



Ranah Research:
Journal of Multidisciplinary Research and Development

DINASTI RESEARCH

082170743613 ranahresearch@gmail.com <https://jurnal.ranahresearch.com>

E-ISSN: [2655-0865](https://doi.org/10.38035/rrj.v7i1)
DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v7i1>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Desain Turbin Angin Modern sebagai upaya Meningkatkan Efisiensi dan Kinerja Energi Angin

Mochamad Karjadi¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma,
mkarjadi@Staff.gunadarma.ac.id

Corresponding Author: mkarjadi@Staff.gunadarma.ac.id¹

Abstrak; Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan desain turbin angin modern yang mampu meningkatkan efisiensi dan kinerja konversi energi angin di daerah dengan kecepatan angin rendah. Tinjauan pustaka untuk menganalisis dan mensintesis data dari jurnal ilmiah, artikel, dan sumber akademik yang relevan terkait desain turbin angin modern. Fokusnya adalah bagaimana desain bilah, penggunaan teknologi Permanent Magnet Generator (PMG), dan Tip Speed Ratio (TSR) dapat meningkatkan efisiensi kinerja turbin angin, terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pandangan komprehensif mengenai tantangan dan solusi dalam mengoptimalkan desain turbin angin di berbagai kondisi angin. Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan angin merupakan faktor kunci yang mempengaruhi efisiensi turbin angin. Turbin sumbu horizontal (HAWT) dengan profil NACA 2410 lebih efisien dibandingkan turbin sumbu vertikal (VAWT), terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah. Teknologi Permanent Magnet Generator (PMG) membantu meningkatkan efisiensi dengan memungkinkan produksi listrik pada putaran rendah. Desain bilah yang tepat dan pengaturan Tip Speed Ratio (TSR) berperan penting dalam kinerja turbin, sementara inovasi lebih lanjut dibutuhkan untuk wilayah dengan angin lemah.

Kata kunci: Desain, Efisiensi, Kinerja, Turbin Angin

Abstract; The purpose of this study is to develop a modern wind turbine design that can improve the efficiency and performance of wind energy conversion in areas with low wind speeds. Literature review to analyze and synthesize data from scientific journals, articles, and relevant academic sources related to modern wind turbine design. The focus is on how blade design, the use of Permanent Magnet Generator (PMG) technology, and Tip Speed Ratio (TSR) can improve the efficiency of wind turbine performance, especially in areas with low wind speeds. This study aims to provide a comprehensive view of the challenges and solutions in optimizing wind turbine design in various wind conditions. The conclusion of this study shows that wind speed is a key factor affecting wind turbine efficiency. Horizontal axis turbines (HAWTs) with NACA 2410 profiles are more efficient than vertical axis turbines (VAWTs), especially in areas with low wind speeds. Permanent Magnet Generator (PMG) technology helps improve efficiency by enabling electricity production at low speeds.

Proper blade design and Tip Speed Ratio (TSR) settings play an important role in turbine performance, while further innovation is needed for areas with weak winds.

Keywords: Design, Efficiency, Performance, Wind Turbine

PENDAHULUAN

Turbin angin telah menjadi salah satu teknologi utama dalam memanfaatkan energi terbarukan di seluruh dunia (Hasibuan et al., 2023; Octari et al., 2024; Rimbawati et al., 2019). Dalam beberapa dekade terakhir, energi angin telah memiliki peran penting dalam transisi global menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Negara-negara maju seperti Amerika Serikat (Dunlap, 2019; Veers et al., 2019), Jerman (Drücke et al., 2021), dan China (Dai et al., 2018; Sahu, 2018; Zhang et al., 2020) telah memimpin dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga angin berskala besar, yang secara signifikan berkontribusi terhadap penyediaan energi nasional mereka. Turbin angin, baik yang digunakan di darat maupun lepas pantai, dirancang untuk mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan.

Namun, efisiensi dan kinerja turbin angin sangat bergantung pada berbagai faktor teknis dan geografis (Hasan & Widayat, 2022; Rubiono & Anam, 2022), termasuk kecepatan angin (Fadila, 2020), desain bilah turbin (Alfaridzi & Setiawan, 2020; Fadila, 2020), serta teknologi generator yang digunakan (Mirza et al., 2019). Di daerah dengan kecepatan angin rendah, efisiensi turbin sering kali menurun, yang menjadi tantangan utama dalam upaya meningkatkan produksi energi. Oleh karena itu, inovasi dalam desain turbin angin modern diperlukan untuk memaksimalkan potensi energi angin, terutama di wilayah yang memiliki kecepatan angin bervariasi.

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan garis pantai yang panjang, memiliki potensi besar untuk mengembangkan energi angin, terutama di daerah pesisir (Aminuddin & Burhanuddin, 2023; SURYANTI et al., 2019). Namun, potensi ini belum dimanfaatkan secara optimal karena banyak daerah di Indonesia memiliki kecepatan angin yang tergolong rendah hingga sedang. Dengan adanya inovasi dalam desain turbin angin modern, diharapkan efisiensi konversi energi angin di Indonesia dapat meningkat dan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kebutuhan energi nasional. Indonesia, meskipun memiliki potensi energi angin yang besar, menghadapi tantangan dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi ini karena banyak daerah hanya memiliki kecepatan angin rata-rata antara 1,5 hingga 6,5 m/s (Halil, 2024). Kecepatan angin yang rendah ini menyebabkan turbin angin konvensional tidak dapat beroperasi secara optimal, sehingga menghambat pengembangan pembangkit listrik tenaga angin yang efisien.

