



Exploring The Potential of Laser Technology to Enhance The Performance of Renewable Energy Power Generation

Irwanuddin Irwanuddin¹, Syamsul Ma'arif^{2*}

¹Center for Nuclear Innovation and Renewable Energy Studies (PUSPINEBT), Indonesian Muslim Intellectual Association (ICMI), Jakarta

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa, Yogyakarta

Abstract

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pemanfaatan teknologi laser dalam meningkatkan kinerja sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan, dengan fokus pada energi surya, energi angin, energi air, dan energi biomassa. Pendekatan literatur dan analisis komprehensif digunakan dalam penelitian ini. Metode analisis data yang digunakan adalah deskriptif dan sintesis. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa teknologi laser dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pemanfaatan energi terbarukan. Pada sistem pembangkit listrik tenaga surya, teknologi laser digunakan untuk meningkatkan penyerapan radiasi matahari dalam aplikasi solar thermophotovoltaics dan desain panel surya yang fleksibel. Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin, teknologi laser digunakan dalam pengukuran laju aliran angin jarak jauh menggunakan LiDAR, validasi beban turbin angin, dan meningkatkan kontrol turbin angin. Pada sistem pembangkit listrik tenaga air, teknologi laser digunakan dalam melindungi dan memantau bilah turbin air untuk mencegah erosi dan kerusakan. Pada sistem pembangkit listrik tenaga biomassa, teknologi laser digunakan untuk mendeteksi unsur kimia dalam proses konversi energi dan menganalisis sifat-sifat biomassa. Dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan teknologi laser dalam pembangkit listrik dari energi terbarukan memberikan potensi yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja, serta berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Received :

Revised :

Accepted :

Keywords: teknologi laser, energi terbarukan, pembangkit listrik, efisiensi, berkelanjutan

(*)Corresponding Author : syamsul.maarif@ustjogja.ac.id (+62 81548695337)

How to Cite: Irwanuddin, I., & Ma'arif, S. (2023). Eksplorasi Potensi Teknologi Laser untuk Meningkatkan Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Terbarukan. *SainsMath: Jurnal MIPA Sains Terapan*, 2(1): xx-xx.

PENDAHULUAN

Dalam era yang semakin sadar akan pentingnya keberlanjutan dan perlindungan lingkungan, energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam upaya memenuhi kebutuhan

energi global (Jaiswal, et al., 2022). Dibandingkan dengan sumber energi konvensional seperti bahan bakar fosil, energi terbarukan menawarkan berbagai keuntungan yang signifikan. Sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, air, dan biomassa, adalah sumber daya alam yang tak terbatas yang dapat digunakan secara berkelanjutan tanpa mengurangi potensinya di masa depan. Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi telah berperan penting dalam memajukan penggunaan energi terbarukan. Inovasi terus muncul dalam bidang energi terbarukan, termasuk peningkatan efisiensi, pengurangan biaya, dan pengembangan infrastruktur yang mendukung (Gielen, et al., 2019). Seiring dengan perkembangan teknologi ini, pemanfaatan energi terbarukan semakin dapat diintegrasikan ke dalam sistem energi global, menyumbang pada diversifikasi sumber energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Pupo-Roncallo, et al., 2019).

Salah satu teknologi yang telah mengalami kemajuan pesat adalah teknologi laser. Teknologi laser telah menemukan berbagai aplikasi dalam berbagai bidang, termasuk dalam pengembangan sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan (Gupta & Carlson, 2015). Sifat unik laser yang dapat menghasilkan sinar terkonsentrasi dan terfokus memberikan potensi yang menarik dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi dalam berbagai sektor, termasuk dalam sistem pembangkit listrik. Dalam energi terbarukan, penggunaan teknologi laser dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan.

Pemanfaatan teknologi laser dalam sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan telah menjadi bidang penelitian yang menarik. Teknologi laser digunakan untuk berbagai tujuan, seperti meningkatkan efisiensi panel surya (Desta, et al., 2016), memantau dan melindungi turbin (Schuerhoff, et al., 2015), serta menganalisis sifat-sifat biomassa dalam pembangkit listrik tenaga biomassa (Zhang, et al., 2020). Teknologi laser juga digunakan dalam deteksi dan pemantauan unsur kimia dalam konversi energi pada pembangkit listrik tenaga biomassa (Viljanen, 2019). Hasil penelitian tersebut memberikan wawasan yang berharga tentang potensi teknologi laser dalam meningkatkan kinerja sistem pembangkit listrik energi terbarukan. Namun, tinjauan literatur yang komprehensif terkait pemanfaatan teknologi laser pada sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan masih terbatas. Melalui tinjauan literatur ini, dapat diidentifikasi kemajuan terbaru dalam penggunaan teknologi laser dalam berbagai aspek pembangkit listrik dari energi terbarukan, serta keuntungan dan potensi yang ditawarkan oleh teknologi ini.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki potensi teknologi laser dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan. Dalam artikel *review* ini, akan dieksplorasi penggunaan teknologi laser dalam pembangkit listrik dari energi terbarukan. Penelitian ini akan membahas pemanfaatan teknologi laser dalam sistem pembangkit listrik dari energi terbarukan, antara lain energi surya, energi angin, energi air, dan energi biomassa. Melalui pemahaman yang lebih mendalam tentang potensi teknologi laser, diharapkan dapat mendorong pengembangan sistem pembangkit listrik energi terbarukan yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan literatur dan analisis komprehensif untuk menjawab tujuan penelitian yang dirumuskan. Pendekatan ini melibatkan tinjauan literatur yang menyeluruh tentang penggunaan teknologi laser dalam pembangkitan listrik dari sumber energi terbarukan. Metode ini memungkinkan untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang aplikasi teknologi laser dan manfaat yang telah dicapai.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui pencarian literatur yang tersedia luas di internet. Sumber data utama meliputi jurnal ilmiah, konferensi atau prosiding, laporan penelitian, dan sumber informasi terpercaya lainnya yang relevan dengan penggunaan teknologi laser dalam pembangkitan listrik berbasis energi terbarukan. Proses pencarian data dilakukan melalui basis data akademik dan *platform* pencarian informasi ilmiah, termasuk Google Scholar. Sejumlah kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat diterapkan dalam pemilihan sumber data yang relevan dan berkualitas tinggi, seperti artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam Bahasa

