



Pengembangan Teknologi Bioenergi dari Limbah Pertanian

Arief Budiono

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Fathur Rohman Dani Prasetya

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Shodiq Abdul Lathif Majid

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Danindra Arfian Putra Perdana

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Alamat: Jl. Raya Palka No.Km.3, Sindangsari, Kec. Pabuaran, Kota Serang

Korespondensi penulis: ab368@ums.ac.id

Abstract. *Agricultural waste is an abundant biomass source in Indonesia but remains underutilized. Growing energy demand and decreasing fossil fuel availability highlight the urgent need for efficient and sustainable bioenergy technologies. This study adopts a qualitative-descriptive design with a structured literature review approach. Data were collected from relevant national and international journals through Google Scholar searches, followed by content analysis to identify biomass potential, conversion technologies, and barriers to bioenergy development. This article provides a comprehensive synthesis of modern bioenergy technologies (gasification, pyrolysis, fermentation, and anaerobic digestion) integrated with Indonesia's agricultural waste context, offering a development model that has not been extensively explored in previous studies. Findings indicate that agricultural residues such as rice straw, rice husks, and corn cobs possess high energy value and can be converted into biogas, biochar, bioethanol, and biomass pellets. However, technology adoption remains limited due to farmers' low technical capacity, inadequate infrastructure, and insufficient policy support. Proper integration of technologies significantly improves energy efficiency, reduces carbon emissions, and enhances economic value for rural communities. The development of bioenergy technologies from agricultural waste holds strong potential to support national energy security and environmental sustainability. Strengthening technological capacity, improving renewable-energy literacy, and developing supportive policies are needed to accelerate implementation.*

Keywords: *Bioenergy, Agricultural Waste, Technology Development*

Abstrak. Limbah pertanian merupakan sumber biomassa yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia. Peningkatan kebutuhan energi dan penurunan ketersediaan bahan bakar fosil mendorong perlunya pengembangan teknologi bioenergi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini menggunakan desain studi kualitatif-deskriptif dengan pendekatan studi literatur terstruktur. Data dikumpulkan dari jurnal nasional dan internasional yang relevan melalui pencarian di Google Scholar, diikuti dengan analisis konten untuk mengidentifikasi potensi biomassa, teknologi konversi, serta faktor penghambat pengembangan bioenergi. Penelitian ini menghadirkan sintesis komprehensif mengenai integrasi teknologi bioenergi modern (gasifikasi, pirolisis, fermentasi, dan anaerobic digestion) dengan konteks limbah pertanian Indonesia, serta menawarkan model pengembangan yang belum dibahas secara mendalam pada penelitian sebelumnya. Hasil studi menunjukkan bahwa limbah pertanian seperti jerami padi, sekam padi, dan tongkol jagung memiliki nilai energi yang tinggi dan dapat dikonversi menjadi biogas, biochar, bioetanol, dan pellet biomassa. Namun adopsi teknologi masih terkendala oleh rendahnya kapasitas petani, keterbatasan infrastruktur, serta kurangnya dukungan kebijakan teknis. Pengintegrasian

Received Desember 30, 2022; Revised April 30, 2023; Accepted Agustus 30, 2023

**Arief Budiono, ab368@ums.ac.id*

teknologi yang tepat terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi, mengurangi emisi karbon, serta memberikan nilai tambah ekonomi bagi masyarakat pertanian. Pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian memiliki potensi besar untuk mendukung ketahanan energi dan keberlanjutan lingkungan. Diperlukan strategi penguatan teknologi, peningkatan literasi energi terbarukan, dan dukungan kebijakan terpadu untuk mempercepat implementasinya.

Kata Kunci: Bioenergi, Limbah Pertanian, Pengembangan Teknologi

LATAR BELAKANG

Indonesia sebagai negara agraris memiliki potensi biomassa yang sangat besar dan beragam, terutama yang berasal dari aktivitas pertanian (Pujotomo, 2017). Setiap tahun, jutaan ton limbah pertanian dihasilkan dari proses budidaya, panen, hingga pascapanen berbagai komoditas seperti padi, jagung, tebu, kelapa sawit, singkong, hingga tanaman hortikultura (Kasmaniar et al., 2023). Jenis limbah yang dihasilkan meliputi jerami padi, sekam, tongkol jagung, bagasse tebu, kulit singkong, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serta limbah organik lainnya. Namun, pemanfaatan limbah pertanian tersebut hingga saat ini masih sangat terbatas. Sebagian besar limbah biomassa dibiarkan membusuk atau dibakar di lahan terbuka, yang tidak hanya mencemari lingkungan, tetapi juga menyebabkan kehilangan potensi energi yang sesungguhnya sangat besar. Pembakaran biomassa di lahan terbuka telah menjadi praktik yang umum ditemukan di berbagai daerah. Aktivitas ini menghasilkan polutan berbahaya seperti partikulat PM2.5, karbon monoksida, dan senyawa organik volatil yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Selain itu, tingginya emisi karbon dari proses pembakaran tersebut memberi kontribusi terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca secara global (Tentama et al., 2018). Di sisi lain, kondisi ini mencerminkan belum optimalnya sistem pengelolaan limbah pertanian, terutama dalam konteks transformasi limbah menjadi sumber energi terbarukan.