Pengembangan turbin angin modern sangat dipengaruhi oleh teori aerodinamika, terutama yang dikembangkan oleh National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), yang menghasilkan serangkaian profil bilah atau airfoil. Profil seperti NACA 2410 memungkinkan bilah turbin menangkap lebih banyak energi dari angin berkecepatan rendah, meningkatkan efisiensi keseluruhan turbin. NACA Airfoil menjadi landasan desain bilah dalam turbin angin sumbu horizontal modern, yang dirancang untuk memaksimalkan torsi dan daya pada kecepatan angin rendah hingga sedang (Heidmann & Richard, n.d.; Ogunnigbo et al., 2022). Peter Putman, seorang tokoh dalam pengembangan turbin angin besar, memperkenalkan konsep kincir angin berdiameter besar yang digunakan untuk pembangkit listrik. Meskipun konsep ini awalnya dikembangkan untuk daerah dengan angin kuat, ide ini menginspirasi pengembangan turbin angin modern berskala besar yang mampu menghasilkan daya dalam jumlah signifikan. Namun, di wilayah dengan kecepatan angin rendah seperti Indonesia, diperlukan adaptasi dalam desain agar dapat beroperasi secara efisien (Saputra, 2016).

Penelitian Mahmoud et al. menunjukkan bahwa pengurangan jumlah bilah pada turbin Savonius dari tiga atau empat menjadi dua bilah dapat mengurangi torsi negatif dan meningkatkan efisiensi turbin. Torsi negatif sering kali menjadi masalah dalam turbin angin sumbu vertikal (VAWT), terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah. Modifikasi ini menawarkan solusi untuk meningkatkan efisiensi turbin di wilayah yang sebelumnya kurang menguntungkan untuk energi angin (Siagian et al., 2023). Schubel dalam teorinya mengenai turbin angin sumbu horizontal (HAWT) menekankan bahwa turbin ini memiliki koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan VAWT. Dengan torsi yang lebih tinggi dan daya yang dihasilkan lebih stabil pada berbagai kecepatan angin, HAWT menjadi pilihan utama untuk pembangkit listrik berskala besar, termasuk di lepas pantai. Namun, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi HAWT di daerah dengan kecepatan angin rendah (Kjaer et al., 2019; Multazam & Mulkan, 2019; Sriwannarat et al., 2018). Penggunaan Permanent Magnet Generator (PMG), yang memungkinkan turbin angin menghasilkan listrik pada putaran rendah, juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem. Teknologi ini memanfaatkan medan magnet kuat untuk memaksimalkan konversi energi bahkan pada kecepatan putaran yang rendah. Dengan integrasi PMG, turbin angin modern dapat berfungsi lebih efisien, terutama di wilayah dengan angin lemah (Multazam & Mulkan, 2019).

Penelitian sebelumnya oleh Joko, (2018) Penerapan teknologi berbasis Fuzzy Logic Control (FLC) dapat meningkatkan persentase efisiensi daya keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) secara signifikan (Joko, 2018). Modifikasi turbin angin Savonius jenis Icewind dengan diameter 60 cm dapat menghasilkan tegangan keluaran generator antara 2 hingga 28 volt pada kecepatan angin mencapai 14 m/s dan putaran turbin sebesar 442 rpm, sehingga efektif dalam memproduksi energi listrik pada berbagai tingkat kecepatan angin (Siagian et al., 2023).

Kesenjangan terletak pada kurangnya studi yang komprehensif mengenai desain turbin angin yang efisien pada kecepatan angin rendah di Indonesia. Meskipun ada beberapa penelitian yang membahas desain bilah dan teknologi PMG, adaptasi khusus untuk wilayah dengan kondisi angin rendah seperti di Indonesia masih jarang dilakukan. Novelty karya ini menawarkan inovasi dalam desain turbin angin dengan menggabungkan profil bilah NACA dan teknologi Permanent Magnet Generator (PMG), yang belum banyak diterapkan di Indonesia. Desain ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konversi energi angin meskipun di wilayah dengan kecepatan angin rendah.

Karya ini relevan dalam konteks pengembangan energi terbarukan di Indonesia, terutama dalam memaksimalkan potensi energi angin di daerah dengan kecepatan angin rendah. Signifikansi penelitian ini terletak pada kontribusinya terhadap peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga angin, yang pada gilirannya akan mendukung upaya nasional dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan desain turbin angin modern yang mampu meningkatkan efisiensi dan kinerja konversi energi angin di daerah dengan kecepatan angin rendah.

METODE

Pendekatan tinjauan pustaka (literature review), yang bertujuan untuk mengkaji berbagai karya yang telah dilakukan terkait desain turbin angin modern dalam upaya meningkatkan efisiensi dan kinerja energi angin. Proses ini melibatkan pengumpulan, analisis, dan sintesis data sekunder dari jurnal ilmiah, buku, artikel, laporan penelitian, serta sumber-sumber akademik lainnya yang relevan dengan topik yang diangkat. Dengan menggunakan metode ini, penulis berharap dapat memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan terbaru dalam desain turbin angin serta mengidentifikasi tantangan dan inovasi teknis yang relevan (Mauer & Venecek, 2022). Langkah pertama dalam metode tinjauan pustaka ini adalah mengidentifikasi masalah dan fokus utama karya. Dalam hal ini, topik yang menjadi perhatian adalah bagaimana desain

turbin angin modern dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja energi angin. Masalah-masalah yang dihadapi, seperti rendahnya kecepatan angin di beberapa wilayah dan efisiensi turbin angin sumbu vertikal, menjadi pusat kajian dalam karya ini. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kecepatan angin yang tidak stabil sering kali menjadi hambatan bagi kinerja optimal turbin angin.