Inggris maupun Bahasa Indonesia, artikel yang dipublikasikan setelah tahun 2015, dan artikel yang fokus membahas penggunaan teknologi laser untuk meningkatkan performa sistem pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui metode deskriptif dan sintesis. Data yang dikumpulkan dari berbagai sumber literatur dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi pola dan temuan penting terkait penggunaan teknologi laser dalam pembangkitan listrik berbasis energi terbarukan. Informasi yang relevan dan signifikan ditarik dari literatur yang diidentifikasi dan disajikan secara komprehensif dalam artikel *review* ini.

HASIL & PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pemanfaatan teknologi laser dalam meningkatkan performa dan efisiensi sistem pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan. Sejumlah penelitian terdahulu yang relevan telah dilakukan dan disajikan dalam Tabel 1, sehingga memberikan dasar yang kuat bagi penelitian ini. Melalui tinjauan penelitian sebelumnya, kemudian dilakukan identifikasi potensi dan keuntungan yang ditawarkan oleh teknologi laser dalam teknologi konversi energi yang bersumber dari energi terbarukan. Selain itu, penelitian ini berusaha memahami kontribusi dan peran teknologi laser dalam mengoptimalkan pembangkit listrik berkelanjutan.

Tabel 1. Ringkasan dan pemetaan penelitian sebelumnya

Sumber RE & Teknologi	Fungsi Laser	Deskripsi	Referensi
Surya: Panel Surya	Optimasi dalam pembuatan modul panel surya	Teknologi laser digunakan untuk menciptakan dan memanipulasi struktur berpola yang meningkatkan penyerapan radiasi matahari dalam aplikasi solar thermophotovoltaics dan aplikasi termal surya dengan desain yang fleksibel dan fitur-fitur yang diinginkan.	(Khodasevych, et al., 2015)
		Sinar laser femtosecond yang difokuskan ke dalam material enkapsulasi untuk memodifikasi konstanta optiknya, sehingga mengurangi bayangan optik dari metallization logam bagian depan sel surya dan meningkatkan kinerja optiknya.	(Peharz, et al., 2015)
		Teknologi laser digunakan untuk menciptakan arsitektur back-reflector baru dengan struktur mikro penc scattering cahaya, meningkatkan penyerapan cahaya dalam sel surya film tipis, dan meningkatkan efisiensi sel surya.	(Desta, et al., 2016)
Angin: Turbin Angin	Optimasi dan pemantauan permerfa turbin angin berbasis LiDAR	Teknologi laser digunakan untuk mengukur laju aliran angin jarak jauh menggunakan LiDAR, sehingga memberikan pengukuran yang lebih akurat dan representatif terhadap pola aliran angin, serta digunakan untuk mengoptimalkan kinerja turbin angin.	(Borraccino, 2017)
		Teknologi laser dalam LiDAR digunakan untuk mengukur data vertikal kecepatan angin dan beberapa parameter potensi pembangunan turbin angin, sehingga memberikan evaluasi yang dapat diandalkan dengan cara yang lebih efektif dan biaya yang lebih.	(Li & Yu, 2017)
		Teknologi laser digunakan untuk validasi beban turbin angin menggunakan pengambilan data angin berbasis LiDAR. Pengukuran angin dan perkiraan beban turbin angin dilakukan secara aeroelastik tanpa menggunakan tiang meteorologi.	(Dimitrov, et al., 2019) (Goit, et al., 2019)

