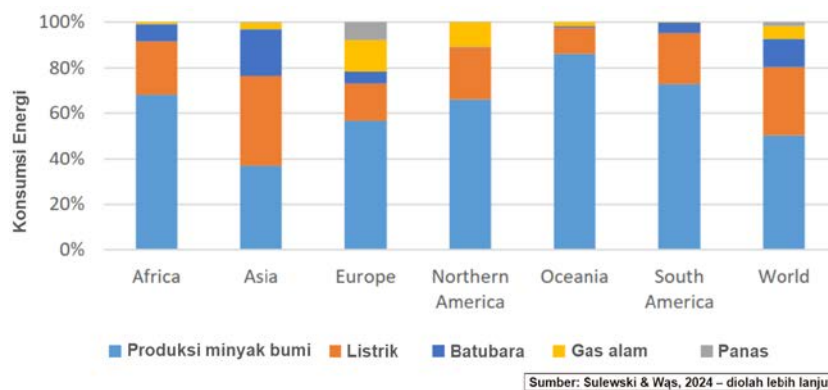
Gambar 3 menjelaskan dinamika penggunaan energi global di sektor pertanian berdasarkan berbagai jenis sumber energi selama periode 1990 hingga 2021. Jenis-jenis pembawa energi yang dianalisis meliputi batubara, listrik, panas, gas alam, dan produksi minyak bumi, dengan nilai energi berguna dinyatakan dalam petajoule (PJ).

Secara umum, terlihat tren yang kontras antar jenis energi. Penggunaan produksi minyak bumi menunjukkan penurunan tajam pada awal 1990-an dari lebih dari 6.000 PJ menjadi sekitar 4.000 PJ pada tahun 1992, kemudian relatif stabil dengan sedikit fluktuasi hingga 2021. Hal ini menunjukkan penurunan ketergantungan sektor pertanian terhadap minyak bumi seiring dengan perubahan pola konsumsi energi.

Sementara itu, konsumsi listrik terus meningkat secara konsisten dari 1990 hingga 2021. Kenaikan ini menunjukkan bahwa sektor pertanian semakin banyak menggunakan teknologi yang membutuhkan listrik sebagai sumber energi utama. Konsumsi listrik meningkat dari kurang dari 1.000 PJ pada tahun 1990 menjadi hampir 3.000 PJ pada tahun 2021. Tren ini dapat mencerminkan adopsi teknologi modern seperti sistem irigasi bertenaga listrik, penyimpanan hasil panen yang melibatkan pendinginan, dan mekanisasi lainnya.

Penggunaan batubara menunjukkan penurunan pada awal periode dan kemudian stabil pada tingkat rendah dibandingkan dengan sumber energi lainnya. Sebaliknya, konsumsi panas relatif stabil di bawah 1.000 PJ sepanjang periode pengamatan, menandakan bahwa penggunaannya tidak terlalu signifikan di sektor pertanian dibandingkan dengan listrik atau minyak bumi.

Penggunaan gas alam juga mengalami tren stabil dengan angka konsumsi lebih rendah dibandingkan listrik, namun konsisten selama periode pengamatan. Hal ini mungkin mengindikasikan keterbatasan infrastruktur untuk distribusi gas alam atau belum maksimalnya penerapan gas alam sebagai sumber energi di bidang pertanian (Ahmad & Zhang, 2020).



Gambar 4. Struktur penggunaan energi di bidang pertanian pada tahun 2021 menurut pembawa energi menurut FAOSTAT (penggunaan langsung) (Sulewski, P. & Wąs, 2024 – diolah lebih lanjut)

Gambar 4 menunjukkan struktur konsumsi energi di sektor pertanian pada tahun 2021 berdasarkan jenis pembawa energi di berbagai kawasan dunia, menurut data FAOSTAT. Secara umum, minyak bumi menjadi sumber energi dominan di hampir semua kawasan, terutama di Afrika, Asia, dan Amerika Selatan. Di Afrika, konsumsi energi didominasi hampir sepenuhnya oleh minyak bumi, dengan kontribusi yang sangat kecil dari listrik dan hampir tidak ada penggunaan batubara, gas alam, atau panas. Asia menunjukkan pola yang lebih beragam, dengan minyak bumi tetap dominan, namun listrik, batubara, dan gas alam juga berkontribusi secara signifikan.