Setelah menentukan fokus, langkah berikutnya adalah pengumpulan literatur yang relevan. Dalam proses ini, penulis mengumpulkan sumber-sumber yang diakui kredibilitasnya dari berbagai basis data akademik, seperti Google Scholar, IEEE Xplore, Scopus, dan jurnal ilmiah terindeks lainnya. Artikel yang dipilih difokuskan pada penelitian yang berkaitan dengan desain turbin angin, efisiensi bilah, teknologi generator, seperti Permanent Magnet Generator (PMG), serta pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin. Beberapa karya kunci yang diambil untuk tinjauan pustaka ini mencakup penelitian oleh Multazam dan Mulkan (2019) yang membahas desain HAWT di Aceh, studi oleh Mahmoud et al. mengenai pengoptimalan turbin Savonius, serta penelitian oleh Schubel yang mengeksplorasi keunggulan HAWT dalam berbagai kondisi angin. Setelah mengumpulkan berbagai literatur, langkah selanjutnya adalah seleksi literatur. Dalam tahap ini, penulis menyaring literatur yang telah dikumpulkan berdasarkan relevansi dan validitasnya. Kriteria seleksi yang digunakan meliputi karya-karya yang dilakukan dalam 10 tahun terakhir, penelitian yang menggunakan data empiris, serta artikel yang secara langsung berkaitan dengan efisiensi dan inovasi dalam desain turbin angin. Artikel yang lebih tua, kecuali yang memiliki kontribusi besar terhadap teori fundamental, seperti profil bilah NACA atau inovasi oleh Peter Putman, diutamakan untuk dikesampingkan. Dengan pendekatan ini, fokus pada temuan terbaru dan inovasi teknologi dapat diperoleh.

Setelah literatur diseleksi, langkah berikutnya adalah analisis literatur. Dalam tahap ini, penulis menganalisis dan membandingkan berbagai pendekatan desain dan teknologi yang diusulkan oleh para peneliti. Fokus utama dari analisis ini adalah desain bilah turbin angin, khususnya penggunaan NACA 2410, dan pengaruhnya terhadap kinerja pada kecepatan angin rendah. Selain itu, inovasi pada turbin angin sumbu vertikal menjadi perhatian, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi pada kecepatan angin rendah melalui modifikasi bilah dan struktur. Penggunaan teknologi PMG juga menjadi bagian penting dari analisis, karena terbukti dapat meningkatkan kinerja turbin angin dalam kondisi kecepatan angin yang rendah. Penelitian mengenai Tip Speed Ratio (TSR) dan bagaimana rasio ini mempengaruhi efisiensi konversi energi juga menjadi fokus perhatian. Setelah melakukan analisis, penulis kemudian menyusun dan mensintesis temuan yang diperoleh. Sintesis ini bertujuan untuk memberikan pandangan yang komprehensif mengenai tantangan dan solusi dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin angin. Hasil-hasil dari analisis disusun berdasarkan topik utama, seperti desain bilah, efisiensi generator, dan inovasi dalam teknologi turbin. Selain itu, sintesis ini juga mencakup identifikasi celah dalam karya yang ada, termasuk kebutuhan untuk pengembangan lebih lanjut pada turbin sumbu vertikal di daerah dengan kecepatan angin rendah.

Di akhir proses, penulis menarik kesimpulan berdasarkan temuan dari tinjauan pustaka, dengan fokus pada bagaimana desain turbin angin modern dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja di berbagai kondisi angin. Kesimpulan ini memberikan rekomendasi mengenai teknologi atau pendekatan desain yang paling efektif, serta tantangan yang masih perlu diatasi dalam karya selanjutnya. Dengan pendekatan ini, penulis berupaya untuk memberikan kontribusi dalam pengembangan desain turbin angin yang lebih efisien dan relevan dengan kebutuhan energi terbarukan di masa depan. Dalam konteks pendekatan tinjauan pustaka, karya ini menggunakan metode deskriptif analitis dengan tujuan untuk memahami dan menjelaskan fenomena peningkatan efisiensi turbin angin. Metode deskriptif digunakan untuk menggambarkan konsep desain turbin angin yang ada, sedangkan analisis dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai inovasi dalam meningkatkan efisiensi

kinerja. Metode ini membantu memberikan gambaran yang jelas tentang perkembangan teknologi turbin angin dan relevansinya dengan tantangan energi terbarukan yang dihadapi di masa depan. Dengan demikian, karya ini diharapkan dapat memberikan panduan yang bermanfaat bagi peneliti dan praktisi di bidang energi terbarukan, khususnya dalam pengembangan turbin angin yang efisien dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Turbin angin telah menjadi salah satu teknologi kunci dalam solusi energi terbarukan, tetapi meskipun demikian, tantangan signifikan masih menghadang dalam pengembangan dan implementasinya. Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai permasalahan muncul, terutama terkait dengan efisiensi dan kinerja turbin angin, yang menjadi hal utama untuk diatasi agar teknologi ini dapat berfungsi optimal.

