

POTENSI BIOMASSA GASIFIKASI: ALTERNATIF BERKELANJUTAN DALAM MENGHASILKAN ENERGI LISTRIK UNTUK MASA DEPAN

Fatimatuz Zahro ¹,

Program Studi Pendidikan Sains Universitas Negeri Surabaya, Indonesia
Email: fatimatuz.20078@mhs.unesa.ac.id

Mohammad Budiyanto ²

Program Studi Pendidikan Sains Universitas Negeri Surabaya, Indonesia
Email: mohammadbudiyanto@unesa.ac.id

Fasih Bintang Ilhami ³

Program Studi Pendidikan Sains Universitas Negeri Surabaya, Indonesia
Email: fasihilhami@unesa.ac.id

ABSTRAK: *The use of sustainable energy sources is becoming increasingly important in responding to future energy challenges. One promising alternative is biomass gasification, which is the process of converting biomass into synthesis gas or methane gas. The potential of gasified biomass as a source of electrical energy has attracted the attention of energy researchers and practitioners. The study aims to illustrate the potential of gasified biomass as a sustainable alternative in generating electrical energy for the future. The research method used is the systematic review method. Systematic review research is carried out by reviewing certain criteria in a structured manner to determine the evidence base. The results of the analysis show that gasified biomass has significant potential as a sustainable source of electrical energy. Biomass that can be used in gasification includes agricultural waste, forest waste, industrial waste, and special energy crops grown specifically for energy purposes. The main advantages of gasified biomass include abundant availability, renewable properties, and the ability to reduce greenhouse gas emissions. In addition, gasified biomass can also be integrated with carbon capture and storage technologies to further reduce CO2 emissions. Biomass gasification has great potential as a sustainable alternative in generating electrical energy for the future. The thermal efficiency of biomass gasification can reach a higher level compared to the direct combustion of biomass or the use of conventional steam power plants. Supporting factors for the utilization of gasified biomass include abundant resource potential, waste management, reduction of house gas emissions.*

Keywords: *Biomass; Electrical Energy; Gasification; Sustainable.*

ABSTRAK: Penggunaan sumber energi yang berkelanjutan menjadi semakin penting dalam menjawab tantangan energi di masa depan. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah biomassa gasifikasi, yang merupakan proses konversi biomassa menjadi gas sintesis atau gas metana. Potensi biomassa gasifikasi sebagai sumber energi listrik telah menarik perhatian para peneliti dan praktisi energi. Studi ini bertujuan untuk menggambarkan potensi biomassa gasifikasi sebagai alternatif berkelanjutan dalam menghasilkan energi listrik untuk masa depan. Metode penelitian yang digunakan adalah metode systematic review. Penelitian *systematic review* dilakukan dengan penelaahan dengan kriteria tertentu secara terstruktur untuk mengetahui *evidence base*. Hasil analisis menunjukkan bahwa biomassa gasifikasi memiliki potensi yang signifikan sebagai sumber energi listrik yang berkelanjutan. Biomassa yang dapat digunakan dalam gasifikasi meliputi limbah pertanian, limbah hutan, limbah industri, dan tanaman energi khusus yang ditanam secara khusus untuk tujuan energi. Keuntungan utama biomassa gasifikasi termasuk ketersediaan yang melimpah, sifat terbarukan, dan kemampuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Selain itu, biomassa gasifikasi juga dapat diintegrasikan dengan teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon untuk mengurangi emisi CO2 lebih lanjut. Biomassa gasifikasi memiliki potensi besar sebagai alternatif berkelanjutan dalam menghasilkan energi listrik untuk masa depan. Efisiensi termal gasifikasi biomassa dapat mencapai tingkat yang lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran langsung biomassa atau penggunaan pembangkit listrik tenaga uap konvensional. Faktor pendukung pemanfaatan biomassa gasifikasi meliputi potensi sumber daya yang melimpah, pengelolaan limbah, reduksi emisi gas rumah kaca.

Kata Kunci: Biomassa; Berkelanjutan; Energi Listrik; Gasifikasi.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi dan perkembangan industri yang pesat di Indonesia mendorong kebutuhan energi listrik meningkat. Peningkatan kebutuhan energi listrik yang meningkat mendorong suatu negara untuk meningkatkan kapasitas pembangkit listrik. Dampak yang dihasilkan dalam suatu negara dalam menghadapi situasi kebutuhan energi listrik yang meningkat adalah penyediaan energi listrik yang memadai baik bagi penduduk ataupun industri. Bersamaan dengan hal tersebut, dampak negatif yang ditimbulkan adalah lingkungan mengalami tekanan yang cukup tinggi seperti peningkatan emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Efek rumah kaca disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil sehingga menyebabkan terjadinya pemanasan global [1]. Penggunaan sumber daya alam untuk menghasilkan energi listrik tidak dapat secara terus menerus

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Sains State University of Surabaya, Surabaya, Jawa Timur

dimanfaatkan. Bahan bakar fosil merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui (*Nonrenewable Resource*). Proses pembentukan bahan bakar fosil membutuhkan waktu yang tidak singkat dalam skala waktu manusia sehingga waktu yang diperlukan dalam pembentukannya lebih lama dari pada waktu untuk mengkonsumsinya atau memanfaatkannya. Berdasarkan sifat keterbatasan, penggunaan berlebihan bahan bakar fosil mengakibatkan penipisan sumber daya alam. Ketergantungan pada bahan bakar fosil tersebut tidak dapat dipertahankan[2]. Pengelolaan pertumbuhan kebutuhan listrik yang meningkat dibutuhkan upaya dengan memprioritaskan kebijaksanaan dan alternatif berkelanjutan untuk meminimalisir dampak negatif bagi lingkungan dan masyarakat. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melalui pembangunan berkelanjutan. Energi terbarukan dapat mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca, mensterilkan udara yang terkena polusi dan meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam sudut kaca mata pandang ekonomi, energi terbarukan memiliki peluang untuk memberikan akses energi yang terjangkau dan bersih bagi populasi lingkungan dan masyarakat [3].