Di Eropa, konsumsi energi lebih terdiversifikasi, dengan listrik menjadi sumber energi utama, diikuti oleh gas alam dan minyak bumi, sementara penggunaan batubara dan panas relatif kecil. Pola serupa juga terlihat di Oceania, di mana listrik dan minyak bumi mendominasi, disertai kontribusi cukup besar dari gas alam. Di Amerika Utara, minyak bumi dan gas alam menjadi sumber energi terbesar, diikuti oleh listrik, sementara penggunaan batubara dan panas hampir tidak terlihat. Sementara itu, di Amerika Selatan, minyak bumi tetap menjadi pembawa energi utama, disertai penggunaan listrik dalam jumlah signifikan dan kontribusi kecil dari gas alam.

Secara global, penggunaan energi di sektor pertanian didominasi oleh minyak bumi, diikuti oleh listrik dan gas alam, dengan penggunaan batubara dan panas yang relatif kecil. Kawasan seperti Eropa dan Oceania menunjukkan diversifikasi energi yang lebih baik, sedangkan kawasan seperti Afrika masih sangat bergantung pada minyak bumi sebagai sumber energi utama. Hal ini mencerminkan perbedaan tingkat pemanfaatan teknologi dan infrastruktur energi di berbagai kawasan dunia (Saeed & Siraj, 2024).

B.1. Efisiensi Energi

Agrivoltaik merupakan teknologi yang mampu mengintegrasikan produksi energi surya dengan kegiatan pertanian, memberikan manfaat signifikan pada efisiensi energi. Panel surya yang

ditempatkan di atas lahan pertanian tidak hanya menghasilkan energi tetapi juga memberikan naungan yang mengurangi stres termal pada tanaman (Agostini *et al.*, 2021). Hal ini terbukti meningkatkan hasil panen di beberapa jenis tanaman, terutama di daerah dengan intensitas matahari tinggi. Penelitian Soto-Gómez (2024) menunjukkan bahwa agrivoltaik mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan hingga 60%, yang memberikan kontribusi langsung pada pengurangan intensitas emisi karbon sektor pertanian.

Teknologi bioenergi seperti digester anaerobik, memberikan solusi yang efektif untuk mengolah limbah ternak dan biomassa organik menjadi sumber energi terbarukan berupa biogas (Alengebawy *et al.*, 2024). Dengan menggunakan aktivitas mikroba anaerobik, proses ini mengubah limbah menjadi metana yang kaya energi, yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik atau bahan bakar rumah tangga. Efisiensi teknologi ini terletak pada kemampuannya mendukung ekonomi sirkular, dimana limbah diubah menjadi energi, sementara sisa digester dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Penggunaan agrivoltaik tidak hanya meningkatkan produksi energi, tetapi juga membantu konservasi sumber daya air. Panel surya yang dipasang secara strategis mengurangi evaporasi air dari tanah dan tanaman, yang sangat bermanfaat di daerah kering. Selain itu, sistem ini memungkinkan kombinasi teknologi irigasi presisi, sehingga memaksimalkan efisiensi penggunaan air di sektor pertanian. Dengan demikian, agrivoltaik mendukung tidak hanya transisi energi tetapi juga keberlanjutan sistem air global (Gorjian *et al.*, 2022).

B.2. Dampak Lingkungan

Meskipun memberikan manfaat besar, agrivoltaik memiliki potensi dampak negatif terhadap iklim lokal. Panel surya yang dipasang di atas lahan pertanian dapat mengubah pola distribusi cahaya dan suhu di bawahnya. Beberapa tanaman mungkin mengalami gangguan pertumbuhan akibat kurangnya intensitas cahaya. Oleh karena itu, desain sistem agrivoltaik yang optimum diperlukan untuk memastikan bahwa tanaman mendapat pencahayaan yang cukup sambil tetap memaksimalkan produksi energi (Soto-Gómez, 2024).

Teknologi digester anaerobik menawarkan pengurangan yang signifikan pada limbah organik dan emisi GRK dibandingkan dengan pembuangan limbah konvensional. Namun demikian, jika pengelolaannya tidak tepat, proses ini juga dapat menghasilkan emisi metana atau karbon dioksida yang tidak terkendali. Oleh karena itu, pemantauan yang cermat terhadap proses fermentasi anaerobik diperlukan untuk meminimumkan risiko tersebut dan memastikan bahwa teknologi ini tetap mendukung tujuan keberlanjutan (Zamri *et al.*, 2021).

Produk sampingan dari teknologi bioenergi, seperti biochar, memiliki manfaat lingkungan yang besar. Biochar yang dihasilkan melalui proses pirolisis tidak hanya dapat meningkatkan struktur tanah tetapi juga mengurangi pencucian nutrisi dan menyimpan karbon di dalam tanah untuk jangka panjang (Li *et al.*, 2021). Namun demikian, penyimpanan dan aplikasi biochar harus dilakukan secara hati-hati agar tidak mencemari ekosistem atau menyebabkan perubahan kimia tanah yang tidak diinginkan.

