

Pemanfaatan Buangan Udara (*Exhaust Fan*) Industri Sebagai Sumber Energi Listrik melalui Teknologi Pembangkit Mikro

Andi Suhaendi^{1*}, Agus Hermanto², Dani Rusirawan³, Mohammad Alexin P.⁴
¹⁻⁴Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, Indonesia

Corresponding Author's e-mail: andi.suhaendi@mhs.itenas.ac.id



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 09 September, 2026

Page: 4732-4748

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i9.3458>

Article History:

Received: Juli 03, 2026

Revised: Agustus 02, 2026

Accepted: September 19, 2026

Abstract : *This study aims to design, fabricate, and evaluate a system utilizing hot air exhaust from an exhaust fan as a renewable energy source using a horizontal-axis wind turbine with a low-speed rotor type. The testing was conducted based on airflow velocity, temperature, turbine rotation speed, generator voltage, and electrical power parameters. The results show that the system operates at an average airflow velocity of 12.69 m/s and a temperature of 33.43 °C. The turbine produces an average rotational speed of 2,411 RPM with a generator voltage ranging from 12.3–13.5 V and an average value of 12.6 V. The actual electrical power output reaches approximately 250 W, while the difference from the theoretical value is influenced by mechanical friction, turbulence, and the efficiency of the generator and transmission system. Although the generated power remains limited, the system has the potential to supply lightweight loads while improving the utilization efficiency of waste energy. The implementation of this technology supports the concept of green industry by reducing energy waste and indirect emissions from fossil-based energy sources. Optimization of turbine design, generator, transmission, and airflow management is required to improve system performance.*

Keywords : *Renewable Energy, Exhaust Fan, Waste Hot Air Energy, Horizontal-Axis Wind Turbine, Low-Speed Rotor, Green Industry.*

Abstrak : Penelitian ini bertujuan merancang, memfabrikasi, dan menguji sistem pemanfaatan buangan udara panas (*exhaust fan*) sebagai sumber energi terbarukan menggunakan turbin angin sumbu horizontal tipe *low-speed rotor*. Pengujian dilakukan berdasarkan parameter kecepatan aliran udara, temperatur, putaran turbin, tegangan generator, dan daya listrik. Hasil menunjukkan bahwa sistem beroperasi pada kecepatan aliran udara rata-rata 12,69 m/s dan temperatur 33,43 °C. Turbin menghasilkan putaran rata-rata 2.411 RPM dengan tegangan generator 12,3–13,5 V dan rata-rata 12,6 V. Daya listrik aktual mencapai sekitar 250 W, sedangkan perbedaan terhadap nilai teoritis dipengaruhi oleh gesekan mekanik, turbulensi, serta efisiensi generator dan transmisi. Meskipun daya yang dihasilkan masih terbatas, sistem berpotensi memenuhi kebutuhan beban ringan sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi buangan. Penerapan teknologi ini mendukung konsep industri hijau melalui pengurangan pemborosan energi dan emisi tidak langsung dari energi fosil. Optimasi desain turbin, generator, transmisi, dan

aliran udara diperlukan untuk meningkatkan kinerja sistem.

Kata Kunci: Energi Baru Terbarukan, *Exhaust Fan*, Energi Buangan Udara Panas, Turbin Angin Sumbu Horizontal, *Low-Speed Rotor*, Industri Hijau.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan konsumsi energi sebanyak 4,3 persen setiap tahun memacu ilmuwan untuk meneliti energi alternatif yang bisa digunakan secara terus-menerus dan ramah lingkungan. Beberapa sumber energi alternative dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik, seperti energi air (PLTA dan PLTMH), energi panas bumi (PLTPB), energi sinar matahari (Solar Photovoltaic / PLTS), dan energi angin (PLTB). Upaya untuk mereduksi penggunaan sumber fosil sebagai sumber utama pada pembangkit listrik tenaga diesel dilakukan melalui pemanfaatan energi alternatif. Potensi tenaga angin merupakan salah satu dari sumber energi baru terbarukan yang murah, ramah lingkungan dan pasti ada walaupun di daerah terpencil seperti daerah kepulauan. Potensi tersebut sampai saat ini belum dimanfaatkan secara maksimal untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik di daerah tersebut, khususnya untuk pulau-pulau terpencil yang belum teraliri listrik dan belum terjangkau oleh jaringan listrik PT. PLN (Persero). Turbin angin poros horizontal merupakan salah satu alat yang memanfaatkan energi angin sebagai sumber tenaganya. Prinsip alat ini mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik dan selanjutnya digunakan sebagai penggerak generator untuk menghasilkan energi listrik. (Vidyatmoko, 2020)