Salah satu permasalahan terbesar yang dihadapi oleh pengembangan turbin angin modern adalah rendahnya kecepatan angin di banyak wilayah, yang secara langsung mempengaruhi produksi listrik dari turbin angin. Misalnya, di wilayah seperti Aceh, kecepatan angin rata-rata berkisar antara 1,5 hingga 6,5 meter per detik (m/s). Kecepatan angin ini relatif rendah, sehingga sulit bagi turbin angin untuk mencapai tingkat kinerja yang optimal dalam menghasilkan listrik. Wilayah dengan kecepatan angin rendah membutuhkan desain turbin yang mampu mengoptimalkan daya pada kondisi tersebut, yang masih menjadi tantangan besar dalam inovasi teknologi turbin (Khusnawati et al., 2022; Multazam & Mulkan, 2019).

Permasalahan berikutnya adalah terkait efisiensi rendah pada turbin angin sumbu vertikal (Vertical Axis Wind Turbine atau VAWT) dibandingkan dengan turbin sumbu horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine atau HAWT). Salah satu contoh VAWT yang umum adalah turbin Savonius, yang meskipun sederhana, memiliki kelemahan besar dalam hal efisiensi. Pada turbin ini, bilah yang bergerak melawan arah angin menghasilkan torsi negatif, yang mengurangi kemampuan turbin dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Torsi negatif ini menjadi penyebab rendahnya efisiensi, terutama ketika kecepatan angin rendah. Hal ini membuat VAWT kurang cocok untuk daerah dengan angin yang tidak stabil atau berkecepatan rendah (Saputra, 2016; Siagian et al., 2023).

Selain tantangan pada jenis turbin, permasalahan lain dalam pengembangan turbin angin modern adalah desain bilah turbin. Desain yang mampu menangkap energi angin secara efisien pada kecepatan angin rendah masih sulit dicapai tanpa inovasi teknologi yang signifikan. Dalam hal ini, bilah turbin memerlukan profil aerodinamis yang sangat khusus, seperti airfoil, untuk dapat menangkap energi angin dengan efisiensi tinggi. Namun, desain airfoil yang mampu berfungsi baik pada kondisi angin yang tidak konsisten masih menjadi bidang penelitian yang aktif. Pengembangan bilah turbin yang lebih efisien diperlukan agar turbin angin dapat beroperasi lebih optimal di berbagai kondisi cuaca (Rahman et al., 2023; Suwoto et al., 2021).

Teknologi lain yang juga berperan penting dalam desain turbin angin adalah generator yang digunakan untuk mengonversi energi mekanis menjadi energi listrik. Banyak generator tradisional tidak bekerja secara efisien pada kecepatan angin rendah, yang mengurangi kemampuan turbin angin dalam menghasilkan listrik secara konsisten. Oleh karena itu, teknologi seperti Permanent Magnet Generator (PMG) telah dikembangkan untuk memungkinkan turbin menghasilkan listrik meskipun pada putaran rendah. PMG menawarkan potensi untuk meningkatkan efisiensi turbin angin, tetapi integrasi teknologi ini ke dalam sistem turbin angin secara keseluruhan masih membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk memastikan efektivitasnya (Multazam & Mulkan, 2019; Siagian et al., 2023).

Terakhir, masalah penting dalam desain turbin angin modern adalah pengelolaan Tip Speed Ratio (TSR), yang merupakan rasio antara kecepatan ujung bilah turbin dan kecepatan angin. TSR harus diatur dengan baik untuk mencapai efisiensi optimal. Jika pengaturan TSR

tidak tepat, turbin dapat kehilangan efisiensi dan kinerjanya dapat menurun secara signifikan. Oleh karena itu, desain turbin yang mampu mengelola TSR secara efektif sangat penting untuk memastikan kinerja yang optimal di berbagai kondisi angin (Multazam & Mulkan, 2019; Suwoto et al., 2021).

Salah satu inovasi paling penting dalam pengembangan turbin angin modern adalah penggunaan profil aerodinamis yang dikenal sebagai NACA Airfoil. Profil ini, yang dikembangkan oleh National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), berperan krusial dalam meningkatkan kinerja bilah turbin (Heidmann & Richard, n.d.; Ogunnigbo et al., 2022). Profil NACA 2410, misalnya, telah terbukti mampu meningkatkan torsi dan kecepatan putaran turbin. Dengan demikian, penggunaan profil ini memungkinkan turbin untuk lebih efisien dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik, terutama dalam kondisi kecepatan angin yang rendah. Inovasi ini sangat relevan bagi wilayah-wilayah yang tidak memiliki angin yang konsisten dan kuat, karena turbin tetap dapat bekerja secara efektif pada kecepatan angin rendah, meningkatkan produksi listrik secara signifikan.

Dalam sejarah pengembangan turbin angin, Peter Putman memiliki peran yang sangat berpengaruh. Pada masanya, Putman menciptakan turbin angin skala besar yang mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar, menjadi dasar penting bagi pengembangan turbin angin modern. Salah satu proyeknya, kincir angin dengan diameter 175 kaki, menunjukkan potensi besar energi angin sebagai sumber daya terbarukan. Karya Putman berfungsi sebagai landasan bagi turbin angin modern yang saat ini digunakan di berbagai pembangkit listrik tenaga angin di seluruh dunia. Kontribusinya membuktikan bahwa energi angin bisa menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang dapat diandalkan (Saputra, 2016).