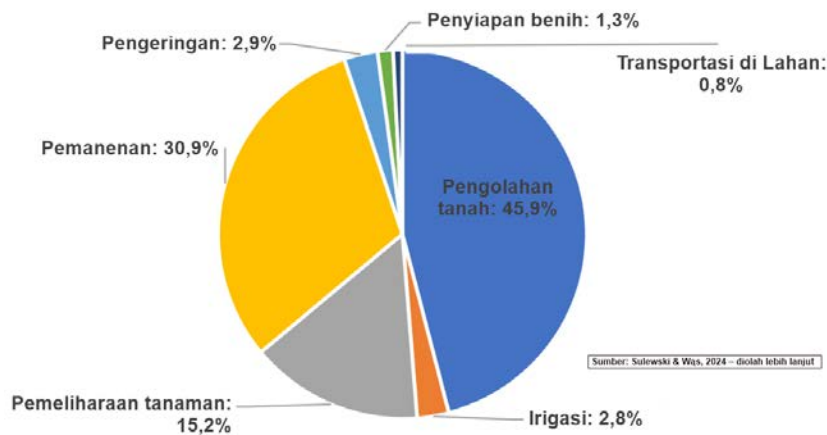
B.3. Integrasi Teknologi untuk Efisiensi Energi dan Ketahanan Pangan

Guna memastikan bahwa teknologi energi terbarukan tidak merusak ekosistem lokal, perlu dilakukan pendekatan berbasis ekologi dalam perancangannya. Agrivoltaik harus mempertimbangkan kebutuhan spesifik tanaman dan jenis tanah lokal, sementara sistem digester anaerobik harus dirancang untuk menangani limbah secara aman tanpa memengaruhi kualitas air tanah atau udara (Gorjian *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022).

Integrasi antara teknologi energi terbarukan, seperti agrivoltaik dengan digester anaerobik, berpotensi menciptakan sinergi yang lebih baik dalam efisiensi energi. Energi yang dihasilkan dari agrivoltaik dapat digunakan untuk mendukung infrastruktur bioenergi, seperti pemanasan reaktor digester anaerobik (Soto-Gómez, 2024). Sistem ini tidak hanya memperbaiki efisiensi energi tetapi juga memperkuat ketahanan energi lokal.

Kendati teknologi energi terbarukan menunjukkan potensi besar dalam sektor pertanian, adopsinya masih menghadapi tantangan, seperti investasi awal yang mahal dan kebutuhan akan pengetahuan teknis yang mendalam. Namun demikian, dengan dukungan kebijakan pemerintah yang kuat, insentif ekonomi, dan penyuluhan kepada petani, hambatan ini dapat diatasi (Kwakye *et al.*, 2024).

Teknologi energi terbarukan jika dirancang dan diimplementasikan dengan baik, memiliki potensi untuk membawa sektor pertanian ke arah keberlanjutan yang lebih tinggi. Dengan menggabungkan efisiensi energi, konservasi sumber daya, dan pengurangan emisi, teknologi seperti agrivoltaik dan bioenergi dapat menjadi pilar utama dalam transisi energi global, mendukung pencapaian target *net-zero emissions* pada sektor pertanian (Roxani *et al.*, 2023).



Gambar 5. Struktur masukan energi langsung dalam bahan bakar diesel yang dikonsumsi untuk produksi tanaman (Sulewski, P. & Wąs, 2024 – diolah lebih lanjut)

Gambar 5 menunjukkan struktur konsumsi energi langsung dari bahan bakar diesel dalam berbagai aktivitas yang terkait dengan produksi tanaman. Aktivitas dengan konsumsi energi terbesar adalah pengolahan tanah, yang mencapai 45,9% dari total energi yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan tanah, seperti pembajakan, penggemburan, dan persiapan lahan lainnya, membutuhkan energi yang sangat besar dibandingkan aktivitas lain.