Sumber RE & Teknologi	Fungsi Laser	Deskripsi	Referensi
		Teknologi laser digunakan untuk membandingkan pengukuran kecepatan angin dan arah angin pada indikator yang ada pada turbin angin berbasis metode LiDAR, sehingga menghasilkan koefisien koreksi yang akurat.	(Wang, et al., 2023)
		Teknologi laser digunakan untuk mengevaluasi tingkat keparahan hembusan angin menggunakan metode LiDAR, dengan mengidentifikasi ancaman dan mengambil tindakan pencegahan untuk menghindari beban tinggi pada turbin angin.	(Bos, et al., 2016)
		Teknologi laser digunakan untuk meningkatkan kontrol turbin angin dengan LiDAR sebagai sensor tambahan, yang memungkinkan pengembangan teknik kontrol baru untuk mengurangi beban struktural dan meningkatkan produksi energi.	(Scholbrock, et al., 2016)
	Mendeteksi cacat dan kerusakan pada baling-baling turbin angin	Pengembangan sistem <i>shearography laser</i> yang kompak untuk inspeksi robotik on-site pada baling-baling turbin angin, dengan tujuan mendeteksi cacat subsurface dan kerusakan pada material komposit.	(Li, et al., 2021) (Li, et al., 2020)
		Teknologi laser digunakan untuk mengembangkan teknik termografi garis kontinu yang mampu memvisualisasikan kerusakan pada baling-baling turbin angin saat berputar, dengan menggunakan metode nonkontak, pengambilan data tanpa pemindaian spasial, dan interpretasi data yang intuitif.	(Hwang, et al., 2017)
Air: Turbin Air	Pemantauan dan perlindungan bilah turbin air	Teknologi laser digunakan untuk melindungi bilah baja turbin uap bertekanan rendah dari erosi tetesan air dengan menggunakan teknik perlindungan erosi dan perlakuan laser yang otomatis, sehingga meningkatkan ketahanan dan umur pakai bilah turbin.	(Schuerhoff, et al., 2015)
		Teknologi laser digunakan untuk melakukan restorasi ujung bilah turbin melalui teknologi deposisi logam, dengan metode restorasi yang optimal maka akan meningkatkan umur pakai dan mengurangi biaya pemeliharaan.	(Ciappi, et al., 2021)
		Perbandingan teknologi laser dan fotogrametri digital dalam pemindaian geometri bilah turbin air untuk mengetahui deviasi antara keduanya.	(Nedelcu, et al., 2020)
Biomassa	Meningkatkan efisiensi proses pirolisis dan gasifikasi	Teknologi laser digunakan dalam pengembangan proses pirolisis dan gasifikasi yang lebih cepat dan canggih, untuk menghasilkan bioenergi berbahan bakar, biogas, dan biochar dengan lebih efektif dan efisien.	(Tursunov & Dobrowolski, 2015)
	Mendeteksi unsur kimia dalam proses konversi energi	Teknologi laser digunakan sebagai alat diagnostik <i>online</i> untuk memantau kimia suhu tinggi dalam pembakaran biomassa, termasuk suhu, oksigen, dan elemen-elemen penting dalam konversi termal biomassa, dengan metode <i>Collinear Photofragmentation and Atomic Absorption Spectroscopy</i> (CPFAAS) dan <i>Microwave-Assisted Laser-Induced Breakdown Spectroscopy</i> (MW-LIBS).	(Viljanen, 2019)

Sumber RE & Teknologi	Fungsi Laser	Deskripsi	Referensi
	Menganalisis sifat-sifat biomassa	Teknologi laser digunakan untuk meningkatkan analisis kuantitatif sifat-sifat batubara menggunakan <i>laser induced breakdown spectroscopy</i> (LIBS), termasuk analisis proksimat (nilai kalor, abu, kandungan volatil) dan analisis ultimate (karbon dan hidrogen).	(Zhang, et al., 2020)

1. Pemanfaatan Teknologi Laser pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat menjanjikan dalam mengatasi tantangan energi dan dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil. Dalam upaya untuk mengoptimalkan efisiensi PLTS, pemanfaatan teknologi laser telah menjadi fokus penelitian untuk meningkatkan performa modul panel surya, seperti terlihat pada Tabel 1.

Salah satu manfaat teknologi laser dalam pembuatan modul panel surya adalah kemampuannya untuk menciptakan dan memanipulasi struktur berpola yang meningkatkan penyerapan radiasi matahari dalam aplikasi solar thermophotovoltaics dan aplikasi termal surya dengan desain yang fleksibel dan fitur-fitur yang diinginkan (Khodasevych, et al., 2015). Dalam penelitian ini, laser digunakan untuk menciptakan struktur berpola yang dirancang khusus untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya oleh sel surya. Dengan meningkatnya penyerapan radiasi matahari, modul panel surya dapat menghasilkan lebih banyak energi listrik.

Selain itu, teknologi laser juga telah digunakan dalam modifikasi material enkapsulasi sel surya dengan memfokuskan sinar laser femtosecond ke dalam material tersebut (Peharz, et al., 2015). Dalam penelitian ini, sinar laser femtosecond digunakan untuk mengubah konstanta optik material enkapsulasi, yang pada gilirannya mengurangi bayangan optik yang dihasilkan oleh metallization logam pada bagian depan sel surya. Dengan mengurangi bayangan optik ini, penyerapan cahaya oleh sel surya dapat ditingkatkan, sehingga meningkatkan kinerja optiknya dan meningkatkan efisiensi konversi energi surya menjadi listrik.