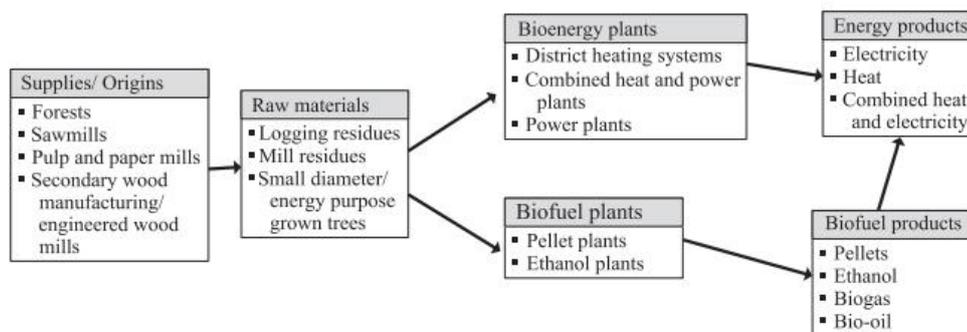
Energi terbarukan berhasil menarik perhatian dan minat pada skala internasional terutama pada abad ke 21. Energi terbarukan menjadi energi yang penting karena perkembangan teknologi yang signifikan memberikan dampak yang baik terutama pada bidang energi listrik. Kemajuan tersebut berdampak pada penurunan biaya dan peningkatan kinerja sehingga energi terbarukan menjadi energi yang dapat diandalkan di tengah era disrupsi saat ini. Dampak positif lainnya adalah energi terbarukan membantu mengurangi negara yang bergantung pada pasokan energi yang kurang stabil. Sumber energi terbarukan (*Renewable Energy*) seperti geothermal, solar, angin, biomassa dan tenaga air (*Hydroelectric power*) semakin banyak digunakan. Energi terbarukan (*Renewable Energy*) biomassa adalah energi yang dihasilkan dari bahan-bahan organik yang bersumber dari limbah pertanian, limbah kota dan limbah hutan. Bahan organik tersebut didapat dari hasil fotosintesis yang berasal dari zat atau produk yang dihasilkan dan zat atau produk yang akan dibuang [4]. Ditinjau dari segi kekayaan geografis, Indonesia memiliki potensi energi terbarukan biomassa yang baik. Faktor pendukung energi terbarukan biomassa di Indonesia adalah sumber daya pertanian yang melimpah, hutan tropis yang luas dan limbah organik yang dihasilkan dari kegiatan industri pertanian cukup tinggi. Berdasarkan hasil riset Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia memiliki Potensi energi Terbarukan (EBT) yang cukup besar pada EBT biomassa yaitu sebesar 50 gigawat (GW) [5]. Beberapa bentuk EBT di Indonesia dengan potensi yang besar adalah panas bumi, angin dan biomassa [30].

Tanggapan pemerintah terhadap pemanfaatan biomas sebagai sumber energi terbarukan di tuangkan melalui 4 kebijakan yang telah berlaku. Pertama tertuang dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). RUEN merupakan dokumen perencanaan strategis yang mengatur pengembangan sektor energi di Indonesia. RUEN menetapkan target penggunaan energi terbarukan, termasuk biomassa, dalam portofolio energi nasional. Kedua tertuang dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 12 Tahun 2017 tentang Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa: Peraturan ini memberikan pedoman dan insentif bagi pengembangan pembangkit listrik tenaga biomassa di Indonesia. Salah satu insentif yang diberikan adalah kebijakan Feed-in Tariff (FiT) yang menetapkan tarif listrik yang kompetitif untuk produsen listrik biomassa. Ketiga tertuang dalam Peraturan Menteri ESDM No. 14 Tahun 2017 tentang Penggunaan Bahan Bakar Biomassa pada Industri: Peraturan ini mewajibkan industri tertentu untuk menggunakan bahan bakar biomassa sebagai salah satu upaya mengurangi emisi gas rumah kaca dan menggantikan penggunaan bahan bakar fosil. Keempat tertuang dalam Program Ketenagalistrikan Terbarukan (EBTKE) oleh Kementerian ESDM: Kementerian ESDM melalui Program EBTKE mendorong pengembangan pembangkit listrik terbarukan, termasuk biomassa, dengan memberikan dukungan teknis, bantuan finansial, dan fasilitas lainnya bagi proyek-proyek energi terbarukan. Kelima tertuang dalam program Inisiatif Daerah Bebas Emisi (DBE): Beberapa daerah di Indonesia telah meluncurkan program DBE untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Dalam konteks ini, pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan menjadi bagian dari strategi untuk mencapai target pengurangan emisi. Adanya kebijakan tersebut merupakan bentuk komitmen pemerintah dalam pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia [6].

Sejumlah negara berkembang telah menerapkan biomassa hutan untuk menjadi sumber penghasil energi listrik. Pemanfaatan biomasaa hutan sebagai teknologi konversi untuk menghasilkan energi listrik memberikan manfaat seperti sifat biomassa hutan yang merupakan *carbon neutral* sehingga mampu mnegurangi emisiss CO₂ [7]. Kelebihan dari biomassa hutan adalah hutan memiliki kapastitas penyimpanan karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer. Berdasarkan hal tersebut, biomassa hutan berperan sebagai cadangan karbon alami yang membantu mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer sehingga membantu dalam mitigasi perubahan iklim. Adanya biomasaa hutan menyediakan dan memberikan tempat kepada habitata atau spesies

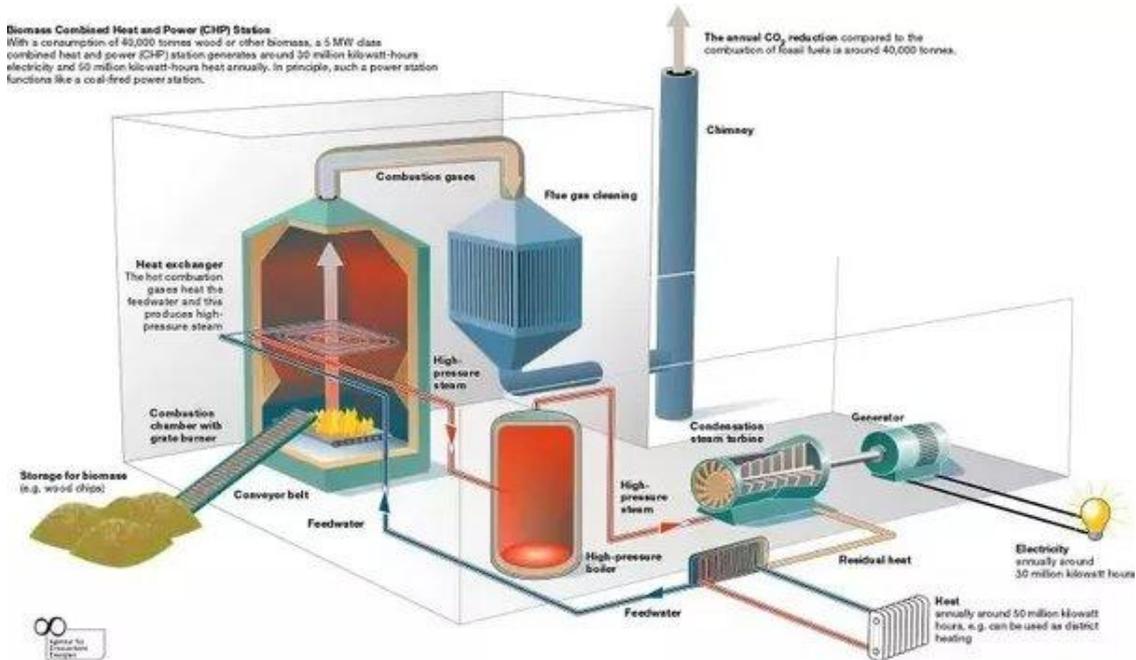
tumbuhan dan hewan sehingga berkontribusi pada keanekaragaman hayati dan keseimbangan ekosistem. Teknologi proses biomassa hutan untuk menjadi energi listrik dapat dilakukan melalui proses *direct combustion* (pembakaran langsung), gasifikasi, pirolisis, *hydro thermal upgrading* dan *liquefaction* [8]. Salah satu proses konversi yang digunakan adalah gasifikasi. Dalam proses gasifikasi, biomassa hutan diubah menjadi campuran gas yang mudah terbakar melalui tahapan oksidasi parsial biomassa pada suhu tinggi, kisaran sekitar 800-900°C. Pada tahap awal gasifikasi, biomassa hutan dipanaskan dalam lingkungan dengan oksigen terbatas atau tanpa oksigen. Suhu tinggi ini memicu reaksi kimia yang kompleks dalam biomassa. Dalam kondisi oksigen terbatas, tahap oksidasi parsial terjadi. Bagian dari biomassa terdekomposisi dan bereaksi dengan sejumlah terbatas oksigen yang tersedia. Reaksi ini menghasilkan gas-gas seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), serta senyawa-senyawa lainnya. Gas-gas ini disebut sebagai gas sintesis atau *syngas*, merupakan campuran yang mudah terbakar. Gas sintesis ini dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai aplikasi, seperti pembangkit listrik, pemanas industri, dan produksi bahan kimia atau bahan bakar cair melalui proses sintesis lanjutan [9]. Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mendeskripsikan potensi gasifikasi dalam teknologi