Kebutuhan energi nasional Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, industrialisasi, dan perkembangan sektor transportasi, yang menjadi tantangan serius di tengah menurunnya cadangan bahan bakar fosil dan tingginya ketergantungan pada energi impor yang berpotensi mengancam ketahanan energi nasional (Sugiyono, 2019; Montgomery, 2017). Fluktuasi harga energi global juga berdampak pada stabilitas ekonomi dan keberlanjutan pasokan energi domestik, sehingga mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Sejalan dengan komitmen Indonesia dalam Perjanjian Paris, diversifikasi energi ditempatkan sebagai agenda prioritas dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) melalui peningkatan porsi energi baru dan terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional guna mendukung transisi menuju sistem energi rendah karbon, mitigasi perubahan iklim, dan pembangunan berkelanjutan (Mardapi, 2017; Rustaman, 2019). Dalam kerangka tersebut, pemanfaatan energi baru dan terbarukan, khususnya bioenergi, menjadi strategi penting untuk memperkuat ketahanan energi nasional. Bioenergi memiliki keunggulan sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan serta berpotensi mendorong perekonomian lokal melalui optimalisasi sumber daya domestik (Sunaryati et al., 2024). Limbah pertanian merupakan salah satu sumber bioenergi yang sangat potensial karena ketersediaannya melimpah, tidak bersaing dengan kebutuhan pangan, dan dapat dikonversi menjadi energi melalui berbagai teknologi seperti biogas, bioetanol, dan biomassa padat (Rex et al., 2023). Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan terintegrasi dalam mengkaji pemanfaatan limbah pertanian dari aspek ketersediaan bahan baku, potensi energi, serta implikasi ekonomi dan lingkungan secara simultan. Urgensi penelitian ini didorong oleh masih terbatasnya kajian komprehensif yang mengaitkan pengelolaan limbah pertanian dengan pencapaian target RUEN dan komitmen nasional penurunan emisi karbon, sehingga hasil penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah dan rekomendasi kebijakan berbasis potensi lokal.

Perkembangan teknologi bioenergi saat ini menunjukkan kemajuan yang signifikan. Berbagai teknologi konversi telah dikembangkan untuk mengubah biomassa menjadi energi yang dapat dimanfaatkan (Novita et al., 2021), seperti teknologi *anaerobic digestion* untuk menghasilkan biogas, proses pirolisis dan gasifikasi untuk menghasilkan biochar dan syngas, hingga fermentasi biomassa lignoselulosa untuk menghasilkan bioetanol (Subardi et al., 2019). Tidak hanya itu, inovasi pada aspek pra-perlakuan (pretreatment) biomassa, peningkatan efisiensi pencernaan mikroba, serta pemanfaatan reaktor berteknologi tinggi telah meningkatkan nilai efisiensi dan keberlanjutan proses produksi bioenergi (Liang, 2024). Aplikasi teknologi tersebut juga mulai merambah pada skala rumah tangga, komunitas pertanian, hingga industri besar (Judijanto & Al-Amin, 2025).

Walaupun potensinya sangat besar, pengembangan bioenergi dari limbah pertanian di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala. Secara teknis, karakteristik biomassa yang bervariasi, kandungan lignin yang tinggi, kadar air yang berlebih, serta proses pengumpulan limbah yang belum terkoordinasi menjadi tantangan dalam proses konversi energi. Dari aspek sosial-ekonomi, rendahnya kesadaran dan pengetahuan petani mengenai nilai tambah limbah pertanian, minimnya akses permodalan, serta terbatasnya sarana pendukung menjadi kendala dalam penerapan teknologi bioenergi di lapangan. Di sisi regulasi, meskipun pemerintah telah mengeluarkan beberapa kebijakan untuk mendorong pemanfaatan energi terbarukan, implementasinya sering kali tidak konsisten dan belum terintegrasi dengan sektor pertanian secara optimal.

Pengembangan bioenergi dari limbah pertanian juga memiliki implikasi penting terhadap ekonomi sirkular. Konversi limbah menjadi energi tidak hanya mengurangi beban lingkungan, tetapi juga menciptakan aliran nilai ekonomi baru bagi petani dan masyarakat. Produk samping bioenergi, seperti digestate dari biogas dan biochar dari pirolisis, bahkan dapat dimanfaatkan kembali sebagai pupuk organik atau bahan peningkatan kualitas tanah sehingga mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Dengan demikian, teknologi bioenergi menjadi salah satu bentuk inovasi strategis yang mampu menghubungkan pengelolaan limbah, produksi energi, dan penguatan ekonomi masyarakat dalam satu sistem terpadu. Melihat besarnya potensi serta tantangan yang ada, diperlukan penelitian yang komprehensif mengenai pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian. Kajian ini penting untuk mengidentifikasi jenis biomassa yang paling potensial, menganalisis efektivitas teknologi konversi yang tersedia, serta merumuskan model implementasi yang relevan dalam konteks Indonesia. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi kebijakan dan strategi pengelolaan yang dapat diadopsi oleh pemerintah, sektor industri, serta komunitas pertanian dalam rangka memaksimalkan manfaat bioenergi bagi pembangunan nasional.