Penelitian lainnya menunjukkan bahwa teknologi laser dapat digunakan untuk menciptakan arsitektur back-reflector baru dengan struktur mikro pencatatan cahaya (Desta, et al., 2016). Struktur ini dirancang untuk meningkatkan penyerapan cahaya dalam sel surya film tipis, yang umumnya memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan sel surya silikon kristal. Dengan meningkatkan penyerapan cahaya, efisiensi sel surya film tipis dapat ditingkatkan, sehingga meningkatkan output energi dari modul panel surya.

Secara keseluruhan, penggunaan teknologi laser dalam pembuatan modul panel surya pada PLTS memiliki potensi besar dalam mengoptimalkan efisiensi dan performa sel surya. Dengan menciptakan dan memanipulasi struktur berpola, memodifikasi konstanta optik material enkapsulasi, dan menciptakan arsitektur back-reflector baru, teknologi laser dapat meningkatkan penyerapan cahaya, mengurangi bayangan optik, dan meningkatkan efisiensi konversi energi surya menjadi listrik. Dalam pengembangan masa depan, pemanfaatan teknologi laser ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan PLTS yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. Pemanfaatan Teknologi Laser pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin

2.1. Optimasi dan Pemantauan Performa Turbin Angin Berbasis LiDAR

Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB) merupakan sumber energi terbarukan yang semakin populer dalam upaya mengurangi emisi karbon dan meningkatkan keberlanjutan energi. Dalam rangka mengoptimalkan dan memantau kinerja turbin angin, teknologi laser telah digunakan dengan menggunakan sistem LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Berbagai penelitian sebelumnya diidentifikasi seperti terlihat pada Tabel 1.

Penggunaan teknologi laser dalam LiDAR memungkinkan pengukuran laju aliran angin jarak jauh yang lebih akurat, sehingga memberikan representasi yang lebih baik terhadap pola aliran angin dan dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja turbin angin (Borraccino, 2017). Dengan mengukur data vertikal kecepatan angin dan parameter potensial pembangunan turbin angin, teknologi laser dalam LiDAR memberikan evaluasi yang dapat diandalkan secara efektif dan biaya yang lebih efisien (Li & Yu, 2017). Ini memungkinkan pengembang PLTB untuk membuat keputusan yang lebih baik dalam pemilihan lokasi dan konfigurasi turbin angin.

Selain itu, teknologi laser digunakan untuk validasi beban turbin angin melalui pengambilan data angin berbasis LiDAR (Dimitrov, et al., 2019) (Goit, et al., 2019). Metode ini memungkinkan pengukuran angin dan perkiraan beban turbin angin secara aeroelastik tanpa perlu menggunakan tiang meteorologi. Hal ini membantu mengurangi biaya dan kompleksitas pengukuran beban, sehingga meningkatkan efisiensi pemantauan turbin angin.

Penggunaan teknologi laser dalam metode LiDAR juga digunakan untuk membandingkan pengukuran kecepatan dan arah angin pada indikator turbin angin, sehingga menghasilkan koefisien koreksi yang akurat (Wang, et al., 2023). Data ini penting dalam mengoptimalkan penempatan turbin angin dan mengatur operasinya sesuai dengan kondisi angin yang ada.

Dalam hal pemantauan dan pengendalian keparahan hembusan angin, teknologi laser digunakan untuk mengidentifikasi ancaman dan mengambil tindakan pencegahan untuk menghindari beban tinggi pada turbin angin (Bos, et al., 2016). Dengan menggunakan metode LiDAR, tingkat keparahan hembusan angin dapat dievaluasi secara lebih akurat, yang membantu meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi turbin angin.

Terakhir, teknologi laser digunakan untuk meningkatkan kontrol turbin angin dengan menggunakan LiDAR sebagai sensor tambahan (Scholbrock, et al., 2016). Hal ini memungkinkan pengembangan teknik kontrol baru yang dapat mengurangi beban struktural pada turbin angin, sambil meningkatkan produksi energi secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, pemanfaatan teknologi laser dalam sistem LiDAR untuk optimasi dan pemantauan turbin angin pada PLTB telah memberikan manfaat yang signifikan. Dengan memberikan pengukuran yang lebih akurat, evaluasi yang lebih efektif, pemantauan keparahan hembusan angin, dan peningkatan kontrol turbin angin, teknologi laser membantu meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin angin dalam menghasilkan energi terbarukan. Pengembangan lebih lanjut dalam teknologi ini akan terus memberikan kontribusi penting dalam pengembangan PLTB yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.2. Deteksi Cacat dan Kerusakan pada Baling-baling Turbin Angin

Manfaat teknologi laser dalam Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB) selanjutnya adalah pemantauan dan deteksi cacat serta kerusakan pada baling-baling turbin angin yang merupakan hal krusial dalam memastikan keberlanjutan operasi dan keandalan turbin angin. Manfaat ini dalam penelitian sebelumnya seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Salah satu penggunaan teknologi laser adalah pengembangan sistem shearography laser kompak yang digunakan untuk inspeksi robotik on-site pada baling-baling turbin angin (Li, et al., 2021) (Li, et al., 2020). Sistem ini bertujuan untuk mendeteksi cacat *subsurface* dan kerusakan pada material komposit yang digunakan dalam baling-baling turbin angin. Dengan menggunakan teknologi laser ini, inspeksi dapat dilakukan secara efisien dan akurat, tanpa perlu membongkar baling-baling turbin angin. Hal ini membantu menghemat waktu dan biaya dalam pemeliharaan serta memastikan kualitas dan keandalan turbin angin.