Ketersediaan energi fosil didunia sudah kian menipis dari tahun ketahun. Menurut International Energy Agency atau IEC yaitu Badan Energi Dunia mengatakan bahwa hingga tahun 2030 permintaan energi dunia meningkat sebesar 45% atau rata-rata mengalami peningkatan sebesar 1,6% per tahun. Sebagian besar atau sekitar 80% kebutuhan energi dunia tersebut dipasok dari bahan bakar fosil yang terdiri dari batubara, gas dan minyak bumi. Peningkatan tersebut sewaktu-waktu dapat mengakibatkan habisnya energi fosil yang nantinya dapat mengakibatkan ketersediaan listrik yang menurun. Sebelum semua itu terjadi, lebih baik mengurangi pemakaian energi tersebut dan menggantinya dengan energi terbarukan antara lain air, angin, dan cahaya matahari. Angin merupakan salah satu energi terbarukan yang terdapat hampir diseluruh penjuru dunia, dan merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sering dipakai hampir diseluruh dunia terutama di Belanda sampai disebut negara kincir angin. (Ahmad et al., 2025). Dalam kecepatan angin yang cukup seperti Indonesia yang merupakan salah satu negara yang memiliki angin yang cukup kencang terutama didataran tinggi dan dipinggir pantai, menggunakan sumber energi ini dengan dibantu turbin angin dan generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik berasal dari dua sumber yaitu energi yang bisa diperbaharui dan energi yang tidak bisa diperbaharui yang termasuk dalam energi yang bisa diperbaharui adalah tenaga surya, energi gelombang laut energi angin tetapi membutuhkan penelitian untuk pengembangannya di Indonesia. (Vidyatmoko, 2020)

Generator adalah salah satu mesin listrik yang bekerja memanfaatkan energi gerak/mekanik untuk dikonversi menjadi energi listrik yang bisa dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Generator menggunakan prinsip eksperimen Faraday yaitu memutar magnet secara relatif terhadap kumparan atau sebaliknya. Energi mekanis ini dihasilkan dari hasil kerja turbin angin yang memiliki dua jenis yaitu, Turbin angin yang berputar pada sumbu horizontal dikenal sebagai *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), dan Jenis kedua turbin angin yang berputar pada sumbu vertikal dikenal sebagai *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). (Fazlizan et al., 2015). Turbin angin horisontal adalah model umum yang sering dapat diamati dengan desain yang mirip dengan kincir angin, memiliki bilah dan berputar pada sumbu vertikal. Turbin angin horisontal memiliki poros rotor dan generator di bagian atas menara dan harus diarahkan pada arah tiupan angin. Turbin skala kecil mengarahkan posisi sumbu menggunakan sudu yang mengatur sumbu untuk melawan angin sehingga diperoleh kecepatan putar maksiman. Sedangkan untuk turbin skala besar dilengkapi sensor yang terhubung ke motor servo yang mengarahkan bilah melawan arah angin. Sebagian besar turbin berskala besar memiliki gearbox untuk menaikkan kecepatan rotasi dari turbin ke rotor. Turbin angin vertikal memiliki poros rotor vertikal. Keuntungan utama turbin jenis

ini adalah tidak perlunya mengarahkan ke hembusan angin. Hal ini sangat berguna pada daerah dimana arah angin sangat bervariasi atau memiliki turbulensi. Dengan sumbu vertikal, generator dan komponen utama lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga tidak memerlukan penyangga yang membuat dorongan horisontal saat turbin berputar. (Ramalingam et al., 2025)

Salah satu potensi energi terbarukan yang sering terabaikan di lingkungan industri adalah energi kinetik dari udara buangan (*exhaust fan*). Sistem *exhaust fan* pada umumnya digunakan untuk mengeluarkan udara panas dari area produksi atau mesin, sehingga menjaga kestabilan suhu ruangan. Udara buangan tersebut sebenarnya memiliki kecepatan aliran dan energi kinetik yang cukup besar, namun selama ini dibiarkan terbang ke atmosfer tanpa dimanfaatkan lebih lanjut. Dengan memanfaatkan teknologi konversi energi angin menjadi energi listrik menggunakan *wind turbine*, aliran udara dari *exhaust fan* dapat diubah menjadi energi listrik yang bermanfaat. Energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk kebutuhan penerangan, pengisian baterai, maupun sistem kontrol otomatis di area industri. Prinsip kerjanya mirip dengan turbin angin pada umumnya, hanya saja sumber alirannya berasal dari buangan udara mekanis, bukan angin alam. Selain itu, sistem ini berpotensi mendukung efisiensi energi dan reduksi emisi karbon karena sebagian kebutuhan listrik dapat dipenuhi dari hasil pemanfaatan energi buangan. Implementasi teknologi ini sejalan dengan program pemerintah dalam penerapan industri hijau dan konservasi energi, di mana setiap industri diharapkan dapat memanfaatkan kembali energi sisa proses produksinya (*waste energy recovery*). (Fitrianza et al., 2025)