Rantai biomassa hutan untuk menjadi pasokan energi dapat dideskripsikan pada **gambar 1**. Pembangkitan energi dari biomassa hutan berpotensi menurunkan emisi karbon secara signifikan bila menggantikan bahan bakar fosil. Rantai biomassa hutan terdiri dari *supplies/origin*, *raw materials*, *bioenergy plants*, *biofuel plants*, *energy products*, *biofuel products*.



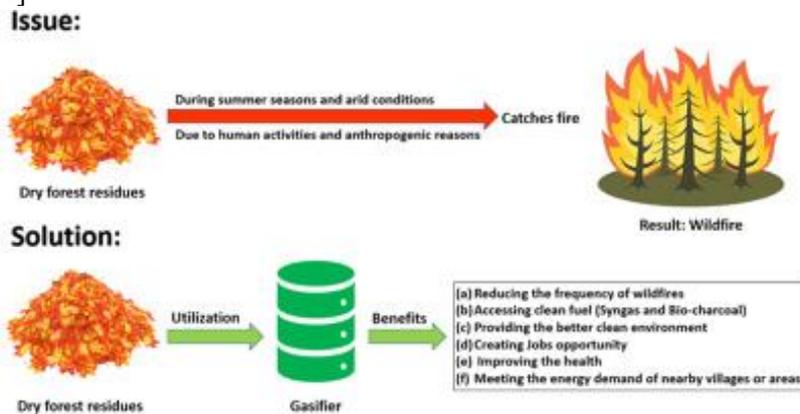
■ **Gambar 1.** Rantai biomassa hutan [15]

Departemen Energi AS menyatakan bahwa sistem pembangkit listrik biomassa untuk siklus uap terdiri dari beberapa komponen utama seperti penyimpanan bahan bakar dan peralatan penanganan, Pembakar/tungku, Ketel, Pompa, Kipas, Turbin uap, Generator, Kondensor [16], Menara pendingin, Kontrol knalpot/emisi, dan Kontrol sistem (otomatis). Masing-masing komponen memiliki peran dalam berkontribusi pada sistem pembangkit listrik tenaga biomassa. Sistem biomassa menggunakan dua jenis penyimpanan untuk menyimpan bahan, untuk penyimpanan jangka pendek adalah bunker atau silo sedangkan untuk penyimpanan yang lebih besar adalah tempat penyimpanan bahan bakar di luar. Bahan bakar dari area penyimpanan luar dialirkan oleh sistem kontrol otomatis menggunakan beberapa kombinasi crane, stacker, reclaimers, front-end loader, belt, auger, dan transportasi pneumatik. Pada saat proses pembakaran berlangsung, bahan baku biomassa dimasukkan ke dalam tungku yang akan menghasilkan uap yang digunakan untuk memanaskan air dalam ketel. Biomassa yang digunakan untuk menghasilkan bahan bakar dalam ketel untuk menghasilkan uap adalah kayu, pellet, serbuk gergaji dan bio-oil [17].



■ Gambar 2. Prinsip kerja biomassa menjadi energi listrik [18]

Gasifikasi menjadi jalur potensial untuk mengekstraksi potensi energi surplus biomassa hutan [19]. Gasifikasi adalah transformasi termokimia dari biomassa menjadi gas dan arang yang mudah terbakar. Gas yang mudah terbakar yang diperoleh dari gasifikasi biomassa dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan listrik dengan mesin gas yang dimodifikasi ditambah dengan alternator. Selain itu, gasifikasi biomassa dapat menyediakan listrik berkelanjutan dan ramah lingkungan [20]. Gasifikasi dapat meminimalkan kerugian transmisi dan distribusi sehingga dapat meningkatkan pemanfaatan sumber daya lokal dan mengurangi biaya transportasi biomassa. Arang yang dihasilkan dari gasifikasi dapat digunakan dalam berbagai cara, seperti bahan bakar memasak bersih, pembenah tanah, pengolahan air limbah, dan bahan konstruksi [21]



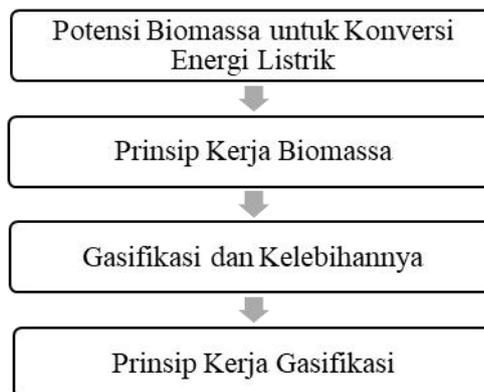
■ Gambar 3. Benefit implementasi gasifikasi [21]

Kelebihan gasifikasi adalah memiliki kapasitas gas sintesis yang mudah terbakar seperti CO dan H₂. Gas ini memiliki sifat yang memudahkan proses pembakaran dan pengapian, sehingga mempermudah penggunaan gas tersebut sebagai bahan bakar. Proses gasifikasi biomassa menghasilkan emisi yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan pembakaran langsung biomassa. Dengan pengaturan oksigen yang terbatas atau tanpa oksigen dalam proses gasifikasi, pembentukan emisi beracun seperti nitrogen oksida (NO_x) dan belerang dioksida (SO₂) dapat dikurangi. Hal ini berkontribusi pada pengurangan dampak negatif terhadap lingkungan dan kualitas udara. Gas sintesis yang dihasilkan melalui gasifikasi biomassa dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan energi, termasuk pembangkit listrik, pemanas industri, dan kebutuhan panas. Dalam beberapa kasus, gas sintesis juga dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produksi bahan kimia atau bahan bakar cair melalui proses sintesis lanjutan. Fleksibilitas ini memungkinkan penggunaan yang lebih luas dan beragam dari biomassa sebagai sumber energi [22].