Selain itu, teknologi laser juga telah digunakan untuk mengembangkan teknik termografi garis kontinu dalam mendeteksi kerusakan pada baling-baling turbin angin saat berputar (Hwang, et al., 2017). Metode ini memanfaatkan teknologi laser non-kontak untuk memvisualisasikan kerusakan secara *real-time* pada baling-baling turbin angin. Data termografi yang diperoleh dapat memberikan informasi tentang perubahan suhu yang tidak

normal, yang mengindikasikan adanya kerusakan atau cacat pada baling-baling. Dengan interpretasi data yang intuitif, metode ini memungkinkan operator PLTB untuk mengidentifikasi kerusakan dengan cepat dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan.

Pemanfaatan teknologi laser dalam mendeteksi cacat dan kerusakan pada baling-baling turbin angin pada PLTB merupakan langkah penting dalam memastikan keberlanjutan operasi dan meningkatkan keandalan turbin angin. Dengan sistem *shearography* laser kompak dan teknik termografi garis kontinu, deteksi cacat *subsurface*, kerusakan material komposit, dan perubahan suhu yang tidak normal dapat diidentifikasi dengan lebih efisien dan akurat. Hal ini membantu dalam perawatan dan pemeliharaan yang tepat waktu serta meningkatkan keandalan dan performa turbin angin. Pengembangan lebih lanjut dalam pemanfaatan teknologi laser ini akan terus memperbaiki pemantauan dan deteksi cacat pada baling-baling turbin angin di masa depan.

3. Pemanfaatan Teknologi Laser pada Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan sumber energi terbarukan yang penting dalam memenuhi kebutuhan listrik global. Dalam upaya pemantauan dan perlindungan bilah turbin air pada PLTA, teknologi laser telah digunakan dan menjadi pembahasan pada penelitian sebelumnya, seperti terlihat pada Tabel 1.

Pemanfaatan teknologi laser dalam perlindungan bilah turbin air telah dikaji untuk melindungi bilah baja turbin uap bertekanan rendah dari erosi tetesan air (Schuerhoff, et al., 2015). Teknik perlindungan erosi dan perlakuan laser otomatis digunakan untuk meningkatkan ketahanan dan umur pakai bilah turbin. Dengan menggunakan teknologi ini, bilah turbin dapat dilindungi dari erosi yang disebabkan oleh tetesan air, sehingga memperpanjang masa pakai dan mengurangi biaya perawatan.

Selain perlindungan, teknologi laser juga telah dimanfaatkan dalam restorasi ujung bilah turbin air melalui teknologi deposisi logam (Ciappi, et al., 2021). Restorasi ujung bilah turbin yang optimal dapat dilakukan menggunakan metode deposisi logam dengan bantuan teknologi laser. Hal ini tidak hanya meningkatkan umur pakai bilah turbin, tetapi juga mengurangi biaya pemeliharaan dan mengoptimalkan performa PLTA secara keseluruhan.

Selanjutnya, perbandingan antara teknologi laser dan fotogrametri digital dilakukan dalam pemindaian geometri bilah turbin air (Nedelcu, et al., 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui deviasi antara keduanya dan mengevaluasi keakuratan serta efisiensi teknologi tersebut. Dengan membandingkan teknologi laser dan fotogrametri digital, pemantauan dan pemindaian geometri bilah turbin air dapat dilakukan dengan lebih efektif dan akurat.

Pemanfaatan teknologi laser dalam pemantauan dan perlindungan bilah turbin air pada PLTA memberikan manfaat yang signifikan. Perlindungan terhadap erosi tetesan air dan restorasi ujung bilah turbin dengan teknologi deposisi logam membantu memperpanjang umur pakai dan mengurangi biaya perawatan. Sementara itu, perbandingan antara teknologi laser dan fotogrametri digital dalam pemindaian geometri bilah turbin air membantu dalam pemantauan dan evaluasi keadaan bilah dengan akurasi yang lebih tinggi. Pengembangan lebih lanjut dalam pemanfaatan teknologi laser ini diharapkan akan memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan performa dan keberlanjutan PLTA.

4. Pemanfaatan Teknologi Laser pada Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa

Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) menggunakan proses pirolisis dan gasifikasi merupakan solusi yang menjanjikan dalam menghasilkan energi listrik dari biomassa yang terbarukan. Biomassa dari limbah dan sampah pariwisata (Aridito & Ma'arif, 2019) (Ma'arif, 2019) (Ma'arif & Wardoyo, 2020), limbah pertanian (Ma'arif, et al., 2016) (Syamsiro, et al., 2020), dan limbah dan sampah pasar tradisional (Ma'arif, et al., 2019), telah diidentifikasi sebagai sumber biomassa yang dapat digunakan dalam PLTBm. Penggunaan

biomassa ini sebagai bahan bakar dalam proses pirolisis dan gasifikasi tidak hanya memberikan solusi untuk memanfaatkan limbah dan sampah, tetapi juga berkontribusi pada produksi energi terbarukan yang ramah lingkungan.