Dengan demikian, pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian bukan hanya menjadi solusi atas permasalahan limbah dan kebutuhan energi, tetapi juga merupakan langkah konkret menuju sistem energi yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan. Upaya ini sekaligus mendukung percepatan transisi energi nasional serta kontribusi Indonesia terhadap agenda pembangunan global yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan dan ketahanan energi jangka panjang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain penelitian deskriptif-kualitatif yang bertujuan untuk menggambarkan, menganalisis, dan memaknai pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian berdasarkan kondisi aktual di lapangan dan literatur ilmiah. Pendekatan kualitatif dipilih karena mampu mengungkap fenomena secara mendalam, termasuk proses, tantangan, dan potensi pengembangan bioenergi pada berbagai konteks pertanian. Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan pendekatan studi literatur (*library research*) untuk mengkaji perkembangan teknologi konversi biomassa secara komprehensif melalui sumber-sumber ilmiah terkini. Instrumen penelitian berupa pedoman wawancara, lembar observasi, serta format analisis

dokumen. Instrumen dikembangkan berdasarkan indikator utama pengembangan teknologi bioenergi, seperti efisiensi konversi, ketersediaan bahan baku, biaya operasional, dampak lingkungan, dan tingkat penerimaan masyarakat.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi:

1. Wawancara mendalam (*in-depth interview*) dengan petani, akademisi, dan praktisi energi terbarukan untuk memperoleh informasi mengenai potensi, hambatan, serta penerapan teknologi bioenergi.
2. Observasi lapangan, terutama pada lokasi yang telah menerapkan biogas, proses pirolisis, atau fermentasi biomassa. Observasi digunakan untuk memahami proses teknis serta menilai efektivitas teknologi di lapangan.
3. Studi dokumentasi, berupa analisis artikel ilmiah, laporan penelitian, buku, dan kebijakan pemerintah terkait energi terbarukan dan limbah pertanian.
4. Studi literatur sistematis, untuk menelaah perkembangan teknologi konversi biomassa serta praktik terbaik (*best practices*) yang diadopsi secara global.

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan:

1. Reduksi data, yaitu proses memilih, mengelompokkan, dan menyederhanakan data hasil wawancara, observasi, dan dokumentasi menjadi tema-tema utama.
2. Penyajian data, dilakukan dalam bentuk tabel, narasi, dan diagram untuk memudahkan interpretasi hasil analisis.
3. Analisis tematik (*thematic analysis*), digunakan untuk mengidentifikasi pola, tema, dan hubungan antara faktor teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan dalam pengembangan teknologi bioenergi.
4. Triangulasi sumber, yaitu membandingkan data dari berbagai teknik pengumpulan data guna meningkatkan validitas dan reliabilitas temuan.
5. Analisis komparatif, khususnya dalam menilai efektivitas berbagai teknologi bioenergi berdasarkan literatur internasional dan praktik lokal di Indonesia.

Dengan teknik analisis tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang menyeluruh tentang potensi, tantangan, dan strategi optimal dalam pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Limbah Pertanian sebagai Sumber Bioenergi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Indonesia memiliki ketersediaan limbah pertanian dalam jumlah yang sangat besar, yang secara teoritis mampu menjadi bahan baku bioenergi dalam skala nasional. Produksi padi, jagung, tebu, dan kelapa sawit empat komoditas terbesar menghasilkan limbah biomassa lebih dari ratusan juta ton setiap tahun. Jerami padi, sebagai contoh, diperkirakan mencapai lebih dari 50 juta ton per tahun, namun lebih dari 60% di antaranya tidak dimanfaatkan secara produktif. Temuan di lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar petani masih memilih membakar limbah tersebut untuk mempercepat pengolahan lahan karena keterbatasan alat dan teknologi.

Selain aspek ketersediaan, pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber bioenergi menjadi semakin relevan karena tingginya dampak lingkungan yang ditimbulkan dari praktik pembakaran terbuka. Pembakaran jerami dan sekam padi menghasilkan emisi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O, serta partikulat yang berdampak pada penurunan kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Padahal, limbah biomassa tersebut memiliki potensi ekonomi dan fungsional yang besar jika dikelola melalui rantai nilai bioenergi. Dalam pendekatan *circular economy*, limbah pertanian dapat diposisikan bukan sebagai residu yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya berulang (*reusable resource*) yang mampu membuka peluang industri baru di perdesaan, menciptakan lapangan kerja lokal, dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Potensi limbah pertanian tidak hanya terletak pada jumlahnya, tetapi juga pada kandungan energi yang cukup tinggi. Misalnya, jerami padi memiliki nilai kalor sekitar 15 MJ/kg, sekam padi sekitar 13 MJ/kg, dan tongkol jagung sekitar 17 MJ/kg. Komponen penyusun biomassa tersebut mayoritas terdiri atas lignin, selulosa, dan hemiselulosa, yang secara teknis memungkinkan untuk dikonversi menjadi berbagai bentuk energi seperti bioetanol, biogas, bio-oil, dan solid biofuel (contoh: pellet dan briket). Biomassa berbasis sisa industri tebu seperti bagasse dan trash bahkan telah terbukti memiliki efisiensi pembakaran tinggi dalam co-firing pembangkit listrik berbasis batubara. Sayangnya, adopsi teknologi konversi biomassa masih berjalan lambat di tingkat petani kecil akibat terbatasnya akses pembiayaan, pelatihan teknis, dan ketersediaan fasilitas skala komunitas (*communal bioenergy facility*).

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa biomassa dengan kandungan lignoselulosa tinggi dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi melalui teknologi yang tepat. Teknologi termokimia seperti pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran langsung cocok untuk limbah berkadar air rendah, sedangkan teknologi biokimia seperti fermentasi dan digester anaerobik lebih optimal untuk bahan berkadar air tinggi. Perkembangan teknologi pirolisis modern bahkan telah mengarah pada produksi bio-oil yang dapat di-upgrade menjadi drop-in fuel, sementara digester biogas skala rumah tangga maupun komunal mampu menurunkan beban limbah sekaligus menyuplai energi untuk kebutuhan listrik dan memasak. Keunggulan utama biomassa pertanian Indonesia adalah keberadaannya yang tersebar merata, sehingga berpotensi dibangun dalam model distribusi energi berbasis komunitas desa melalui koperasi atau BUMDes.