METODE PENELITIAN

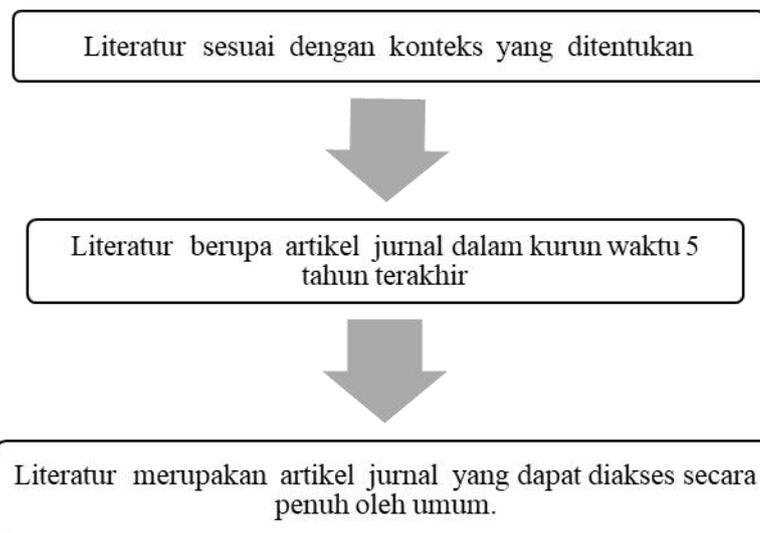
Penelitian ini dilakukan pada Mei 2023 dengan cakupan literatur mutakhir dalam kurun waktu 5 tahun. Jenis penelitian ini adalah penelitian dengan menggunakan metode *systematic review*. Penelitian *systematic review* dilakukan dengan penelaahan dengan kriteria tertentu secara terstruktur untuk mengetahui *evidence base* [23]. Data Penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu data sekunder. Data sekunder yaitu data yang diperoleh dari hasil studi literatur terkait dengan penelitian, diantaranya yaitu untuk mendapatkan informasi tentang efektivitas tanaman selada air hingga mekanisme yang digunakan pada *Rhizofiltration Technology*.

Prosedur analisis data dimulai dengan tahapan pencarian artikel. Pencarian artikel hasil penelitian dilakukan berdasarkan aspek-aspek berikut:



■ **Gambar 4.** Prosedur pencarian artikel

Sedangkan kata kunci yang digunakan untuk mencari literatur adalah Potensi Biomassa Gasifikasi,, Konversi Biomassa menjadi energi Listrik, Energi Alternatif Biomassa. Tahapan setelah pencarian artikel adalah peneliti melakukan evaluasi terhadap hasil pencarian literatur. Literatur-literatur tersebut disaring menggunakan kriteria-kriteria tertentu sehingga ditemukan artikel yang akan menjadi sumber dan acuan pada penelitian ini. Kriteria-kriteria tersebut adalah sebagai berikut:



■ **Gambar 5.** Kriteria artikel untuk menjadi sumber acuan penelitian

Jumlah keseluruhan artikel yang didapatkan selanjutnya dilakukan penyaringan sesuai dengan kriteria inklusi sehingga hasil akhir ditemukan 4 artikel yang dipilih. Artikel jurnal yang di review disajikan pada **Tabel 1** sebagai berikut:

■ **Tabel 1.** Deskripsi hasil penelitian yang relevan

No	Author	Judul	Hasil	Journal
1	Al-afifi, U. F., Syam, E., & Piter, E. (2020) [24]	Perhitungan Potensi Energi Listrik Pada Sekam Padi Melalui Metode Gasifikasi	Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di PLTD Biomassa Indramayu. Berdasarkan produksi padi di kab.Maros tahun 2016 yaitu 202.000 ton, akan menghasilkan sekitar 40.000 ton sekam padi yang setelah dimanfaatkan akan didapatkan sekitar 17.466,22 MW. Pada penelitian ini energi listrik dihasilkan dari nilai kalor dari padi setelah proses Gasifikasi yang berbentuk Msyngas. Dengan Msyngas inilah yang memberikan Energi Mekanik kepada turbin dalam memberikan stimulus kepada generator untuk menghasilkan listrik	<i>SinsETIn (Jurnal Sains, Energi, Teknologi & Industri)</i>
2	(Zhang., Tet al 2019) [25]	<i>Gasification technologies and their energy potentials</i>	Bahan bakar gas padat energi (yaitu, syngas, gas produser, gas produk, gas sintetik, atau gas sintesis) yang diperoleh dari bahan bakar padat mentah umumnya lebih efisien, serbaguna, dan mudah dikendalikan daripada bahan bakar padat mentah, dan unit pembakaran yang digunakan lebih sederhana . Oleh karena itu, teknologi gasifikasi menarik perhatian yang signifikan di seluruh dunia.	<i>Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches</i>
3	(Kozlov et al, 2019) [26]	<i>The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa biaya listrik yang dihasilkan melalui penggunaan berbagai jenis bahan bakar (gas,	<i>Energy Procedia</i>

			solar, batu bara, serpihan kayu, dan pelet kayu)menunjukkan bahwa teknologi yang paling menjanjikan untuk memproses biomassa adalah gasifikasi.
4	(Schulzke, T. 2019) [27]	<i>Biomass gasification: conversion of forest residues into heat, electricity and base chemicals</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa gasifikasi biomassa kayu dengan produksi bahan kimia digabungkan dengan elektrolisis air dari listrik terbarukan, efisiensi konversi karbon dari proses tersebut akan dinaikkan menjadi 100% atau gabungan instalasi PBTX (Daya dan Biomassa ke X) memberikan keseimbangan yang signifikan listrik ke jaringan transmisi listrik.