Dalam desain turbin angin sumbu vertikal (VAWT), khususnya Savonius, penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al. memberikan kontribusi penting. Mereka mengkaji bagaimana pengurangan jumlah bilah pada turbin Savonius dapat mempengaruhi efisiensi keseluruhan turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan mengurangi jumlah bilah menjadi dua, torsi negatif yang biasanya dihasilkan oleh bilah yang bergerak melawan arah angin dapat diminimalkan. Torsi negatif ini sering menjadi masalah utama dalam turbin jenis Savonius, karena mengurangi efisiensi energi yang dihasilkan. Dengan desain yang lebih efisien, turbin Savonius kini dapat digunakan secara lebih efektif, terutama pada kecepatan angin rendah (Siagian et al., 2023).

Pengembangan teknologi Permanent Magnet Generator (PMG) juga merupakan salah satu inovasi penting dalam meningkatkan efisiensi turbin angin. PMG memungkinkan turbin untuk beroperasi secara efisien bahkan pada kecepatan angin rendah, yang sering menjadi tantangan dalam banyak lokasi (Kjaer et al., 2019; Sriwannarat et al., 2018). Teknologi ini menggunakan medan magnet yang kuat untuk menghasilkan listrik, bahkan saat bilah turbin berputar dengan kecepatan rendah. Ini berarti bahwa turbin angin yang dilengkapi dengan PMG dapat berfungsi lebih optimal dalam kondisi kecepatan angin yang bervariasi, menjadikannya solusi yang ideal untuk wilayah-wilayah yang tidak selalu mengalami angin kencang. Dengan teknologi ini, pembangkit listrik tenaga angin menjadi lebih andal dan mampu menghasilkan energi dalam berbagai kondisi cuaca (Multazam & Mulkan, 2019).

Dalam penelitian dan teorinya, Peter J. Schubel menekankan bahwa Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) lebih efisien dibandingkan dengan turbin sumbu vertikal (VAWT), terutama dalam hal konversi energi. Menurut Schubel, desain dan teknologi bilah pada HAWT yang lebih matang memungkinkan turbin ini untuk memaksimalkan energi yang diambil dari angin (Ittycheri, 2020). HAWT mampu mengonversi energi angin dengan koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan VAWT, menjadikannya pilihan utama untuk pembangkit listrik tenaga angin berskala besar (Rahman et al., 2023). Efisiensi tinggi yang ditawarkan oleh HAWT membuatnya lebih ideal untuk digunakan di ladang angin besar yang memproduksi listrik untuk jaringan distribusi luas, di mana stabilitas dan efisiensi merupakan faktor kunci.

Penggunaan profil aerodinamis NACA 2410 adalah salah satu inovasi penting dalam meningkatkan efisiensi turbin angin, terutama pada kecepatan angin rendah. Data lapangan dari penelitian yang dilakukan oleh Teuku Multazam dan Andi Mulkan di Aceh mendukung teori ini. Mereka menemukan bahwa profil NACA 2410 mampu meningkatkan efisiensi kinerja turbin angin pada kecepatan angin antara 1,5 hingga 6,5 m/s. Ini sejalan dengan teori bahwa NACA Airfoil dirancang untuk memaksimalkan energi yang dihasilkan pada kecepatan angin rendah hingga sedang, di mana angin sering kali tidak cukup kuat untuk memutar turbin dengan bilah yang lebih tradisional .

Teori yang dikembangkan oleh Peter Putman tentang turbin angin berskala besar masih digunakan sebagai dasar dalam desain turbin angin modern, terutama untuk pembangkit listrik berskala besar. Namun, dalam praktiknya, data lapangan menunjukkan bahwa turbin berskala besar lebih cocok di wilayah dengan angin yang kuat dan konsisten. Tantangan muncul di daerah dengan kecepatan angin rendah, di mana desain turbin yang lebih kecil dan lebih efisien lebih relevan. Dalam kasus wilayah dengan kecepatan angin rendah seperti Aceh, data lapangan menunjukkan bahwa turbin berskala besar kurang efektif karena angin tidak cukup kuat untuk menggerakkan bilah dalam jangka waktu lama .

Mahmoud et al. meneliti desain turbin Savonius, dan hasil penelitian mereka menemukan bahwa dengan mengurangi jumlah bilah pada turbin, efisiensi dapat meningkat secara signifikan. Penelitian lapangan oleh Parlin Siagian et al. mendukung teori ini, di mana modifikasi struktur turbin Savonius terbukti meningkatkan efisiensi pada kecepatan angin rendah. Turbin Savonius dengan dua bilah, seperti yang disarankan oleh Mahmoud et al., mengurangi torsi negatif yang biasanya menghambat kinerja, sehingga memungkinkan pengoperasian yang lebih efisien dalam kondisi angin terbatas .