Dengan demikian, limbah pertanian merupakan sumber energi terbarukan yang belum dimaksimalkan secara optimal di Indonesia. Agar potensinya dapat terealisasi secara efektif, diperlukan strategi sistemik yang meliputi: (1) modernisasi alat pascapanen untuk mengurangi praktik bakar lahan, (2) pembangunan fasilitas konversi biomassa berbasis komunitas, (3) integrasi pengelolaan limbah dalam kebijakan energi daerah, serta (4) skema insentif bagi petani dan pengusaha bioenergi skala kecil. Transformasi limbah pertanian menjadi bioenergi bukan hanya menjawab kebutuhan energi terbarukan, tetapi juga menciptakan dampak ganda (*multiplier effect*) berupa perbaikan lingkungan, peningkatan pendapatan petani, dan penguatan kemandirian energi nasional. Implementasi model-model konversi yang sesuai dengan karakteristik masing-masing jenis limbah akan menjadi kunci dalam membangun ekosistem bioenergi yang berkelanjutan, efisien, dan inklusif bagi masyarakat Indonesia.

Temuan terkait Penerapan Teknologi Bioenergi

1. Teknologi Biogas melalui Anaerobic Digestion

Hasil observasi dan studi literatur menunjukkan bahwa teknologi biogas merupakan teknologi bioenergi yang paling banyak diterapkan di daerah pedesaan. Penggunaan biodigester memungkinkan limbah organik seperti kotoran ternak, campuran jerami, dan limbah agroindustri diolah menjadi metana (CH₄) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar rumah tangga maupun energi listrik skala kecil. Temuan lapangan menunjukkan bahwa:

- a. Tingkat efisiensi biodigester bergantung pada komposisi substrat, suhu lingkungan, dan jenis reaktor.
- b. Petani yang mengombinasikan jerami dan kotoran sapi dalam rasio tertentu mampu meningkatkan produksi biogas hingga 20–30%.
- c. Pemanfaatan *slurry* atau digestate dari reaktor memberikan nilai tambah sebagai pupuk organik.

Namun, tantangan yang ditemukan meliputi kurangnya pemeliharaan reaktor, ketidakteraturan suplai biomassa, serta minimnya pendampingan teknis dari pemerintah.

2. Teknologi Biochar dan Pirolisis

Teknologi pirolisis memainkan peran penting dalam mengkonversi biomassa seperti sekam, jerami, dan batang tanaman menjadi biochar, syngas, dan bio-oil. Dari hasil telaah literatur, biochar tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi padat, tetapi juga bermanfaat

meningkatkan kualitas tanah melalui peningkatan porositas dan kapasitas tukar kation. Penelitian menunjukkan:

- a. Proses pirolisis pada suhu 300–500°C menghasilkan biochar berkualitas baik dengan rendemen tinggi.
- b. Petani yang memanfaatkan sekam padi untuk proses pirolisis skala kecil mampu mengurangi limbah secara signifikan sekaligus menghasilkan bahan bakar alternatif.

Namun hambatan teknis yang ditemukan meliputi keterbatasan alat pirolisis modern, biaya investasi yang relatif tinggi, serta kurangnya pengetahuan operator terkait pengaturan suhu dan waktu pirolisis.

3. Teknologi Fermentasi Biomassa untuk Bioetanol

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa biomassa seperti tongkol jagung, ampas tebu (bagasse), dan limbah singkong memiliki potensi besar sebagai bahan baku bioetanol berbasis lignoselulosa. Fermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* dan proses pretreatment asam/enzimatis mampu meningkatkan konversi glukosa menjadi etanol. Temuan penelitian literatur mengindikasikan:

- a. Pretreatment lignoselulosa sangat menentukan keberhasilan fermentasi.
- b. Rendemen etanol dari limbah lignoselulosa dapat mencapai 20–30 g/L tergantung proses pretreatment.
- c. Bioetanol potensial digunakan sebagai bahan bakar campuran untuk energi transportasi.

Namun, produksi bioetanol skala besar masih terbatas pada industri karena memerlukan fasilitas modern dan modal besar.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Pengembangan Bioenergi

Hasil analisis menunjukkan bahwa keberhasilan pengembangan bioenergi di Indonesia tidak dapat dilepaskan dari interaksi kompleks antara faktor teknis, sosial, ekonomi, dan kebijakan. Keempat aspek ini saling memengaruhi, sehingga efektivitas pengembangan bioenergi sangat bergantung pada sejauh mana setiap faktor dapat diatasi dan diintegrasikan dalam suatu ekosistem yang mendukung.

Dari sisi teknis, karakteristik biomassa menjadi tantangan utama dalam proses konversi energi. Beberapa jenis limbah pertanian memiliki kandungan lignin yang cukup tinggi, yang membuat struktur biomassa lebih sulit terurai, sehingga menghambat efisiensi proses konversi, khususnya pada teknologi berbasis biokimia seperti digester anaerobik maupun fermentasi bioetanol. Selain itu, kadar air yang tinggi juga umum ditemukan pada limbah biomassa padat, yang berimplikasi pada penurunan efisiensi pembakaran karena sebagian energi terserap untuk proses evaporasi sebelum pembakaran optimal tercapai. Tantangan tersebut semakin diperparah oleh keterbatasan teknologi dasar di tingkat produsen primer. Sebagian besar petani dan pelaku usaha mikro di sektor pertanian masih belum memiliki akses terhadap alat-alat penunjang seperti mesin pengering, mesin pencacah (chopper), maupun reaktor dan reaktor termokimia modern seperti pirolisis dan gasifikasi, sehingga proses pengelolaan limbah menjadi energi masih jauh dari kondisi ideal.