HASIL DAN DISKUSI

Indonesia memiliki potensi pembangkit listrik berbasis biomassa yang cukup besar dengan potensi kapasitas sebesar 32,6 gigawatt. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Alafifi dkk pada tahun 2020 menyatakan bahwa potensi energi biomassa berupa sekam padi adalah sebesar 40.400 ton per tahun [24]. Hasil penelitian Alafifi dkk pada tahun 2020 menunjukkan potensi biomassa padi untuk menghasilkan energi listrik. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Alafifi dkk pada tahun 2020 terdapat hal yang perlu diperhatikan yaitu pertimbangan tentang kontinuitas produksi ini bisa dipertahankan atau bahkan ditingkatkan dengan kurun jangka waktu yang panjang dengan mengutamakan kesehatan lingkungan. Dalam hal ini, analisis kondisi lingkungan juga dibutuhkan bagaimana dampak yang ditimbulkan dari keberlangsungan produksi energi biomassa menggunakan sekam padi. Temuan dalam penelitian ini memiliki dampak positif dalam hal investasi riset dan pengembangan teknologi sekaligus menjadi Langkah awal dalam hal diversifikasi sumber energi futuristik untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Hasil penelitian oleh Zhang et al pada tahun 2019 memberikan kontribusi positif khususnya dalam pengetahuan seputar kualitas bahan bakar padat untuk kinerja gasifikasi dimana dalam hal ini perlu memperhatikan jenis bahan bakar yang digunakan. Hal tersebut diperkuat hasil penelitian oleh Kozlov et al & Schulzke, T pada tahun 2019 menunjukkan bahwa integrasi gasifikasi biomassa dengan energi terbarukan lainnya dapat dijadikan sebagai upaya untuk meningkatkan pasokan listrik dan mencegah pencemaran lingkungan. Tidak menutup kemungkinan, dalam hal ini juga berdampak pada transformasi energi dan mitigasi perubahan iklim. Efisiensi gasifikasi sangat dipengaruhi oleh adanya *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value*(LHV) yang didalamnya terdapat komponen syngas yang memberikan dampak besar terhadap pembakaran didalam reaktor gasifikasi yang kemudian masing masing dari HHV dan LHV akan berkolaborasi dengan Massa biomassa dan Massa syngas. Proporsi Baru Terbarukan terhadap perekonomian akan meningkat menjadi 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Terakhir, EBT akan menjadi bagian terbesar dari bauran energi pada tahun 2050. Di sektor pembangkit listrik, pembangkit listrik berbahan bakar batubara akan terus mendominasi di masa depan, sedangkan pangsa listrik yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan akan meningkat dari 13% pada 2019 menjadi 23% pada 2025. Selain itu, negara Indonesia memiliki potensi biomassa yang luas sekitar 32.655MWe. Minyak kelapa sawit, yang meliputi *Palm Oil Mill Effluent* (POME), *Palm Kernel Shell* (PKS), dan *Empty Fruit Bunch* (EFB), merupakan sumber utama Indonesia [27]. Sekitar 66 pembangkit listrik tenaga

biomassa (termasuk sampah kota) telah terpasang, dengan total kapasitas 1.896,5 MW. Di industri kelapa sawit, gula, pulp, dan kertas, sebagian besar pembangkitan energi biomassa terjadi di luar jaringan. EFB dipilih sebagai tanaman biomassa yang sesuai untuk Indonesia. pemerintah Indonesia meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energi negara, termasuk sektor pembangkit listrik. Teknologi pembakaran biomassa adalah teknologi yang matang dan banyak digunakan untuk menghasilkan listrik dari limbah agro, hasil hutan, dan limbah kota. Dengan mengeluarkan arahan dan aturan yang memenuhi kebutuhan sektor ketenagalistrikan, pemerintah menunjukkan komitmen untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan beralih ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Pengembangan rencana strategis dan advokasi dukungan untuk ekspansi biomassa juga merupakan langkah yang baik. Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari bahan-bahan organik, seperti limbah pertanian, limbah kayu, dan limbah makanan. Menggunakan biomassa sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [9].

Berdasarkan hasil laporan Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional tentang Analisis Neraca Energi Nasional menyatakan bahwa Potensi biomassa dari limbah industri sebesar 15.635,7 MWe yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia dimana Provinsi Riau dan Provinsi Sumatera Selatan memiliki potensi limbah industri terbesar masing-masing sebesar 5.868,9 MWe dan 2.558,5 MWe. [5] Berdasarkan data dari HEESI perkembangan pembangkit listrik biomassa terlihat pada Tabel 2 sebagai berikut

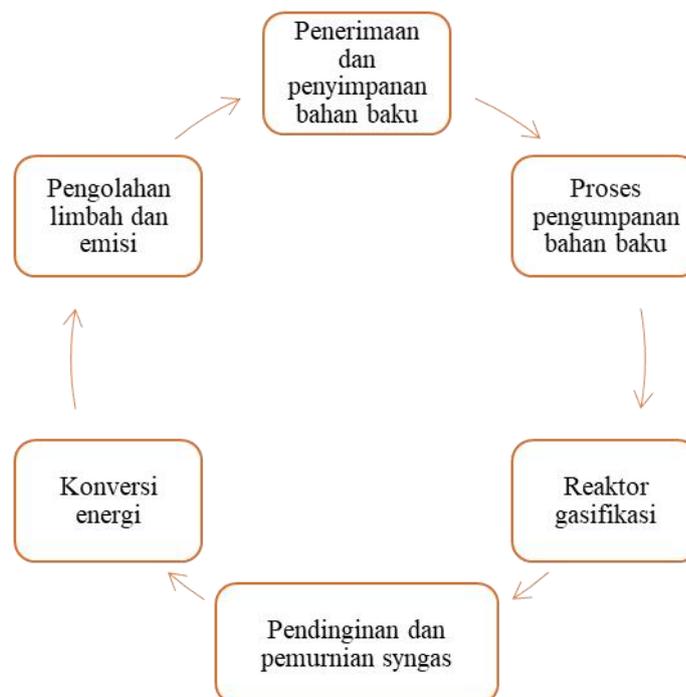
■ **Tabel 2.** Produksi listrik pembangkit listrik tenaga biomassa tahun 2016-2021 [5]

Tahun	On Grid	Off Grid	Total (GWh)
2016	584,1	n.a	584,1
2017	534,1	m.a	534,1
2018	526	11.325,1	11.851,0
2019	218,8	11.328,5	11.547,3
2020	195	11.359,6	11.554,6
2021	222,2	13.803,2	14.025,4