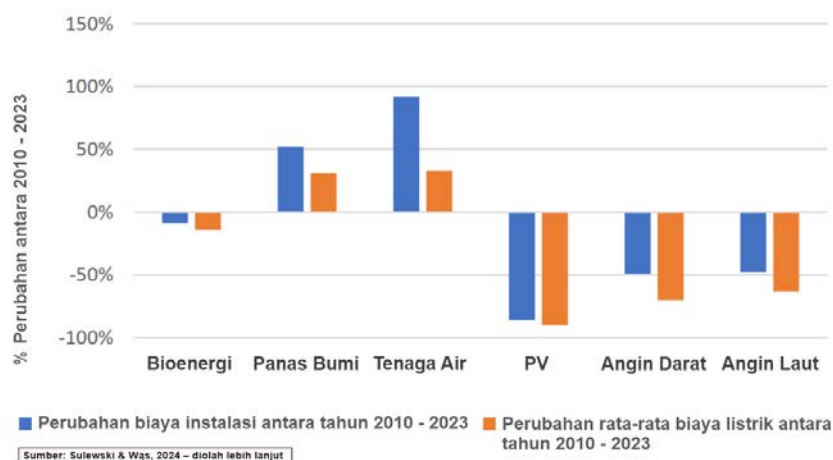
Aktivitas pemanenan menempati posisi kedua dengan kontribusi sebesar 30,9%. Proses ini melibatkan penggunaan mesin-mesin berat, seperti *combine harvester*, yang memerlukan bahan bakar diesel dalam jumlah signifikan. Pemeliharaan tanaman, seperti pemupukan dan pengendalian hama, menyumbang 15,2% dari total konsumsi energi, menunjukkan bahwa perawatan tanaman juga memerlukan input energi yang cukup besar.

Irigasi dan pengeringan masing-masing menyumbang 2,8% dan 2,9%. Meskipun kontribusinya relatif kecil, energi yang digunakan untuk irigasi bisa signifikan dalam sistem pertanian yang sangat bergantung pada irigasi buatan. Pengeringan pascapanen biasanya melibatkan mesin pengering atau alat berbahan bakar diesel. Aktivitas persiapan benih hanya menyumbang 1,3%, sementara transportasi di lahan memiliki kontribusi terkecil, yaitu 0,8%.

Secara keseluruhan, Gambar 5 menunjukkan bahwa sebagian besar energi diesel dalam produksi tanaman digunakan untuk aktivitas mekanis yang berat seperti pengolahan tanah dan pemanenan. Hal ini memberikan indikasi pentingnya optimisasi efisiensi energi dalam aktivitas-aktivitas ini untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dalam sektor pertanian (Al-Shahri *et al.*, 2021).

C. Hambatan terhadap Implementasi Teknologi Energi Terbarukan di Pertanian

Penerapan teknologi energi terbarukan di sektor pertanian menjanjikan transformasi besar dalam meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan, namun pelaksanaannya tidak terlepas dari berbagai tantangan. Hambatan ini mencakup kendala teknis terkait instalasi dan pemeliharaan infrastruktur, hambatan ekonomi seperti tingginya biaya investasi awal, hingga tantangan sosial berupa kurangnya pengetahuan petani dan dukungan kebijakan yang belum memadai (Xie & Huang, 2021).



Gambar 6. Persentase perubahan biaya pemasangan dan rata-rata biaya listrik dari sistem energi terbarukan tertentu dalam periode 2010–2023

Gambar 6 menunjukkan perubahan biaya pemasangan dan rata-rata biaya listrik dari berbagai sistem energi terbarukan dalam periode 2010–2023. Teknologi bioenergi cenderung stabil, dengan perubahan biaya pemasangan dan rata-rata biaya listrik yang minimal, menunjukkan perkembangan yang lambat dalam efisiensi biaya. Di sisi lain, teknologi panas bumi mengalami peningkatan biaya pemasangan hingga sekitar 50%, meskipun rata-rata biaya listriknya sedikit menurun, yang mungkin mencerminkan efisiensi operasional yang lebih baik. Untuk tenaga air, terdapat peningkatan signifikan pada biaya pemasangan sebesar 100%, disertai peningkatan rata-rata biaya listrik, yang mengindikasikan investasi besar untuk infrastruktur baru.

Sebaliknya, teknologi fotovoltaik (PV) menunjukkan penurunan drastis pada biaya pemasangan hingga -80%, diikuti penurunan signifikan pada rata-rata biaya listrik, menjadikan PV salah satu teknologi paling kompetitif di sektor energi terbarukan. Teknologi angin darat juga mengalami penurunan biaya pemasangan sebesar -40% dan diikuti penurunan rata-rata biaya listrik, mencerminkan efisiensi yang terus meningkat dalam pengembangan dan operasionalnya. Sementara itu, angin laut menunjukkan penurunan biaya pemasangan dan rata-rata biaya listrik, meskipun penurunannya lebih kecil dibandingkan angin darat karena tantangan teknologi yang lebih kompleks. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan bahwa energi terbarukan, terutama PV dan angin darat, semakin kompetitif secara ekonomi dengan penurunan biaya yang signifikan, sehingga memperkuat perannya sebagai alternatif yang layak terhadap energi fosil.