Dalam PLTBm, teknologi gasifikasi telah diidentifikasi sebagai teknologi yang tepat untuk mengubah biomassa menjadi energi listrik, terutama di daerah terpencil (Ma'arif, 2023). Penelitian juga telah menunjukkan bahwa teknologi gasifikasi dapat diterapkan dalam skala besar dan kecil, termasuk dalam penggunaan gabungan panas dan pembangkit listrik, *cofiring* gasifikasi biomassa dan batubara, serta unit gabungan panas dan daya yang digerakkan turbin gas (Beenackers & Maniatis, 1998). Perkembangan terbaru dalam gasifikasi biomassa telah menunjukkan kemajuan dalam pemanfaatan syngas untuk panas dan pembangkit listrik, produksi H₂, dan sintesis bahan bakar cair (Wang, et al., 2008). Selain itu, berbagai jenis metode konversi biomassa, termasuk gasifikasi suhu tinggi dan pembakaran, telah dieksplorasi dan menunjukkan kesesuaian metode yang berbeda untuk berbagai jenis biomassa (Dahlquist, 2013). Ini membuka peluang untuk memanfaatkan berbagai jenis biomassa dengan efisien dalam PLTBm.

Secara keseluruhan, PLTBm menggunakan proses pirolisis dan gasifikasi sebagai solusi yang menjanjikan untuk menghasilkan energi listrik dari biomassa. Berbagai jenis biomassa seperti limbah dan sampah pariwisata, limbah pertanian, dan limbah pasar tradisional dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam PLTBm. Pengembangan teknologi gasifikasi dalam skala besar dan kecil, serta peningkatan dalam pemanfaatan syngas dan metode konversi biomassa, memberikan prospek yang cerah dalam pengembangan PLTBm yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dalam upaya meningkatkan efisiensi proses pirolisis dan gasifikasi pada PLTBm, teknologi laser telah menjadi fokus penelitian sebelumnya sebagaimana terlihat pada Tabel 1.

4.1. Meningkatkan Efisiensi Proses Pirolisis dan Gasifikasi

Pemanfaatan teknologi laser dalam pengembangan proses pirolisis dan gasifikasi bertujuan untuk menghasilkan bioenergi berbahan bakar biogas dan biochar secara lebih efektif dan efisien (Tursunov & Dobrowolski, 2015). Teknologi laser digunakan untuk mengoptimalkan reaksi pirolisis dan gasifikasi dengan mempengaruhi interaksi energi dan materi pada tingkat molekuler. Dengan teknologi laser yang lebih cepat dan canggih, efisiensi proses dapat ditingkatkan, sehingga menghasilkan lebih banyak energi yang dapat dimanfaatkan dari biomassa yang digunakan.

Pemanfaatan teknologi laser dalam PLTBm tidak hanya meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga membantu mengurangi emisi dan dampak lingkungan. Dengan menggunakan teknologi laser yang lebih canggih, suhu dan waktu yang dibutuhkan dalam proses pirolisis dan gasifikasi dapat dikendalikan dengan lebih baik. Hal ini berdampak pada peningkatan efisiensi konversi biomassa menjadi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca serta polutan lainnya.

4.2. Mendeteksi Unsur Kimia dalam Proses Konversi Energi

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm), deteksi dan pemantauan unsur kimia dalam proses konversi energi biomassa menjadi energi listrik memiliki peran penting dalam memastikan efisiensi dan keberlanjutan operasi. Teknologi laser telah digunakan sebagai alat diagnostik *online* untuk memantau kimia suhu tinggi dalam pembakaran biomassa pada PLTBm (Viljanen, 2019). Metode yang digunakan antara lain *Collinear Photofragmentation and Atomic Absorption Spectroscopy* (CPFAAS) dan *Microwave-Assisted Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (MW-LIBS). Dengan bantuan teknologi laser ini, suhu, oksigen, dan elemen-elemen penting dalam konversi termal biomassa dapat dipantau secara *real-time* dan akurat. Hal ini memungkinkan operator PLTBm untuk mengoptimalkan kondisi proses konversi, mengidentifikasi potensi masalah, dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi.

Pemanfaatan teknologi laser dalam deteksi unsur kimia pada PLTBm memiliki manfaat yang signifikan. Dengan memantau suhu tinggi dan komposisi kimia, operasi PLTBm dapat

dikendalikan secara lebih efektif. Pengetahuan yang akurat tentang kondisi kimia dalam proses konversi energi biomassa memungkinkan pengaturan yang tepat terkait suhu, rasio oksigen, dan parameter penting lainnya. Dalam jangka panjang, ini dapat mengarah pada peningkatan efisiensi dan keberlanjutan operasi PLTBm.