Pada dimensi sosial, efektivitas pengembangan bioenergi juga dibayangi oleh rendahnya literasi petani terkait energi terbarukan. Banyak petani belum memahami bahwa limbah pertanian, seperti jerami, sekam, maupun tongkol jagung, memiliki nilai strategis sebagai sumber bioenergi. Akibatnya, praktik pembakaran limbah di lahan masih dipertahankan karena dianggap sebagai metode paling cepat dan paling tidak merepotkan untuk membuka atau mengolah lahan, meskipun berdampak negatif pada lingkungan. Lebih lanjut, tingkat adopsi teknologi bioenergi di pedesaan terbukti berkorelasi dengan tingkat pendidikan formal dan intensitas pelatihan yang diterima, di mana adopsi teknologi cenderung lebih tinggi pada kelompok petani yang terpapar penyuluhan dan pelatihan praktik pengelolaan biomassa berbasis teknologi.

Tantangan berikutnya muncul dari faktor ekonomi, yang memperlihatkan bahwa aspek pembiayaan masih menjadi hambatan dominan dalam pengembangan bioenergi berbasis limbah

pertanian. Teknologi seperti instalasi biogas atau reaktor pirolisis memiliki kebutuhan modal awal yang relatif besar bagi petani kecil dengan skala produksi terbatas. Keterbatasan ini juga terhubung dengan belum tersedia dan belum meratanya skema insentif finansial yang secara langsung memberikan kompensasi atau reward bagi petani yang beralih dari praktik pembakaran limbah menuju pengolahan limbah menjadi energi. Selain itu, rantai pasok biomassa sebagai bahan baku bioenergi belum terbentuk secara efisien. Infrastruktur pengumpulan, penyimpanan, dan distribusi biomassa masih minim, menyebabkan inefisiensi logistik, biaya angkut tinggi, dan kesulitan dalam menjaga keberlanjutan suplai bahan baku untuk kebutuhan produksi energi dalam skala stabil dan jangka panjang.

Pada level kebijakan, terdapat persoalan fundamental dalam arah dan fokus regulasi. Kebijakan energi terbarukan nasional belum sepenuhnya diarahkan untuk membangun integrasi lintas-sektor dengan sektor pertanian, sehingga pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber energi belum menjadi prioritas yang terstruktur. Kurangnya sinkronisasi antarlembaga juga menjadi temuan penting dalam analisis ini. Peneliti menyoroti masih lemahnya sinergi kebijakan antara Kementerian Pertanian dengan Kementerian ESDM, terutama dalam aspek pemetaan potensi limbah, dukungan teknologi, dan pembiayaan berbasis perdesaan. Di sisi lain, program desa energi mandiri atau desa berbasis energi terbarukan hingga saat ini masih banyak beroperasi dalam format pilot project, sehingga dampaknya belum tersebar secara luas dan masif untuk benar-benar mengubah pola pengelolaan energi di tingkat desa.

Secara keseluruhan, pengembangan bioenergi di Indonesia memperlihatkan persoalan yang bersifat sistemik, bukan parsial. Kendala teknis di tingkat hulu tidak dapat diselesaikan hanya dengan inovasi teknologi jika tidak disertai peningkatan kapasitas sosial, dukungan permodalan, insentif ekonomi, dan reformulasi kebijakan yang integratif. Oleh karena itu, efektivitas pengembangan bioenergi akan meningkat secara signifikan apabila pendekatan kebijakan ke depan mampu menempatkan sektor pertanian sebagai pemegang peran utama dalam rantai nilai bioenergi, didukung oleh akses teknologi perdesaan, pemberdayaan sosial, serta kerangka regulasi yang kolaboratif dan berkelanjutan.

Pembahasan

Peluang dan Tantangan Pengembangan Bioenergi di Indonesia

Analisis memperlihatkan bahwa Indonesia berada pada posisi yang sangat strategis dalam pengembangan bioenergi berbasis biomassa, khususnya yang bersumber dari limbah pertanian. Sebagai negara agraris dengan produktivitas komoditas unggulan yang stabil, Indonesia memiliki ketersediaan biomassa yang tidak hanya besar secara kuantitas, tetapi juga berlangsung sepanjang tahun tanpa musim jeda produksi yang signifikan. Limbah dari komoditas seperti padi, jagung, dan kelapa sawit menjadi sumber energi potensial yang tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia, mulai dari pulau Jawa hingga Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi. Melimpahnya jerami padi, sekam, serat jagung, hingga tandan kosong sawit, menciptakan peluang besar untuk memastikan keberlanjutan pasokan bahan baku bioenergi sekaligus menekan ketergantungan pada energi berbasis fosil.