Teknologi Permanent Magnet Generator (PMG) telah terbukti sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi turbin angin pada kecepatan angin rendah. Dalam penelitian Multazam dan Mulkan di Aceh, teknologi ini digunakan untuk meningkatkan kemampuan turbin menghasilkan listrik meskipun kecepatan angin tidak cukup tinggi. Dengan menggunakan PMG, turbin tetap dapat berfungsi dengan baik bahkan pada putaran rendah, yang membuat teknologi ini sangat cocok untuk daerah dengan kecepatan angin rendah. Temuan ini mendukung teori bahwa PMG adalah solusi ideal untuk meningkatkan efisiensi turbin di kondisi angin rendah .

Dalam teorinya, Schubel menekankan bahwa Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) lebih efisien daripada Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dalam konversi energi angin menjadi listrik. Data lapangan yang dikumpulkan oleh Fathur Rahman dan Ika Nurjannah mendukung pernyataan ini. Mereka menemukan bahwa HAWT dengan variasi bilah yang tepat dapat mencapai efisiensi hingga 71,8% pada kecepatan angin 4,03 m/s. Ini menunjukkan bahwa desain HAWT lebih unggul dalam berbagai kondisi angin, terutama pada pembangkit listrik berskala besar yang membutuhkan stabilitas dan efisiensi tinggi .

Meskipun HAWT dikenal lebih efisien, tantangan utama dalam praktik lapangan di wilayah dengan kecepatan angin rendah adalah menyesuaikan desain agar sesuai dengan kondisi lokal. Dalam penelitian di Aceh, kecepatan angin yang rendah membuat turbin HAWT harus dilengkapi dengan bilah yang menggunakan profil aerodinamis seperti NACA 2410 dan teknologi PMG agar dapat bekerja lebih optimal. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun HAWT lebih unggul secara teoritis, penyesuaian teknologi dan desain sangat penting untuk daerah dengan kecepatan angin yang lebih rendah .

Pengurangan torsi negatif pada turbin Savonius, seperti yang diteliti oleh Mahmoud et al., merupakan strategi yang terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi turbin angin di lapangan. Dalam data lapangan yang dikumpulkan oleh Siagian et al., modifikasi jumlah bilah dan struktur turbin Savonius menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam efisiensi energi di daerah dengan kecepatan angin rendah. Ini membuktikan bahwa teori Mahmoud tentang pengurangan torsi negatif memiliki relevansi praktis yang kuat di lapangan .

Teori Schubel yang menyatakan bahwa HAWT memiliki koefisien daya lebih tinggi dibandingkan VAWT, terbukti relevan dalam data lapangan, terutama dalam konteks pembangkit listrik skala besar. Penelitian menunjukkan bahwa HAWT dapat mencapai efisiensi lebih tinggi dalam kondisi angin bervariasi. Ini menjadikan HAWT pilihan yang lebih baik untuk proyek pembangkit listrik besar di darat dan lepas pantai, di mana efisiensi tinggi sangat dibutuhkan.

Dalam penelitian mengenai pengaruh kecepatan angin terhadap efisiensi turbin angin, ditemukan bahwa kecepatan angin merupakan faktor penentu utama yang mempengaruhi kinerja turbin. Di wilayah dengan kecepatan angin rendah, turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dengan profil NACA 2410 menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin sumbu vertikal (VAWT). Hal ini disebabkan oleh sifat VAWT yang cenderung mengalami torsi negatif, yang dapat menurunkan efisiensi operasionalnya.

Salah satu teknologi yang terbukti meningkatkan efisiensi turbin angin, terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah, adalah Permanent Magnet Generator (PMG). Teknologi ini memungkinkan turbin untuk menghasilkan listrik pada putaran rendah, yang sering terjadi di wilayah seperti Aceh. Penelitian menunjukkan bahwa penerapan PMG dapat mengatasi tantangan yang dihadapi oleh turbin angin dalam menghasilkan energi di kondisi angin yang kurang optimal.

Desain bilah turbin yang optimal juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi sistem. Profil NACA 2410, yang digunakan dalam HAWT, terbukti meningkatkan konversi energi pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Dengan menggunakan desain ini, torsi dan kecepatan putaran turbin meningkat, sehingga secara keseluruhan meningkatkan efisiensi. Perbandingan antara HAWT dan VAWT menunjukkan bahwa HAWT lebih efisien di berbagai kondisi angin, terutama di daerah dengan kecepatan angin sedang hingga tinggi. Namun, untuk meningkatkan efisiensi VAWT di daerah dengan kecepatan angin rendah, diperlukan inovasi pada desain untuk mengurangi torsi negatif.

Modifikasi desain turbin Savonius juga menjadi fokus dalam penelitian ini. Pengurangan jumlah bilah dan modifikasi struktur bilah terbukti dapat meningkatkan efisiensi pada kecepatan angin rendah, sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Mahmoud et al. Penelitian juga menunjukkan bahwa material bilah memiliki peran penting dalam kinerja turbin angin. Misalnya, bahan seperti kayu pinus menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan fiberglass dalam beberapa kasus, terutama pada kecepatan angin rendah.

Dalam konteks pengaturan Tip Speed Ratio (TSR), penelitian menunjukkan bahwa pengaturan TSR yang optimal sangat penting untuk meningkatkan efisiensi turbin angin. Turbin yang dirancang dengan TSR yang tepat memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk berbagai kondisi angin. Meskipun HAWT dianggap lebih efisien secara umum, tantangan masih ada di daerah dengan kecepatan angin rendah. Di sinilah teknologi PMG dan desain bilah inovatif berperan sebagai solusi utama untuk meningkatkan kinerja turbin angin. Penelitian mengenai turbin Savonius menunjukkan bahwa inovasi pada desain bilah dan penggunaan struktur baru, seperti icewind, juga dapat membantu meningkatkan efisiensi pada kondisi angin rendah.