Gasifikasi adalah proses termokimia di mana bahan bakar padat atau cair (termasuk biomassa) diubah menjadi gas sintesis (syngas) melalui reaksi kimia dengan suhu tinggi. Ini berlaku untuk bahan bakar fosil seperti batu bara dan minyak bumi, serta untuk biomassa. Dalam proses gasifikasi biomassa, bahan bakar biomassa seperti limbah pertanian, limbah kayu, atau tanaman energi seperti jerami, dipanaskan pada suhu tinggi dalam lingkungan yang terbatas oksigen (oksigen terbatas atau tanpa oksigen). Akibatnya, bahan bakar biomassa mengalami reaksi kimia yang kompleks dan menghasilkan gas sintesis (syngas) yang terdiri dari karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan sejumlah kecil senyawa lainnya. Kondisi reaksi gasifikasi berlangsung di bawah gasifier. Dengan demikian, gasifier adalah variabel yang sangat penting yang mempengaruhi proses reaksi selama gasifikasi. Secara umum, gasifier dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok besar yang dikenal sebagai unggun tetap, gasifier unggun terfluidisasi, dan gasifier aliran entrained [28]. Faktor pendukung pemanfaatan biomassa gasifikasi meliputi potensi sumber daya yang melimpah, pengelolaan limbah, reduksi emisi gas rumah kaca. Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang dapat diperbaharui. Dalam gasifikasi, biomassa digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan gas sintesis (syngas), yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam pembangkit listrik. Penggunaan biomassa membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang terbatas dan memberikan kontribusi terhadap diversifikasi energi. Indonesia memiliki potensi biomassa yang melimpah, termasuk limbah pertanian, limbah kayu, limbah kelapa sawit, dan limbah makanan. Dengan memanfaatkan sumber daya biomassa yang ada, pemanfaatan biomassa gasifikasi dapat menjadi solusi yang berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Gasifikasi biomassa dapat membantu mengelola limbah organik dengan cara yang efisien dan berkelanjutan. Limbah pertanian, limbah kayu, dan limbah makanan dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses gasifikasi, mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan dan mengubahnya menjadi sumber energi. Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar dalam gasifikasi dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca. Meskipun gasifikasi menghasilkan emisi CO₂, jumlahnya dapat dikurangi dengan mengadopsi teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (Carbon Capture and Storage, CCS). Selain itu, biomassa sebagai bahan bakar memiliki siklus karbon yang lebih berkelanjutan, karena karbon yang dilepaskan saat pembakaran biomassa sebanding dengan jumlah karbon yang diabsorpsi selama pertumbuhan tanaman.

Dalam konteks pembangkitan listrik skala mikro, teknologi gasifikasi biomassa menawarkan solusi yang berkelanjutan dan dapat memberikan manfaat lokal dalam memenuhi kebutuhan energi listrik. Pembangkit listrik gasifikasi yang diproduksi di Jerman umumnya terdiri dari beberapa bagian penyusun yang penting, dan alur kerjanya secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut:

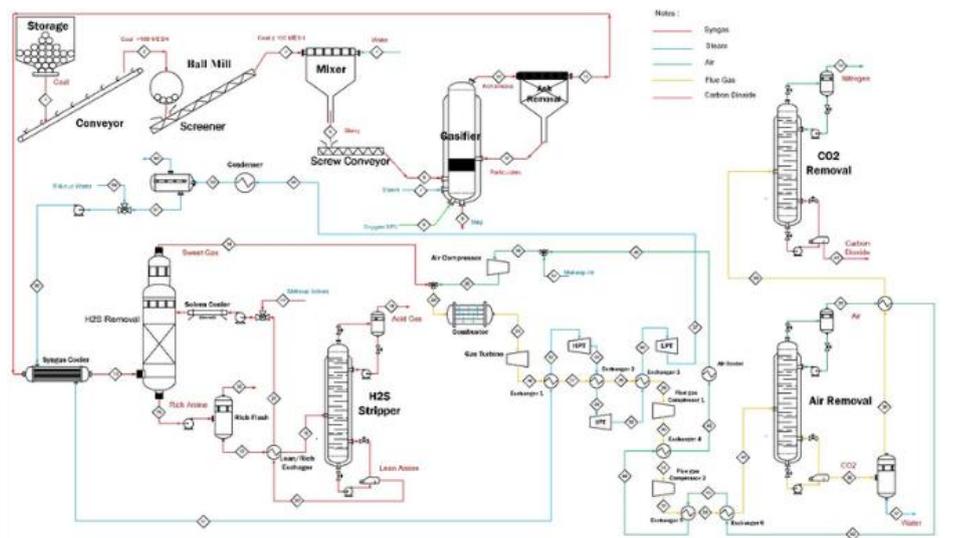
1. Penerimaan dan penyimpanan bahan baku: Bahan baku biomassa (seperti limbah pertanian, limbah kayu, atau tanaman energi) diterima dan disimpan di area yang sesuai sebelum dimasukkan ke dalam sistem gasifikasi. Bahan baku ini harus diolah dan dipersiapkan sebelum masuk ke proses gasifikasi.
2. Proses pengumpanan bahan baku: Bahan baku biomassa dimasukkan ke dalam reaktor gasifikasi melalui sistem pengumpanan yang sesuai. Pada tahap ini, bahan baku akan mengalami proses pengeringan dan penghancuran untuk memastikan kualitas dan kecocokan dengan reaktor gasifikasi.
3. Reaktor gasifikasi: Reaktor gasifikasi adalah pusat dari pembangkit listrik gasifikasi. Di dalam reaktor ini, bahan baku biomassa dipanaskan pada suhu tinggi dan diubah menjadi gas sintesis (syngas) melalui reaksi kimia. Reaksi ini terjadi dalam lingkungan yang terbatas oksigen atau tanpa oksigen, tergantung pada jenis gasifikasi yang digunakan (misalnya, gasifikasi dengan udara atau gasifikasi tanpa udara).
4. Pendinginan dan pemurnian syngas: Setelah terbentuk, syngas yang dihasilkan dari reaktor gasifikasi harus didinginkan dan dimurnikan. Langkah ini melibatkan penggunaan alat seperti penukar panas dan penyaring untuk menghilangkan partikel padat, mengurangi suhu, dan memisahkan komponen yang tidak diinginkan, seperti partikel abu atau senyawa sulfur.
5. Konversi energi: Syngas yang sudah didinginkan dan dimurnikan kemudian digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Syngas masuk ke unit mesin pembangkit listrik, di mana dapat membakar dengan udara atau campuran oksigen untuk menggerakkan turbin. Energi kinetik yang dihasilkan oleh turbin kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator.
6. Pengolahan limbah dan emisi: Proses gasifikasi biomassa menghasilkan limbah berupa abu dan residu yang perlu dikelola dengan baik. Sistem pengolahan limbah dan pengendalian emisi digunakan untuk mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit listrik gasifikasi, termasuk pemisahan dan pengolahan abu, pengendalian emisi gas buang, dan pengelolaan limbah gasifikasi.



■ **Gambar 7.** Alur kerja . Pembangkit listrik gasifikasi yang diproduksi di Jerman

Pendapat NMA (National Mining Association) menyatakan bahwa EPA (Environmental Protection Agency) harus mengadopsi standar yang sehat dan seimbang yang sesuai dengan

kinerja emisi dari teknologi siklus gabungan gasifikasi superkritik dan terintegrasi yang baru dan sangat efisien. Teknologi ini telah terbukti, tersedia secara komersial, dan mampu menghasilkan pengurangan emisi yang nyata dan substansial, yakni sekitar 20% lebih rendah dari tingkat emisi rata-rata pembangkit subkritik yang umum digunakan dalam industri batubara saat ini. Pendapat ini menekankan pentingnya penggunaan teknologi gasifikasi superkritik yang terintegrasi dalam industri batubara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan lainnya. Dengan mengadopsi teknologi ini, diharapkan dapat mencapai target pengurangan emisi yang signifikan dalam sektor pembangkit listrik, yang sejalan dengan upaya mitigasi perubahan iklim. Standar seimbang yang diperjuangkan oleh NMA mengindikasikan perlunya regulasi yang mengakui dan mendorong penggunaan teknologi inovatif, seperti gasifikasi yang dapat meningkatkan efisiensi pembangkit listrik dan mengurangi dampak lingkungan secara signifikan.