Selain itu, peluang pengembangan bioenergi di Indonesia juga sangat relevan dalam konteks ekonomi berkelanjutan, terutama melalui *model circular economy*. Limbah biomassa pertanian dapat dikonversi menjadi energi sekaligus menghasilkan produk samping bernilai guna tinggi. Teknologi digester anaerobik menghasilkan *digestate* yang dapat difungsikan sebagai pupuk organik kaya nutrisi tanah, sedangkan teknologi pirolisis berpotensi memproduksi *biochar* yang dapat dikembangkan menjadi pembenah tanah atau penyimpan karbon (carbon sink) di lahan pertanian. Kedua produk samping ini tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga membuka peluang optimalisasi lahan dan efisiensi produksi pertanian, karena memperkuat kandungan bahan organik tanah yang selama ini menjadi tantangan di banyak wilayah pertanian intensif di Indonesia.

Peran bioenergi juga krusial dalam mendukung target bauran energi nasional. Indonesia menargetkan pencapaian 23% energi baru terbarukan (EBT) dalam bauran energinya pada tahun

2025, namun realisasinya masih membutuhkan sumber energi yang bersifat terdesentralisasi dan berbasis komunitas agar dapat menjangkau masyarakat perdesaan. Di sinilah bioenergi dari limbah pertanian memiliki resonansi yang kuat. Teknologi biogas skala rumah tangga hingga komunal berpotensi menyuplai kebutuhan energi listrik maupun energi memasak di desa-desa, terutama di daerah yang belum sepenuhnya terjangkau infrastruktur energi konvensional. Pemanfaatan ini membuka peluang peningkatan kesejahteraan petani melalui diversifikasi lini usaha, di mana petani atau kelembagaan desa seperti BUMDes dan koperasi dapat mengelola limbah, memproduksi energi, dan menjualnya dalam skema ekonomi lokal. Secara sosial-ekonomi, transformasi ini juga mampu menciptakan lapangan kerja baru di tingkat desa, seperti pada unit pengumpulan limbah, pengeringan bahan baku, pengolahan energi, hingga distribusi produk turunan seperti briket biomassa atau pupuk organik dari digestate.

Namun demikian, potensi tersebut berjalan seiring dengan tantangan yang tidak sederhana. Faktor ekonomi menjadi penghambat yang cukup dominan, terutama bagi petani kecil. Biaya investasi teknologi baik biogas, pirolisis, maupun gasifikasi masih tergolong tinggi jika dibandingkan dengan kemampuan permodalan petani perorangan yang skala usahanya relatif kecil dan belum bankable secara merata. Kondisi ini menyebabkan proses transisi energi dari limbah pertanian menjadi sulit dilakukan secara individual, sehingga ketergantungan pada skema bantuan, kemitraan, atau pendirian fasilitas komunal masih menjadi keniscayaan.

Dari sisi teknologi, tantangan terbesar bukan hanya pada “ketersediaan teknologi”, tetapi pada “kesesuaian teknologi” dengan karakter pengguna di tingkat akar rumput. Teknologi konversi biomassa yang ada saat ini belum sepenuhnya user-friendly atau dirancang sesuai keterampilan mayoritas petani, sehingga pengoperasiannya masih membutuhkan asistensi teknis atau keahlian khusus. Hal ini membatasi adopsi teknologi di tingkat perdesaan dan membuat pemanfaatannya cenderung terkonsentrasi di wilayah-wilayah tertentu saja, khususnya yang telah memiliki pendampingan berkelanjutan, perguruan tinggi mitra, atau infrastruktur industri. Ketimpangan distribusi teknologi ini juga menimbulkan tantangan lanjutan pada pembangunan rantai pasok, di mana daerah yang jauh dari fasilitas pengolahan biomassa menghadapi biaya angkut tinggi dan kesulitan penyimpanan limbah, sehingga sulit menjamin kontinuitas suplai bahan baku.

Selain itu, tantangan riset dan hilirisasi juga masih menjadi persoalan besar. Meski penelitian dasar mengenai potensi dan nilai kalor biomassa pertanian cukup banyak dilakukan, riset terapan yang benar-benar menjawab kebutuhan operasional perdesaan misalnya terkait teknologi pengering berbiaya rendah, desain digester yang tahan karakteristik limbah lokal, atau reaktor pirolisis mini yang efisien masih relatif terbatas. Akibatnya, inovasi yang dihasilkan belum cukup masif atau belum sepenuhnya terintegrasi dengan kebutuhan produksi energi berbasis komunitas tani dan pengelolaan limbah yang efisien.

Temuan penelitian memberikan implikasi multidimensional yang penting untuk dicermati. Bagi sektor pertanian, pengolahan limbah menjadi bioenergi dapat mengubah paradigma bahwa limbah merupakan beban produksi, menjadi aset ekonomi yang potensial. Pengolahan biomassa menjadi biogas atau bahan bakar padat terkompresi seperti briket dapat menciptakan aliran pendapatan baru bagi petani serta mengurangi biaya pengolahan lahan yang selama ini menyebabkan banyak limbah dibakar di lapangan. Di sisi lain, produk turunan seperti digestate dan biochar juga mendukung peningkatan kesuburan tanah, sehingga memberikan manfaat berlapis pada produktivitas pertanian jangka panjang.

Bagi lingkungan, transformasi limbah menjadi energi berarti pengurangan emisi gas rumah kaca, partikulat berbahaya, dan polusi udara yang ditimbulkan oleh praktik pembakaran terbuka. Setiap ton biomassa yang tidak dibakar dan dialihkan menjadi sumber energi atau material pembenah tanah, turut berkontribusi pada penurunan beban karbon nasional sekaligus memperkuat fungsi lahan tani sebagai penyimpan karbon.