Pentingnya penggunaan airfoil, seperti NACA 2410, tidak dapat dipandang sebelah mata. Profil ini terbukti meningkatkan efisiensi HAWT dalam berbagai kondisi angin, memungkinkan turbin untuk menangkap lebih banyak energi dari angin yang bergerak lambat hingga sedang. Terakhir, desain kincir angin besar yang dirancang oleh Peter Putman menjadi fondasi bagi pengembangan turbin angin modern. Meskipun konsep ini berlaku untuk turbin besar, di beberapa wilayah dengan kecepatan angin rendah, desain yang lebih kecil dan efisien mungkin lebih sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi lokal.

Implikasi dari karya ini memiliki dampak yang signifikan bagi industri energi terbarukan, terutama dalam konteks pengembangan dan penerapan turbin angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inovasi dalam desain turbin dan penggunaan teknologi

generator modern, seperti Permanent Magnet Generator (PMG), dapat secara drastis meningkatkan efisiensi konversi energi angin menjadi listrik. Bagi industri energi terbarukan, ini merupakan dorongan untuk berinvestasi lebih banyak dalam pengembangan desain bilah yang lebih efisien serta teknologi generator yang mampu beroperasi secara optimal pada kecepatan angin rendah. Dengan memperhatikan inovasi ini, industri dapat meningkatkan kinerja pembangkit listrik tenaga angin, sehingga mampu memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat di berbagai belahan dunia. Selain itu, implikasi ini sangat relevan bagi pembangunan energi di wilayah dengan kecepatan angin rendah, seperti Aceh. Dengan menerapkan teknologi turbin angin modern yang menggabungkan profil bilah NACA 2410 dan teknologi PMG, kinerja dan produktivitas pembangkit listrik tenaga angin dapat ditingkatkan secara signifikan. Hal ini tidak hanya akan meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan tetapi juga menjadi solusi penting dalam upaya memperluas akses ke energi bersih dan terbarukan di daerah-daerah yang sebelumnya sulit dijangkau oleh sumber energi konvensional.

Dengan kata lain, penerapan teknologi ini dapat membantu memenuhi kebutuhan energi masyarakat setempat, mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, dan mendukung upaya keberlanjutan lingkungan. Kesempatan untuk mengembangkan infrastruktur energi yang lebih baik dan lebih efisien di wilayah-wilayah ini menjadi lebih mungkin, seiring dengan penerapan desain dan teknologi yang lebih inovatif. Dengan demikian, industri energi terbarukan diharapkan dapat berkontribusi lebih besar dalam menciptakan solusi energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan angin adalah faktor kunci yang mempengaruhi efisiensi turbin angin. Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dengan profil NACA 2410 terbukti lebih efisien dibandingkan turbin sumbu vertikal (VAWT) di wilayah dengan kecepatan angin rendah, di mana VAWT sering mengalami torsi negatif yang mengurangi kinerjanya. Teknologi Permanent Magnet Generator (PMG) memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi turbin, terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah, dengan memungkinkan produksi listrik pada putaran rendah. Desain bilah yang optimal, seperti NACA 2410, serta pengaturan Tip Speed Ratio (TSR) yang tepat, sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin. Modifikasi pada desain turbin Savonius dan pemilihan material bilah yang tepat, seperti kayu pinus, juga dapat meningkatkan efisiensi. Meski HAWT lebih efisien secara umum, tantangan di wilayah dengan kecepatan angin rendah tetap ada, yang memerlukan inovasi lebih lanjut dalam desain dan teknologi. Dengan demikian, penerapan solusi seperti PMG dan desain bilah inovatif sangat penting untuk meningkatkan kinerja turbin angin dan memperluas akses energi terbarukan di daerah dengan kondisi angin yang kurang optimal.

Penelitian ini memiliki implikasi signifikan bagi industri energi terbarukan, terutama dalam pengembangan desain turbin angin yang lebih efisien untuk wilayah dengan kecepatan angin rendah. Rekomendasi untuk industri mencakup investasi dalam teknologi seperti Permanent Magnet Generator (PMG) dan desain bilah yang inovatif untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Selain itu, penting untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai modifikasi desain turbin Savonius dan penggunaan material yang lebih efisien. Namun, penelitian ini memiliki limitasi, termasuk fokus yang terbatas pada kondisi angin tertentu dan penggunaan model yang mungkin tidak sepenuhnya mewakili variabilitas kondisi lingkungan nyata. Oleh karena itu, studi lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi efisiensi turbin angin di berbagai lokasi dan kondisi yang berbeda, serta untuk mengidentifikasi solusi yang lebih komprehensif dan berkelanjutan dalam pengembangan energi angin.