Teknologi energi terbarukan seperti digester anaerobik dan agrivoltaik, menghadapi tantangan teknis yang memengaruhi implementasinya di sektor pertanian. Instalasi sistem digester

anaerobik memerlukan infrastruktur yang rumit dan pemeliharaan rutin untuk menjaga efisiensinya. Kegagalan dalam pemeliharaan dapat menyebabkan penurunan produksi biogas dan kebocoran metana, yang berpotensi meningkatkan emisi gas rumah kaca. Di sisi lain, agrivoltaik menghadapi tantangan dalam desain yang optimum untuk mengakomodasi kebutuhan pencahayaan tanaman, jenis tanah, serta cuaca yang bervariasi. Desain yang tidak sesuai dapat mengurangi produktivitas tanaman dan efektivitas produksi energi surya, sehingga berisiko menggagalkan tujuan sistem penggunaan lahan ganda (Wu *et al.*, 2022).

Salah satu kendala terbesar dalam adopsi teknologi energi terbarukan adalah tingginya biaya awal investasi. Pembangunan infrastruktur seperti biorefineri atau instalasi panel surya pada agrivoltaik membutuhkan modal yang signifikan, yang sering kali tidak terjangkau oleh petani kecil, terutama di negara berkembang. Selain itu, kurangnya insentif dan akses terhadap pendanaan hijau memperlambat skala implementasi teknologi ini (Syska & Ropiudin, 2023). Bahkan dengan dukungan pemerintah, risiko finansial terkait operasi dan pemeliharaan teknologi energi terbarukan masih menjadi kekhawatiran utama bagi banyak petani (Kwakye *et al.*, 2024).

Kurangnya pengetahuan tentang manfaat energi terbarukan di kalangan petani sering kali menjadi penghambat signifikan dalam adopsi teknologi ini. Banyak petani enggan mencoba teknologi baru karena kurangnya informasi mengenai efisiensi jangka panjang dan manfaat lingkungan yang dihasilkan. Hambatan kultural terhadap perubahan juga menjadi faktor utama, terutama pada masyarakat pertanian tradisional, yang cenderung mengandalkan metode konvensional yang sudah lama digunakan. Lebih lanjut, kebijakan pemerintah yang belum sepenuhnya mendukung, baik melalui kebijakan maupun insentif ekonomi, memperlambat diseminasi teknologi energi terbarukan ke sektor pertanian (Kwakye *et al.*, 2024).

Peran pemerintah menjadi sangat penting dalam mengatasi tantangan tersebut, tetapi dalam banyak kasus, kebijakan yang mendukung masih bersifat sporadis dan kurang konsisten. Program dukungan teknologi sering kali tidak mencakup seluruh siklus implementasi, mulai dari instalasi hingga operasional jangka panjang. Kebijakan yang berfokus pada subsidi teknologi, pelatihan bagi petani, dan pendanaan mikro yang dapat diakses dengan mudah dapat membantu mengatasi hambatan-hambatan ini dan mempercepat adopsi teknologi energi terbarukan (Xie & Huang, 2021).

Guna mengatasi tantangan ini, diperlukan pendekatan terpadu yang mencakup aspek teknis, ekonomi, dan sosial. Pengembangan infrastruktur teknologi harus didukung dengan penelitian untuk menyesuaikan teknologi dengan kondisi lokal. Di sisi ekonomi, perlu diperkuat dukungan finansial melalui program pembiayaan hijau, insentif pajak, dan mekanisme pengurangan risiko. Dari segi sosial, penyuluhan pertanian berbasis energi dan edukasi berkelanjutan dapat mengubah persepsi petani terhadap energi terbarukan, sehingga meningkatkan adopsi teknologi ini secara lebih luas (Tagwi & Chipfupa, 2023).

D. Integrasi Teknologi Energi yang Berkelanjutan

Peningkatan kapasitas dan pelatihan merupakan langkah fundamental untuk mendorong adopsi teknologi energi terbarukan di sektor pertanian. Petani perlu diberikan pemahaman tentang manfaat ekonomi, lingkungan, dan efisiensi yang dapat diperoleh melalui teknologi seperti agrivoltaik, digester anaerobik, dan biorefineri. Program pendidikan dan penyuluhan pertanian harus dirancang secara strategis, mencakup pelatihan langsung, pembuatan modul pembelajaran berbasis digital, serta demonstrasi lapangan untuk memperlihatkan keberhasilan implementasi teknologi ini. Pendekatan berbasis komunitas dapat digunakan untuk meningkatkan keterlibatan petani dan mempercepat diseminasi pengetahuan ke daerah-daerah terpencil (Xie & Huang, 2021).