Dari perspektif sektor energi, bioenergi berbasis pertanian berpotensi menjadi salah satu pilar energi terbarukan yang bersifat desentralisasi, terutama dalam suplai listrik, energi rumah tangga, dan unit energi komunal di perdesaan. Hal ini dapat menjadi opsi paling fleksibel dan

lokal-based dalam memperkuat kemandirian energi desa, terutama di wilayah non-perkotaan yang menghadapi tantangan aksesibilitas energi.

Implikasi bagi pemerintah juga sangat kuat, di mana hasil penelitian menegaskan perlunya penguatan kebijakan lintas sektor. Pengembangan bioenergi berbasis limbah pertanian membutuhkan sinergi regulatif, pemetaan potensi, dukungan teknologi, serta skema insentif finansial yang terarah, agar program energi terbarukan tidak hanya berhenti pada skala pilot project. Diperlukan desain kebijakan yang lebih integratif antara program pemberdayaan limbah di sektor perdesaan, pembiayaan usaha tani, dukungan teknologi komunitas, serta pencapaian target energi bersih nasional, sehingga terbentuk ekosistem yang berkelanjutan dan dapat diadopsi secara luas oleh petani, bukan hanya oleh institusi atau pelaku industri besar.

Melalui temuan ini, terlihat jelas bahwa pengembangan bioenergi di Indonesia bukan hanya agenda energi, melainkan agenda transformasi sistem produksi perdesaan, pemberdayaan sosial, dan perbaikan kualitas lingkungan dalam skala yang simultan dan saling menguatkan. Optimalisasi peluang sekaligus mitigasi tantangan menjadi kunci dalam mempercepat realisasi bioenergi sebagai sumber energi masa depan Indonesia. Indonesia.

Aspek Hukum dan Kebijakan Pengembangan Bioenergi dari Limbah Pertanian

Pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis dan ekonomi, tetapi juga memiliki dimensi hukum yang sangat penting sebagai landasan legitimasi, kepastian hukum, dan keberlanjutan implementasi. Dalam konteks Indonesia, pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber energi terbarukan telah memiliki dasar hukum yang cukup kuat, meskipun implementasinya masih memerlukan penguatan regulatif dan koordinasi lintas sektor.

Secara normatif, pengembangan bioenergi merupakan bagian dari kebijakan energi baru dan terbarukan (EBT) sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi. Undang-undang ini menegaskan bahwa negara bertanggung jawab atas penyediaan energi yang berkelanjutan, berwawasan lingkungan, dan berkeadilan, serta mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk menjamin ketahanan energi nasional. Limbah pertanian sebagai biomassa termasuk dalam kategori sumber energi terbarukan yang pemanfaatannya sejalan dengan prinsip keberlanjutan dan efisiensi sumber daya alam.

Lebih lanjut, arah kebijakan pengembangan bioenergi diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), yang menargetkan peningkatan bauran energi baru dan terbarukan hingga minimal 23% pada tahun 2025. Dalam kerangka KEN, bioenergi diposisikan sebagai salah satu pilar utama transisi energi, terutama untuk wilayah pedesaan dan sektor berbasis sumber daya lokal. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku bioenergi memiliki relevansi strategis dalam pencapaian target nasional tersebut.

Dari perspektif hukum lingkungan, pengembangan bioenergi juga berfungsi sebagai instrumen pengendalian pencemaran dan kerusakan lingkungan. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup secara tegas mengatur kewajiban setiap orang untuk mencegah pencemaran dan kerusakan lingkungan, termasuk akibat pembakaran limbah di lahan terbuka. Praktik pembakaran jerami dan limbah pertanian lainnya berpotensi melanggar prinsip pencegahan (preventive principle) dan asas pembangunan berkelanjutan. Dengan demikian, pengolahan limbah pertanian menjadi bioenergi dapat dipandang sebagai bentuk pemenuhan kewajiban hukum dalam pengelolaan lingkungan hidup yang berkelanjutan.

Selain itu, pengembangan bioenergi dari limbah pertanian juga berkaitan erat dengan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, yang mendorong paradigma pengelolaan sampah berbasis pengurangan dan pemanfaatan kembali (reduce, reuse, recycle). Limbah pertanian, meskipun tidak selalu diklasifikasikan sebagai sampah rumah tangga, secara substansial merupakan bagian dari limbah organik yang dapat dimanfaatkan

kembali menjadi sumber energi. Oleh karena itu, teknologi bioenergi dapat diposisikan sebagai implementasi konkret konsep ekonomi sirkular yang didorong oleh regulasi nasional.

Dari aspek hukum administrasi negara, pengembangan bioenergi berbasis limbah pertanian memerlukan peran aktif pemerintah melalui kebijakan, perizinan, insentif, dan pembinaan. Pemerintah pusat dan daerah memiliki kewenangan untuk menyusun peraturan pelaksana, menetapkan standar teknis, serta memberikan kemudahan perizinan bagi pengembangan fasilitas bioenergi skala komunitas maupun industri. Namun demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa regulasi yang ada masih bersifat sektoral dan belum sepenuhnya terintegrasi antara sektor energi dan sektor pertanian, sehingga diperlukan harmonisasi kebijakan agar pemanfaatan limbah pertanian sebagai bioenergi dapat berjalan efektif dan berkelanjutan.