4.3. Mendeteksi Unsur Kimia dalam Proses Konversi Energi

Pemahaman yang mendalam tentang sifat-sifat biomassa yang digunakan merupakan faktor penting dalam memastikan efisiensi dan keberlanjutan operasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm). Pemanfaatan teknologi laser dalam analisis sifat-sifat biomassa melibatkan penggunaan *laser induced breakdown spectroscopy* (LIBS) untuk meningkatkan analisis kuantitatif (Zhang, et al., 2020). Teknologi ini memungkinkan analisis proksimat dan *ultimate* dari biomassa. Analisis proksimat mencakup pengukuran nilai kalor, kandungan abu, dan kandungan volatil dalam biomassa. Sementara itu, analisis *ultimate* melibatkan pengukuran kandungan karbon dan hidrogen dalam biomassa. Dengan menggunakan teknologi laser ini, analisis sifat-sifat biomassa dapat dilakukan dengan lebih cepat, akurat, dan *non-destruktif*.

Pemanfaatan teknologi laser dalam menganalisis sifat-sifat biomassa pada PLTBm memiliki manfaat yang signifikan. Dengan analisis kuantitatif yang lebih baik, pengoperasian PLTBm dapat lebih dioptimalkan berdasarkan karakteristik biomassa yang tepat. Informasi tentang nilai kalor, abu, kandungan volatil, serta kandungan karbon dan hidrogen dalam biomassa membantu dalam pengaturan yang tepat terkait perencanaan bahan bakar, proses konversi, dan pengendalian operasi. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang sifat-sifat biomassa, efisiensi dan keberlanjutan operasi PLTBm dapat ditingkatkan.

Dalam pengembangan lebih lanjut, pemanfaatan teknologi laser dalam PLTBm memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi, pengendalian unsur kimia, dan pemahaman sifat-sifat biomassa. Teknologi laser canggih meningkatkan produksi bioenergi berbahan bakar, biogas, dan biochar, serta mendorong pengembangan PLTBm yang berkelanjutan. Di sisi lain, teknologi laser digunakan sebagai alat diagnostik online untuk memantau unsur kimia, memastikan konversi biomassa menjadi energi listrik yang efisien. Pemanfaatan LIBS dalam menganalisis sifat-sifat biomassa memungkinkan penggunaan optimal biomassa dalam konversi energi listrik. Pengembangan metode analisis biomassa dengan teknologi laser ini akan mengoptimalkan operasi PLTBm menuju efisiensi, keberlanjutan, dan ramah lingkungan yang lebih baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian dan pembahasan dari penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa teknologi laser memiliki potensi yang besar dalam meningkatkan kinerja pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan. Dalam energi surya, teknologi laser telah digunakan untuk menciptakan dan memanipulasi struktur berpola pada panel surya, meningkatkan penyerapan radiasi matahari, dan meningkatkan kinerja optik sel surya. Selain itu, teknologi laser juga digunakan untuk validasi beban dan kontrol pada turbin angin dengan menggunakan LiDAR, yang membantu dalam meningkatkan efisiensi dan pemantauan turbin angin. Selanjutnya, teknologi laser telah dimanfaatkan dalam perlindungan dan pemantauan bilah turbin air untuk mencegah erosi dan kerusakan. Selain itu, teknologi laser juga digunakan untuk mendeteksi unsur kimia dalam proses konversi energi pada pembangkit listrik tenaga biomassa, meningkatkan pemahaman sifat-sifat biomassa, dan memastikan efisiensi konversi yang lebih baik.

Secara keseluruhan, pemanfaatan teknologi laser dalam sumber energi terbarukan memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi pembangkit listrik. Teknologi laser membantu dalam meningkatkan penyerapan radiasi matahari pada panel surya, mengoptimalkan operasi turbin angin, melindungi dan memantau turbin air, serta menganalisis sifat-sifat biomassa. Pengembangan lebih lanjut dalam pemanfaatan teknologi laser diharapkan

dapat mendorong penggunaan sumber energi terbarukan secara lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