Dukungan keuangan melalui subsidi dan insentif menjadi krusial untuk mengatasi tingginya biaya awal implementasi teknologi energi terbarukan. Pemerintah bersama lembaga internasional, dapat

menawarkan skema pendanaan inovatif, seperti kredit bersubsidi atau mekanisme pembayaran berbasis hasil energi. Selain itu, insentif pajak bagi petani dan investor di sektor pertanian terbarukan dapat mendorong investasi dan mempercepat transformasi energi (Kwakye *et al.*, 2024). Salah satunya yaitu pemberian subsidi untuk instalasi panel surya di sistem agrivoltaik atau pembangunan reaktor digester anaerobik dapat menurunkan hambatan finansial secara signifikan (Soto-Gómez, 2024).

Integrasi kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) menawarkan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi operasional dan desain teknologi energi terbarukan (Sayed *et al.*, 2023). AI dapat digunakan untuk menganalisis pola penggunaan energi di sektor pertanian dan mengidentifikasi titik optimum untuk integrasi teknologi. Pembelajaran mesin dapat memprediksi output biogas berdasarkan variasi biomassa, memungkinkan pengelolaan reaktor digester yang lebih presisi (Zou *et al.*, 2024). Dengan dukungan teknologi berbasis data, efisiensi produksi bioenergi dan pemanfaatan agrivoltaik dapat dioptimalkan secara signifikan, mempercepat pencapaian tujuan keberlanjutan.

Kerjasama antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk petani, akademisi, sektor swasta, dan pemerintah, menjadi kunci untuk memfasilitasi transfer teknologi dan penerapan inovasi di lapangan. Kerjasama semacam ini dapat mencakup penelitian bersama untuk mengadaptasi teknologi dengan kebutuhan lokal, pengembangan infrastruktur yang mendukung, serta sosialisasi untuk meningkatkan kesadaran publik terhadap manfaat energi terbarukan. Model kerjasama ini tidak hanya mempercepat implementasi, tetapi juga memastikan keberlanjutan jangka panjang dari teknologi yang diterapkan (Kwakye *et al.*, 2024).

Kebijakan yang mendukung teknologi energi terbarukan harus terintegrasi dengan mekanisme pendanaan hijau, seperti obligasi hijau (*green bonds*) atau program pembiayaan berbasis keberlanjutan. Melalui skema ini, pemerintah dapat menarik investasi dari sektor swasta untuk membangun infrastruktur energi terbarukan di sektor pertanian. Selain itu, kebijakan perlu didesain untuk mendorong sinergi antara efisiensi energi, konservasi lingkungan, dan inklusi sosial, memberikan manfaat yang lebih luas bagi masyarakat perdesaan (Umoh *et al.*, 2024).

Dengan strategi yang holistik dan kolaboratif, teknologi energi terbarukan dapat menjadi pilar transformasi pertanian menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Dukungan kebijakan, inovasi berbasis teknologi, dan pemberdayaan petani akan mempercepat transisi ini. Jika dikelola dengan baik, integrasi teknologi ini tidak hanya akan mendukung keberlanjutan pertanian tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap pencapaian target global, termasuk *net-zero emissions*.

KESIMPULAN

Ulasan kritis ini mengungkapkan sejumlah temuan penting terkait konsumsi energi dan pemanfaatan teknologi energi terbarukan di sektor pertanian. Pertama, sektor pertanian hingga saat ini masih sangat bergantung pada energi fosil untuk mendukung berbagai aktivitasnya, mulai dari proses pengolahan tanah hingga tahap pascapanen. Namun, tren global menunjukkan adanya peningkatan pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti biomassa, energi surya, dan biogas sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan. Kedua, teknologi seperti fotovoltai (PV) dan biogas memiliki potensi besar untuk memperkuat peran sektor pertanian sebagai prosumer energi, di mana energi tidak hanya dikonsumsi, tetapi juga diproduksi. Penerapan panel surya berupa teknologi agrivoltaik memungkinkan pemanfaatan energi surya untuk kebutuhan listrik di lahan pertanian, sedangkan teknologi biogas, yang mengolah limbah organik seperti kotoran ternak, memberikan manfaat ganda melalui penyediaan energi sekaligus pengelolaan limbah yang efisien.