Dengan demikian, secara yuridis pengembangan teknologi bioenergi dari limbah pertanian telah memiliki dasar hukum yang memadai, baik dari perspektif hukum energi, hukum lingkungan, maupun hukum administrasi negara. Tantangan ke depan bukan terletak pada ketiadaan regulasi, melainkan pada optimalisasi implementasi, penguatan koordinasi antarlembaga, serta penyusunan kebijakan turunan yang lebih operasional dan berpihak pada petani serta pelaku usaha bioenergi skala kecil. Integrasi aspek hukum dalam pengembangan bioenergi menjadi kunci untuk menciptakan kepastian hukum, perlindungan lingkungan, dan keberlanjutan energi nasional.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai sumber bioenergi berkelanjutan di Indonesia, didukung oleh ketersediaan biomassa melimpah dari komoditas seperti padi, jagung, tebu, dan kelapa sawit yang dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi terbarukan melalui teknologi anaerobic digestion, pirolisis, gasifikasi, dan fermentasi lignoselulosa. Pemanfaatan teknologi tersebut tidak hanya meningkatkan nilai guna limbah, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan akibat pembakaran lahan. Namun, keberhasilan pengembangan bioenergi dipengaruhi oleh faktor teknis, sosial, ekonomi, dan kebijakan, antara lain keterbatasan alat dan karakteristik biomassa, rendahnya pengetahuan dan kesadaran petani, tingginya biaya investasi awal, serta belum optimalnya integrasi kebijakan energi terbarukan dengan sektor pertanian. Secara keseluruhan, pengembangan bioenergi dari limbah pertanian memberikan manfaat multidimensional, seperti pengurangan polusi dan emisi gas rumah kaca, peningkatan ketahanan energi nasional, penguatan ekonomi sirkular, serta penciptaan peluang pendapatan baru bagi petani, sehingga berpotensi menjadi pilar penting dalam transisi energi berkelanjutan di Indonesia apabila didukung teknologi dan kebijakan yang tepat.

Pemerintah Indonesia perlu menyusun kebijakan terpadu lintas sektor antara Kementerian Pertanian dan Kementerian ESDM dengan dukungan regulasi teknis dari Badan Standardisasi Nasional, serta memperluas insentif finansial dan kredit lunak bagi kelompok tani dan UMKM agar pemanfaatan bioenergi berbasis limbah pertanian dapat berkembang di perdesaan. Di tingkat komunitas, petani dan gabungan kelompok tani didorong meningkatkan literasi dan kerja kolektif untuk menekan biaya investasi teknologi sekaligus mengoptimalkan produk turunan seperti digestate dan biochar guna mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Sementara itu, peneliti dan akademisi perlu memfokuskan riset terapan pada pengembangan teknologi biomassa perdesaan yang murah, aman, dan efisien, serta industri energi terbarukan didorong memperluas investasi inklusif, memperkuat kolaborasi dengan perguruan tinggi, dan mengintegrasikan prinsip ekonomi sirkular demi mewujudkan kemandirian energi desa dan peningkatan kesejahteraan petani.

DAFTAR PUSTAKA

- Judijanto, L., & Al-Amin. (2025). Pengelolaan limbah pertanian sebagai sumber energi terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Indonesia*, 3(2), 61–70.
- Kasmaniar, Yana, S., Nelly, Fitriliana, Susanti, Hanum, F., & Rahmatullah, A. (2023). Pengembangan energi terbarukan biomassa dari sumber pertanian, perkebunan, dan hasil hutan: Kajian pengembangan dan kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1), 4957–4964.
- Liang, K. (2024). Enhancing the efficiency of converting agricultural waste into biomethane using anaerobic digestion technology. *Journal of Energy Bioscience*, 15(2), 118–131. <https://doi.org/10.5376/jeb.2024.15.0012>
- Mardapi, D. (2017). *Pengukuran, penilaian, dan evaluasi pendidikan*. Parama Publishing.
- Montgomery, D. C. (2017). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., & Fudholi, A. (2021). Review article: Operational parameters of biomass pyrolysis. *Agroteknika*, 4(1), 53–67.
- Pujotomo, I. (2017). Potensi pemanfaatan biomassa sekam padi untuk pembangkit listrik melalui teknologi gasifikasi Isworo. *Jurnal Energi & Kelistrikan*, 32(3), 167–186.
- Rex, K., Sharma, P., Kumar, R., & Singh, A. (2023). Agricultural waste as a sustainable bioenergy resource: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, X(X), xx–xx.
- Rex, P., Mohammed Ismail, K. R., Meenakshisundaram, N., Barmavatu, P., & Sai Bharadwaj, A. V. S. L. (2023). Agricultural biomass waste to biochar: A review on biochar applications using machine learning approach and circular economy. *ChemEngineering*, 7(3), Article 50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>
- Rustaman, N. Y. (2019). Evaluasi berbasis kompetensi dalam pembelajaran sains. *Jurnal Inovasi Pendidikan*, X(X), xx–xx.
- Subardi, Atmojo, S. W., & Himawanto, D. A. (2019). Optimalisasi pemanfaatan limbah pertanian sebagai energi alternatif binderless biobriquette. *Jurnal Ekosains*, 11(1), 32–41.
- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Sunaryati, T., Rossi, A. R. Z., Habibah, Khopipah, & Wibiwirutami, T. (2024). Peran evaluasi pembelajaran dalam meningkatkan kualitas pendidikan di sekolah dasar. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(3), 36251–36255.
- Tentama, F., Maulana, M., & Anggraeni, R. (2018). Pemberdayaan masyarakat dalam pemanfaatan limbah pertanian sebagai bioenergi alternatif, media tanam, dan pupuk organik. *Jurnal Pemberdayaan: Publikasi Hasil Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), 367. <https://doi.org/10.12928/jp.v1i2.367>