REFERENSI

- Aridito, M. N. & Ma'arif, S., 2019. Potensi Energi Listrik dari Sampah Berbasis Gasifikasi di Kawasan Village Center Bali. *Prosiding Konferensi Nasional Engineering Perhotelan X*, pp. 391-395.
- Beenackers, A. A. C. M. & Maniatis, K., 1998. Gasification technologies for heat and power from biomass. *Fuel and Energy Abstracts*, 1(39), p. 36.
- Borraccino, A., 2017. *Remotely measuring the wind using turbine-mounted lidars: Application to power performance testing*, DTU Wind Energy: s.n.
- Bos, R., Giyanani, A. & Bierbooms, W., 2016. Assessing the severity of wind gusts with lidar. *Remote Sensing*, 8(9), p. 758.
- Ciappi, A., Giorgetti, A., Ceccanti, F. & Canegallo, G., 2021. Technological and economical consideration for turbine blade tip restoration through metal deposition technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(10), pp. 1741-1758.
- Dahlquist, E., 2013. An overview of thermal biomass conversion technologies. Dalam: *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. London: CRC Press, pp. 43-46.
- Desta, D. et al., 2016. Novel back-reflector architecture with nanoparticle based buried light-scattering microstructures for improved solar cell performance. *Nanoscale*, 8(23), pp. 12035-12046.
- Dimitrov, N. et al., 2019. Wind turbine load validation using lidar-based wind retrievals. *Wind Energy*, 22(11), pp. 1512-1533.
- Gielen, D. et al., 2019. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, Volume 24, pp. 38-50.
- Goit, J. P., Shimada, S. & Kogaki, T., 2019. Can LiDARs replace meteorological masts in wind energy?. *Energies*, 12(19), p. 3680.
- Gupta, M. C. & Carlson, D. E., 2015. Laser processing of materials for renewable energy applications. *MRS Energy & Sustainability*, Volume 2, p. E2.
- Hwang, S., An, Y. K. & Sohn, H., 2017. Continuous line laser thermography for damage imaging of rotating wind turbine blades. *Procedia Engineering*, Volume 188, pp. 225-232.
- Jaiswal, K. K. et al., 2022. Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, Volume 7, p. 100118.
- Khodasevych, I. E., Wang, L., Mitchell, A. & Rosengarten, G., 2015. Micro-and nanostructured surfaces for selective solar absorption. *Advanced Optical Materials*, 3(7), pp. 852-881.
- Li, J. & Yu, X. B., 2017. LiDAR technology for wind energy potential assessment: Demonstration and validation at a site around Lake Erie. *Energy Conversion and Management*, Volume 144, pp. 252-261.
- Li, Z., Tokhi, M. O. & Zhao, Z., 2020. *A compact laser shearography system integrated with robotic climber for on-site inspection of wind turbine blades*. Moscow, Russian Federation, CLAWAR Association, pp. 212-219.
- Li, Z., Tokhi, M. O., Zhao, Z. & Zheng, H., 2021. A compact laser shearography system for on-site robotic inspection of wind turbine blades. *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, 1(3), pp. 166-173.
- Ma'arif, S., 2019. Potensi Energi Listrik Hasil Gasifikasi Sampah Organik dari Wisatawan di Pantai Parangtritis. *Prosiding Konferensi Nasional Engineering Perhotelan X*, pp. 405-409.
- Ma'arif, S., 2023. Pengembangan Sistem Teknologi Kerakyatan untuk Mendukung Ketahanan Energi Nasional. Dalam: *Seabad Tamansiswa: Jejak Langkah Menghidupi Jiwa Merdeka dan Berkarakter*. Yogyakarta: Penerbit Kepel Press, pp. 249-266.

- Ma'arif, S., Sari, R. J. & Syamsiro, M., 2016. Studi Kelayakan Ekonomi Pembangunan PLTD Sistem Dual Fuel dengan Gasifikasi Sekam Padi Kapasitas 50 kVA. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 1(1), pp. 26-31.
- Ma'arif, S. & Wardoyo, W., 2020. Potential of Electric Energy from Waste in Kaliurang Tourism Area, Sleman, Special Region of Yogyakarta. *Conserve: Journal of Energy and Environmental Studies*, 4(1), pp. 1-8.
- Ma'arif, S. et al., 2019. Waste-to-Energy Development Using Organic Waste Recycling System (OWRS): A Study Case of Giwangan Market. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 9(1), pp. 354-362.
- Nedelcu, D., Gillich, G. R., Geroacs, A. & Padurean, I., 2020. *A comparative study between photogrammetry and laser technology applied on model turbine blades*. Hunedoara, Romania, IOP Publishing, p. 012026.
- Peharz, G., Kuna, L. & Leiner, C., 2015. *Laser-assisted manufacturing of micro-optical volume elements for enhancing the amount of light absorbed by solar cells in photovoltaic modules*. s.l., SPIE, pp. 231-240.
- Pupo-Roncallo, O. et al., 2019. Large scale integration of renewable energy sources (RES) in the future Colombian energy system. *Energy*, Volume 186, p. 115805.
- Scholbrock, A. et al., 2016. *Lidar-enhanced wind turbine control: Past, present, and future*. Boston, MA, USA, IEEE, pp. 1399-1406.
- Schuerhoff, J., Ghicov, A. & Sattler, K., 2015. *Advanced water droplet erosion protection for modern low pressure steam turbine steel blades*. Montreal, Quebec, Canada, American Society of Mechanical, p. V008T26A026.
- Syamsiro, M., Aridito, M. N. & Ma'arif, S., 2020. Potential Application of Sago Pulp Briquette for Electricity Generation Using Gasification Technology in Papua Province, Indonesia. *Key Engineering Materials*, Volume 849, pp. 20-26.
- Tursunov, O. & Dobrowolski, J. W., 2015. A brief review of application of laser biotechnology as an efficient mechanism for the increase of biomass for bio-energy production via clean thermo-technologies. *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(2), pp. 66-71.
- Viljanen, J., 2019. *Online Laser Diagnostics for High-Temperature Chemistry in Biomass Combustion*, Tampere, Finland: Tampere University.
- Wang, H. et al., 2023. *Application of Lidar in Comparison of Wind Speed and Wind Direction Meters in Wind Power Field*. s.l., EDP Sciences, p. 02004.
- Wang, L., Weller, C. L., Jones, D. D. & Hanna, M. A., 2008. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and bioenergy*, 32(7), pp. 573-581.
- Zhang, Y. et al., 2020. Improved measurement in quantitative analysis of coal properties using laser induced breakdown spectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(4), pp. 810-818.