Namun demikian, transformasi sektor pertanian menjadi prosumer energi masih menghadapi berbagai tantangan. Tantangan tersebut meliputi kendala teknis seperti kebutuhan infrastruktur yang canggih, kendala ekonomi terkait tingginya biaya investasi awal teknologi energi terbarukan, serta kendala sosial berupa rendahnya tingkat kesadaran petani mengenai manfaat energi terbarukan. Di sisi lain, dukungan kebijakan yang belum optimal juga menjadi faktor penghambat adopsi teknologi secara luas di sektor ini. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan strategis yang mencakup peningkatan pelatihan dan penyuluhan kepada petani mengenai potensi teknologi energi terbarukan, penyediaan insentif dari pemerintah seperti subsidi atau pembiayaan lunak untuk investasi teknologi, serta integrasi teknologi modern seperti kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin guna memaksimalkan produksi energi dari sumber terbarukan. Selain itu, kerjasama antara pemerintah, sektor swasta, dan akademisi juga menjadi kunci dalam mempercepat implementasi inovasi energi di sektor pertanian.

Ulasan ini menekankan pentingnya peran sektor pertanian dalam sistem energi terbarukan yang berkelanjutan. Dengan pendekatan strategis yang terintegrasi dan dukungan multidimensi, sektor ini memiliki potensi besar untuk menjadi kontributor utama dalam mengatasi tantangan energi global sambil tetap mempertahankan fungsinya dalam produksi pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agostini, A., Colauzzi, M., & Amaducci, S. 2021. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Applied Energy*, 281, p.116102.
- Ahmad, T. & Zhang, D. 2020. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 6, pp.1973-1991.
- Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A.I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. 2024. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, pp.1-28.
- Al-Shahri, O.A., Ismail, F.B., Hannan, M.A., Lipu, M.H., Al-Shetwi, A.Q., Begum, R.A., Al-Muhsen, N.F., & Soujeri, E. 2021. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 284, p.125465.
- Bathaei, A. & Štreimikienė, D. 2023. Renewable energy and sustainable agriculture: Review of indicators. *Sustainability*, 15(19), p.14307.
- Çakmakçı, R., Salık, M.A., & Çakmakçı, S. 2023. Assessment and principles of environmentally sustainable food and agriculture systems. *Agriculture*, 13(5), p.1073.
- Chojnacka, K. & Moustakas, K. 2024. Anaerobic digestate management for carbon neutrality and fertilizer use: A review of current practices and future opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 180, p.106991.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., & Leip, A.J.N.F. 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature food*, 2(3), pp.198-209.
- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö.E., Trommsdorff, M., Kumar, N.M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S.S. 2022. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, p.112126.
- Kabeyi, M.J.B. & Olanrewaju, O.A., 2022. Biogas production and applications in the sustainable energy transition. *Journal of Energy*, 2022(1), p.8750221.
- Kalair, A., Abas, N., Saleem, M.S., Kalair, A.R., & Khan, N. 2021. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Storage*, 3(1), p.e135.

- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S.A. 2020. Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 219, pp.179-194.
- Khan, M.U., ur Rehman, M.M., Sultan, M., ur Rehman, T., Sajjad, U., Yousaf, M., Ali, H.M., Bashir, M.A., Akram, M.W., Ahmad, M., & Asif, M. 2022. Key prospects and major development of hydrogen and bioethanol production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), pp.26265-26283.
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M.P. 2022. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, p.112285.
- Kwakye, J.M., Ekechukwu, D.E., & Ogundipe, O.B. 2024. Policy approaches for bioenergy development in response to climate change: A conceptual analysis. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 12(2), pp.299-306.
- Li, L., Zhang, Y.J., Novak, A., Yang, Y., & Wang, J. 2021. Role of biochar in improving sandy soil water retention and resilience to drought. *Water*, 13(4), p.407.
- Liu, L., Memon, M.Z., Xie, Y., Gao, S., Guo, Y., Dong, J., Gao, Y., Li, A., & Ji, G. 2023. Recent advances of research in coal and biomass co-firing for electricity and heat generation. *Circular Economy*, p.100063.
- Loboguerrero, A.M., Campbell, B.M., Cooper, P.J., Hansen, J.W., Rosenstock, T., & Wollenberg, E. 2019. Food and earth systems: priorities for climate change adaptation and mitigation for agriculture and food systems. *Sustainability*, 11(5), p.1372.
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P.K. 2021. Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, p.100036.
- Majeed, Y., Khan, M.U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F., Sultan, M., & Raza, A. 2023. Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, pp.344-359.
- Mangal, P., Lakshmi, D., & Nagpal, N. 2025. Cross-Sectoral Collaborations for Advancing Renewable Energy and Conservation Goals. In *Digital Innovations for Renewable Energy and Conservation* (pp. 47-74). IGI Global.
- Morkūnas, M., Wang, Y., & Wei, J. 2024. Role of AI and IoT in Advancing Renewable Energy Use in Agriculture. *Energies*, 17(23), p.5984.
- Porshnov, D. 2022. Evolution of pyrolysis and gasification as waste to energy tools for low carbon economy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 11(1), p.e421.
- Rahman, M.M., Khan, I., Field, D.L., Techato, K., & Alameh, K. 2022. Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. *Renewable Energy*, 188, pp.731-749.
- Ropiudin, R., Romadhon, M.E., Priswanto, P., & Kuncoro, P.H. 2023. Manajemen Perencanaan Energi Listrik Kabupaten Banjarnegara Bersumber pada PLTA Mrica Menggunakan LEAP (The Low Emissions Analysis Platform). *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), pp.1-12.
- Roxani, A., Zisos, A., Sakki, G.K., & Efstratiadis, A. 2023. Multidimensional role of Agrovoltatics in era of EU green Deal: Current status and analysis of water–energy–food–land dependencies. *Land*, 12(5), p.1069.
- Saeed, S. & Siraj, T., 2024. Global Renewable Energy Infrastructure:: Pathways to Carbon Neutrality and Sustainability. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 13(2), pp.183-203.
- Sayed, E.T., Olabi, A.G., Elsaid, K., Al Radi, M., Semeraro, C., Doranehgard, M.H., Eltayeb, M.E., & Abdelkareem, M.A. 2023. Application of artificial intelligence techniques for modeling, optimizing, and controlling desalination systems powered by renewable energy resources. *Journal of Cleaner Production*, 413, p.137486.
- Soto-Gómez, D. 2024. Integration of crops, livestock, and solar panels: A review of agrivoltaic systems. *Agronomy*, 14(8), p.1824.