REFERENSI

- Alfaridzi, M. A., & Setiawan, R. (2020). Analisis performa bilah taperless dengan airfoil NACA 4412 pada horizontal axis wind turbine TSD 500 di PT lentera bumi nusantara. *Jurnal Teknik Mesin Dan Pembelajaran*, 3(2), 64–73.
- Aminuddin, M. A., & Burhanuddin, A. (2023). Potensi Kekayaan Dan Keberagaman Maritim Di Wilayah Papua Dalam Upaya Mendorong Kesejahteraan Rakyat. *Mandub: Jurnal Politik, Sosial, Hukum Dan Humaniora*, 1(4), 157–176.
- Dai, J., Yang, X., & Wen, L. (2018). Development of wind power industry in China: A comprehensive assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 156–164.
- Drücke, J., Borsche, M., James, P., Kaspar, F., Pfeifroth, U., Ahrens, B., & Trentmann, J. (2021). Climatological analysis of solar and wind energy in Germany using the Grosswetterlagen classification. *Renewable Energy*, 164, 1254–1266.
- Dunlap, A. A. (2019). *Renewing destruction: Wind energy development, conflict and resistance in a Latin American context*. Rowman & Littlefield.
- Fadila, A. (2020). Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Darrieus Tiga Sudu Rangkap Tiga dengan Profil NACA 0006. *Eksergi: Jurnal Teknik Energi*, 15(3), 102–114.
- Halil, M. (2024). Pengujian 3 Tipe Blade Turbin Angin Poros Horizontal Dengan Sudut Kemiringan 12° dan Kecepatan Angin 3 Sampai 5 m/s Menggunakan NACA 6408. *Jurnal Redoks*, 9(2), 129–136.
- Hasan, M. S., & Widayat, W. (2022). Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(1), 38–48.
- Hasibuan, A., Siregar, W. V., & Sayuti, M. (2023). *Pemanfaatan Energi Angin Untuk Pembangkit Energi Listrik Di Daerah Kepulauan Menggunakan Kincir Angin Skala Kecil*. Feniks Muda Sejahtera.
- Heidmann, M. F., & Richard, J. (n.d.). *National Advisory Committee For Aeronaijt S*.
- Ittycheri, A. (2020). *Blade element approach for computational modeling of lift driven horizontal axis wind turbine performance*. Mississippi State University.
- Joko, B. H. P. (2018). Fuzzy Logic Penentu Efisiensi Daya Turbin Angin. *SinarFe7*, 1(1), 288–290.
- Khusnawati, N., Wibowo, R., & Kabib, M. (2022). Analisa Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu. *JURNAL CRANKSHAFT*, 5(2), 35–42.
- Kjaer, A. B., Korsgaard, S., Nielsen, S. S., Demsa, L., & Rasmussen, P. O. (2019). Design, fabrication, test, and benchmark of a magnetically geared permanent magnet generator for wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), 24–32.
- Mauer, B., & Venecek, J. (2022). Writing the Literature Review. *Strategies for Conducting Literary Research*, 2e.
- Mirza, M., Lubis, R. S., & Gapy, M. (2019). Pemanfaatan alternator sebagai pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, Dan Elektro*, 4(4).
- Multazam, T., & Mulkan, A. (2019). Rancang bangun turbin angin sumbu horizontal pada kecepatan angin rendah untuk meningkatkan performa permanent magnet generator. *Jurnal Serambi Engineering*, 4(2).
- Octari, K. D., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2024). Analisis Pemanfaatan Energi Angin sebagai Pembangkit Listrik Alternatif pada Turbin Angin Sumbu Vertikal dan Horizontal. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(2), 23497–23502.
- Ogunnigbo, C. O., Alamu, O. J., Ochoche, O. S., & Ojerinde, B. J. (2022). *A Comparative Study on the Aerodynamic Characteristics of National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0008 and 0020 Series*.
- Rahman, F., Nurjannah, I., Sari, H. N., Christian, A., & Hidayat, M. K. (2023). Optimalisasi Metode Blade Turbin Angin Sumbu Horizontal. *Otopro*, 59–64.

- Rimbawati, R., Ardiansyah, N., & Evalina, N. (2019). Perancangan Sistem Pengontrolan Tegangan Pada Pltb Menggunakan Potensio Dc. *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 2(1), 14–20.
- Rubiono, G., & Anam, K. (2022). Panjer Kiling: Kincir Angin Tradisional Banyuwangi Sebagai Potensi Sumber Energi Terbarukan. *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, 7(1), 5–9.
- Sahu, B. K. (2018). Wind energy developments and policies in China: A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1393–1405.
- Saputra, M. (2016). Kajian literatur sudu turbin angin untuk skala kecepatan angin rendah. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 2(2).
- Siagian, P., Alam, H., & Putra, R. R. (2023). Potensi Energi Angin Kecepatan Rendah Untuk Pembangkit Listrik Dengan Modifikasi Turbin Jenis Icewind. *INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science*, 6(2), 757–763.
- Sriwannarat, W., Khunkitti, P., Janon, A., & Siritaratiwat, A. (2018). An improvement of magnetic flux linkage in electrical generator using the novel permanent magnet arrangement. *Acta Physica Polonica A*, 133(3), 642–644.
- SURYANTI, S., Supriharyono, S., & Anggoro, S. (2019). *Pengelolaan Wilayah Pesisir Terpadu*.
- Suwoto, G., Bono, B., & Mulyono, M. (2021). Modifikasi Turbin Angin Poros Horizontal Dengan Bahan Belahan Pipa. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat*, 3(1).
- Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C. L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., & Holttinen, H. (2019). Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464), eaau2027.
- Zhang, S., Wei, J., Chen, X., & Zhao, Y. (2020). China in global wind power development: Role, status and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109881.