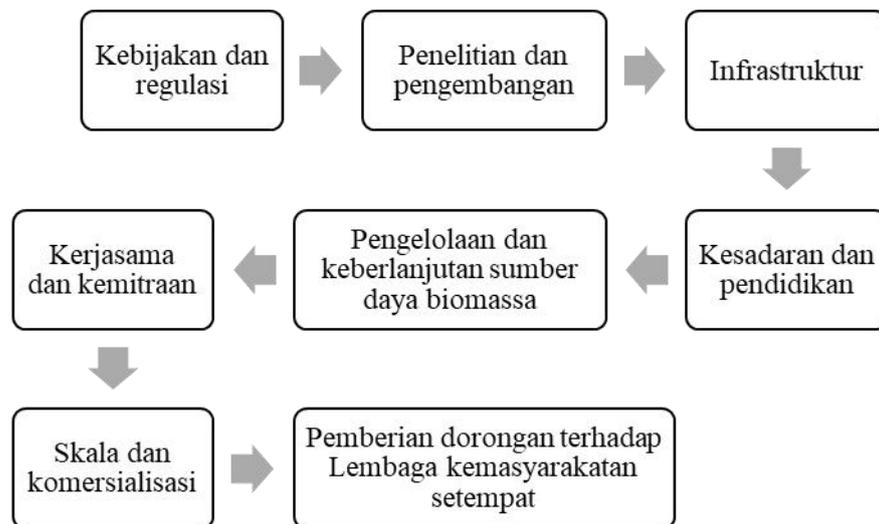
■ Gambar 8. Contoh teknologi gasifikasi [29]

Gambar 8 merupakan contoh teknologi gasifikasi dengan model IGCC (*Integrated Coal Gasification of Fuel Cell Combined Cycle*). Teknologi gasifikasi dengan model IGCC bahan bakar yang digunakan berasal dari bahan bakar padat bermutu rendah seperti kayu, residu kilang dan *petroleum cokes*. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa proses IGCC terdiri dari 5 tahap. Tahap pertama dimulai dengan mempersiapkan batu bara dengan cara dihancurkan dan dicampur dengan air. Pada tahap kedua Slurry batubara dicampur dengan O₂ murni (95%) dan uap air untuk menghasilkan ray syngas. Pada tahap ketiga, Raw syngas didinginkan dan dibersihkan untuk menghilangkan gas H₂S menggunakan unit absorpsi dengan pelarut MDEA. Pada tahap keempat dilakukan pembersihan gas-gas asam seperti H₂S dan CO₂ dari syngas. Pada tahap kelima, Syngas yang telah dibersihkan akan dibakar pada unit combustor dan hasil dari pembakaran tersebut akan digunakan sebagai penggerak pada unit gas turbin untuk menghasilkan listrik.

Sejumlah Tindakan penting direncanakan untuk peningkatan penggunaan sumber biomassa sebagai sumber energi listrik antara lain sebagai berikut:

1. Kebijakan dan regulasi: Pemerintah dapat mengeluarkan kebijakan dan regulasi yang mendukung penggunaan biomassa gasifikasi sebagai sumber energi listrik yang berkelanjutan. Hal ini termasuk penetapan target penggunaan energi terbarukan, insentif fiskal dan pajak, serta peraturan yang mendorong investasi dan pengembangan teknologi gasifikasi biomassa.
2. Penelitian dan pengembangan: Diperlukan penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi dan kehandalan teknologi gasifikasi biomassa. Investasi dalam riset dan pengembangan dapat mengarah pada penemuan teknologi baru, peningkatan efisiensi termal, pengurangan emisi, dan penanganan limbah dari proses gasifikasi biomassa.
3. Infrastruktur: Penting untuk membangun infrastruktur yang mendukung penggunaan biomassa gasifikasi. Ini meliputi pembangunan pabrik gasifikasi, jaringan distribusi gas, dan sistem penyimpanan dan pengiriman biomassa yang efisien. Infrastruktur yang memadai akan memfasilitasi produksi dan penggunaan syngas biomassa secara lebih luas.

4. Kesadaran dan pendidikan: Dibutuhkan upaya untuk meningkatkan kesadaran dan pemahaman masyarakat tentang potensi dan manfaat penggunaan biomassa gasifikasi sebagai alternatif berkelanjutan dalam menghasilkan energi listrik. Kampanye informasi, program pendidikan, dan pelatihan dapat membantu mengedukasi masyarakat, petani, dan pemangku kepentingan lainnya tentang potensi biomassa sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui
5. Kerjasama dan kemitraan: Kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, dan lembaga riset sangat penting dalam mendorong penggunaan biomassa gasifikasi. Kemitraan strategis dapat mempercepat pengembangan teknologi, investasi, dan transfer pengetahuan dalam bidang gasifikasi biomassa.
6. Pengelolaan dan keberlanjutan sumber daya biomassa: Penting untuk memastikan pengelolaan yang berkelanjutan dari sumber daya biomassa yang digunakan dalam gasifikasi. Praktik pertanian berkelanjutan, pengelolaan limbah organik, dan diversifikasi sumber biomassa dapat membantu mengurangi tekanan terhadap lingkungan dan menjaga ketersediaan bahan baku biomassa untuk jangka panjang.
7. Skala dan komersialisasi: Dalam rangka meningkatkan pemanfaatan biomassa gasifikasi, perlu dilakukan skala dan komersialisasi teknologi. Proyek-proyek demonstrasi dan pengembangan komersial dapat membantu mengatasi tantangan teknis dan ekonomi serta membuktikan kelayakan dan keberlanjutan penggunaan biomassa gasifikasi dalam skala yang lebih besar.
8. Pemberian dorongan terhadap Lembaga kemasyarakatan setempat untuk berperan sebagai perusahaan penyedia jasa yang bertanggungjawab terhadap pengoperasian dan perawatan unit gasifikasi.