- Streimikiene, D., Baležentis, T., Volkov, A., Morkūnas, M., Žičkienė, A., & Streimikis, J. 2021. Barriers and drivers of renewable energy penetration in rural areas. *Energies*, 14(20), p.6452.
- Strielkowski, W., Cívín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. 2021. Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: A review. *Energies*, 14(24), p.8240.
- Sulewski, P. & Waş, A. 2024. Agriculture as Energy Prosumer: Review of Problems, Challenges, and Opportunities. *Energies*, 17(24), p.6447.
- Syska, K. & Ropiudin, R. 2023. Karakteristik Pengeringan dan Mutu Hedonik Gula Kelapa Kristal menggunakan Pengering Tipe Rak Berputar Berenergi Limbah Termal dan Biomassa. *Jurnal Agritechno*, pp.19-28.
- Syska, K. & Ropiudin, R. 2023. Study of "Green Manufacturing" on Rural Crystal Coconut Sugar SMEs. *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems-Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), pp.13-27.
- Syska, K. 2022. Analisis kualitas biobriket karbonisasi tempurung kelapa dan kulit singkong dengan perekat tepung singkong. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, 3(1), pp.19-38.
- Syska, K. 2022. Peningkatan Daya Saing melalui Penerapan Pengering Hemat Energi pada UMKM Gula Kelapa Kristal Sari Manggar, Banyumas Jawa Tengah. *Aptekmas Jurnal Pengabdian pada Masyarakat*, 5(4), pp.164-172.
- Tagwi, A. & Chipfupa, U. 2023. Participation of smallholder farmers in modern bioenergy value chains in Africa: opportunities and constraints. *BioEnergy Research*, 16(1), pp.248-262.
- Tezer, Ö., Karabağ, N., Öngen, A., Çolpan, C.Ö., & Ayol, A. 2022. Biomass gasification for sustainable energy production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(34), pp.15419-15433.
- Umoh, A.A., Ohenhen, P.E., Chidolue, O., Ngozichukwu, B., Fafure, A.V., & Ibekwe, K.I. 2024. Incorporating energy efficiency in urban planning: A review of policies and best practices. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(1), pp.83-98.
- Velvizhi, G., Balakumar, K., Shetti, N.P., Ahmad, E., Pant, K.K., & Aminabhavi, T.M. 2022. Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. *Bioresource technology*, 343, p.126151.
- Wu, C., Liu, H., Yu, Y., Zhao, W., Liu, J., Yu, H., & Yetemen, O. 2022. Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: A modeling study. *Science of the Total Environment*, 802, p.149946.
- Xie, H. & Huang, Y. 2021. Influencing factors of farmers' adoption of pro-environmental agricultural technologies in China: Meta-analysis. *Land use policy*, 109, p.105622.
- Zamri, M.F.M.A., Hasmady, S., Akhiar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A.H., Mofijur, M., Fattah, I.R., & Mahlia, T.M.I. 2021. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, p.110637.
- Zou, J., Lü, F., Chen, L., Zhang, H., & He, P. 2024. Machine learning for enhancing prediction of biogas production and building a VFA/ALK soft sensor in full-scale dry anaerobic digestion of kitchen food waste. *Journal of Environmental Management*, 371, p.123190.