■ **Gambar 9.** Tindakan untuk peningkatan penggunaan biomassa gasifikasi

KESIMPULAN

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah. Limbah pertanian, limbah kayu, tanaman energi, dan limbah organik lainnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk gasifikasi. Penggunaan biomassa sebagai sumber energi membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Peneliti-penelitian yang dilakukan oleh Alafifi, Zhang et al, Kozlov et al dan Schulzke menunjukkan bahwa biomassa memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan. Karakteristik gasifikasi untuk menjadi syngas melalui reaksi kimia pada suhu tinggi dengan ketersediaan oksigen terbatas atau tanpa oksigen. Hasil dari gasifikasi adalah menghasilkan syngas yang tersusun atas beberapa komponen seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan sejumlah kecil senyawa lainnya. Proses gasifikasi biomassa dapat mencapai tingkat efisiensi yang tinggi dalam menghasilkan energi listrik. Teknologi gasifikasi terus mengalami peningkatan dalam hal efisiensi termal dan konversi energi, sehingga lebih efisien dibandingkan dengan metode konvensional lainnya. Potensi yang dimiliki oleh biomassa gasifikasi, pengembangan dan pemanfaatan teknologi ini sebagai alternatif berkelanjutan dalam menghasilkan energi listrik sangat penting untuk masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Zhang, I. Khan, and M. W. Zafar, "Assessing environmental quality through natural resources, energy resources, and tax revenues," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 59, pp. 89029–89044, Dec. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-22005-z.
- [2] G. Yadav, T. Mathimani, M. Sekar, R. Sindhu, and A. Pugazhendhi, "Strategic evaluation of limiting factors affecting algal growth – An approach to waste mitigation and carbon dioxide sequestration," *Sci. Total Environ.*, vol. 796, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149049.
- [3] S. Algarni, V. Tirth, T. Alqahtani, S. Alshehery, and P. Kshirsagar, "Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 56, p. 103098, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103098.
- [4] L. Parinduri and T. Parinduri, "Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *J. Electr. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 88–92, 2020, [Online]. Available: <https://www.dosenpendidikan>.
- [5] Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, "Laporan Analisis Neraca Energi Nasional," *Sekr. Jenderal Dewan Energi Nas.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–108, 2022.
- [6] S. A. Arsita, G. E. Saputro, and S. Susanto, "Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia," *J. Syntax Transform.*, vol. 2, no. 12, pp. 1779–1788, Dec. 2021, doi: 10.46799/JST.V2I12.473.
- [7] V. Schnorf, E. Trutnevte, G. Bowman, and V. Burg, "Biomass transport for energy: Cost, energy and CO2 performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland," *J. Clean. Prod.*, vol. 293, p. 125971, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.125971.
- [8] Y. Wu *et al.*, "Applications of catalysts in thermochemical conversion of biomass (pyrolysis, hydrothermal liquefaction and gasification): A critical review," *Renew. Energy*, vol. 196, pp. 462–481, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.07.031.
- [9] P. R. Havilah, A. K. Sharma, G. Govindasamy, L. Matsakas, and A. Patel, "Biomass Gasification in Downdraft Gasifiers: A Technical Review on Production, Up-Gradation and Application of Synthesis Gas," *Energies 2022, Vol. 15, Page 3938*, vol. 15, no. 11, p. 3938, May 2022, doi: 10.3390/EN15113938.
- [10] H. MacDonald, E. Hope, K. de Boer, and D. W. McKenney, "Sentiments toward use of forest biomass for heat and power in canadian headlines," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13254, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.HELIVON.2023.E13254.
- [11] T. Plankenbühler, D. Müller, and J. Karl, "An adaptive and flexible biomass power plant control system based on on-line fuel image analysis," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 40, p. 101765, May 2023, doi: 10.1016/J.TSEP.2023.101765.
- [12] J. A. Kumar *et al.*, "Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies," *Chemosphere*, vol. 331, p. 138680, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138680.
- [13] N. Sasaki, "Timber production and carbon emission reductions through improved forest management and substitution of fossil fuels with wood biomass," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 173, p. 105737, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105737.
- [14] P. Addai, A. K. Mensah, E. Sekyi-Annan, and E. O. Adjei, "Biochar, compost and/or NPK fertilizer affect the uptake of potentially toxic elements and promote the yield of lettuce grown in an abandoned gold mine tailing," *J. Trace Elem. Miner.*, vol. 4, p. 100066, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JTEMIN.2023.100066.
- [15] N. Shabani, S. Akhtari, and T. Sowlati, "Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 299–311, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.005.

- [16] Z. N. Milovanović, D. L. Branković, and V. Z. Janičić Milovanović, "Efficiency of condensing thermal power plant as a complex system—An algorithm for assessing and improving energy efficiency and reliability during operation and maintenance," *Reliab. Model. Ind.* 4.0, pp. 233–325, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-99204-6.00005-4.
- [17] Y. Yu *et al.*, "Steam explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, p. 111871, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111871.
- [18] C. T. K. Kho, J. Ahmed, S. Kashem, and Y. L. Then, "A comprehensive review on PV configurations to maximize power under partial shading," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2017-December, pp. 763–768, Dec. 2017, doi: 10.1109/TENCON.2017.8227962.
- [19] S. L. Narnaware and N. L. Panwar, "Biomass gasification for climate change mitigation and policy framework in India: A review," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 17, p. 100892, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.BITEB.2021.100892.
- [20] K. Kang, N. B. Klinghoffer, I. ElGhamrawy, and F. Berruti, "Thermochemical conversion of agroforestry biomass and solid waste using decentralized and mobile systems for renewable energy and products," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 149, p. 111372, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111372.
- [21] Ankush Halba, Praveen Kumar, and Vidyarthi, "Gasification as a potential solution for forest fires in the Indian Himalayan Region: A review," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 19, p. 101162, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.BITEB.2022.101162.
- [22] H. Shahbeig, A. Shafizadeh, M. A. Rosen, and B. F. Sels, "Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review," *Biofuel Res. J.*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.18331/BRJ2022.9.1.5.
- [23] R. van Dinter, B. Tekinerdogan, and C. Catal, "Automation of systematic literature reviews: A systematic literature review," *Information and Software Technology*, vol. 136. 2021. doi: 10.1016/j.infsof.2021.106589.
- [24] U. F. Al-afifi, E. Syam, and E. Piter, "Perhitungan Potensi Energi Listrik Pada Sekam Padi Melalui Metode Gasifikasi," *SainETIn J. Sains, Energi, Teknol. dan Ind.*, vol. 4, no. 2, pp. 48 – 56–48 – 56, Mar. 2020, doi: 10.31849/SAINETIN.V4I2.4329.
- [25] Y. Zhang *et al.*, "Gasification Technologies and Their Energy Potentials," *Sustain. Resour. Recover. Zero Waste Approaches*, pp. 193–206, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-64200-4.00014-1.
- [26] A. Kozlov, O. Marchenko, and S. Solomin, "The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1004–1008, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.01.244.
- [27] Kazuyuki, Murakami, et al. Biomass and Coal Co-combustion in the ASEAN Region (Phase 2). 2021.
- [28] Abeth Novria Sonjaya, A. N. S. Analisis Simulasi Gasifikasi Sampah Padat Kota Dengan Fixed Bed Downdraft Gasifier (Studi Kasus Tpa Putri Cempo Surakarta). 2022. PhD Thesis. Universitas Jayabaya.
- [29] Wahid, Abdul, Et Al. Exergy Analysis Of Coal-Fired Power Plants In Ultra Supercritical Technology Versus Integrated Gasification Combined Cycle. 2020.
- [30] Adistia, Nurul Amandha, et al. "Potensi energi panas bumi, angin, dan biomassa menjadi energi listrik di Indonesia." *TESLA: Jurnal Teknik Elektro* 22.2 (2020): 105-116.