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis potensi energi terbarukan dari buangan udara panas (*exhaust fan*) dengan mengonversi energi kinetik udara menjadi energi listrik menggunakan *wind turbine* skala kecil. Proses ini meliputi pengukuran kecepatan udara pada saluran buangan, perancangan turbin dan generator, serta pengujian sistem konversi untuk menentukan efisiensi dan daya keluaran yang dihasilkan. PT TFJ memiliki komitmen kuat dalam penerapan Sistem Manajemen Lingkungan, sebagaimana tercantum dalam kebijakan perusahaan untuk mendukung efisiensi energi dan penurunan emisi. Hal ini sejalan dengan Kriteria 3 PROPER EMAS yang mengharuskan penerapan sistem manajemen lingkungan dalam pemanfaatan sumber daya pada bidang efisiensi energi dan pengurangan emisi (PermenLHK No. 1 Tahun 2021, Pasal 16 huruf b). Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mendukung kebijakan tersebut adalah dengan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Salah satunya melalui pemanfaatan energi angin dari aliran udara buangan *exhaust fan* sebagai penggerak Turbin Radial untuk menghasilkan energi listrik. Inovasi ini tidak hanya dapat meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga mendukung target perusahaan dalam mencapai PROPER EMAS 2028 dan mewujudkan konsep industri hijau. Melalui penelitian ini diharapkan diperoleh gambaran mengenai potensi pemanfaatan energi buangan sebagai sumber energi alternatif, serta kontribusinya terhadap penerapan konsep industri hijau yang hemat energi, efisien, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dipadukan dengan analisis kuantitatif. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk memperoleh data numerik mengenai karakteristik aliran udara buangan (*exhaust fan*), potensi energi angin yang tersedia, serta daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin yang dipasang pada aliran udara buangan tersebut. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik aliran udara dengan kinerja turbin angin dalam menghasilkan energi listrik. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi pemanfaatan energi yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal serta menjadi referensi bagi pengembangan sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan di sektor industri.

Tabel 1. Alat yang digunakan untuk penelitian

No	Nama Alat	Fungsi
1	<i>Anemometer Digital</i>	Mengukur kecepatan aliran udara dari <i>exhaust fan</i> .
2	<i>Thermometer Digital</i>	Mengukur suhu udara buangan (<i>exhaust air</i>).
3	<i>Multimeter / Wattmeter</i>	Mengukur tegangan, arus, dan daya listrik keluaran generator.

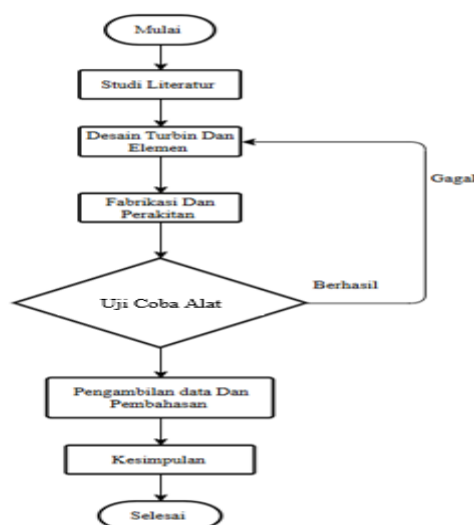
4	Data Logger / Arduino Data Capture	Merekam data kecepatan angin dan daya listrik secara kontinu.
5	Inventor	Untuk Menggambar 2D & 3D
6	Peralatan Bengkel dan Las	Membuat rangka, dudukan turbin, serta sistem mekanik penggerak.

Tabel 2. Bahan yang digunakan pada penelitian

No	Nama Bahan	Spesifikasi	Fungsi
1	Besi Hollow 40×40 mm	Panjang menyesuaikan kebutuhan rangka	Sebagai rangka utama penopang sistem turbin dan komponen lainnya.
2	Generator 1000 W	Tipe DC / permanent magnet	Mengubah energi mekanik putaran turbin menjadi energi listrik.
3	Blower Fan	Kapasitas sesuai debit exhaust industri	Mensimulasikan atau digunakan sebagai sumber aliran udara buangan panas.
4	Plat BJLS 0.6 mm	Plat baja lapis seng	Digunakan untuk pembuatan sudu turbin atau penutup saluran udara (shroud).
5	Baterai 12 V, 1000 Ah	Deep cycle / maintenance free	Menyimpan energi listrik hasil konversi dari generator.
6	Inverter 10 A, 1000 W	Output AC 220 V	Mengubah arus DC dari baterai menjadi AC untuk beban listrik.
7	V-Belt	Ukuran sesuai transmisi pulley	Menghubungkan putaran poros turbin ke generator (transmisi daya mekanik).
8	Pulley 2" dan 6"	Diameter kecil dan besar	Mengatur rasio kecepatan antara turbin dan generator.
9	Panel ATS (Automatic Transfer Switch)	Tipe 1 phase, 220 V	Mengatur perpindahan sumber daya antara sistem turbin dan jaringan listrik utama.
10	Kabel 2×2 mm ² (50 meter)	Konduktor tembaga	Menghubungkan sistem generator, baterai, dan inverter dengan beban listrik.

Diagram Alir Proses Penelitian

Diagram alir proses penelitian merupakan langkah yang ditempuh untuk menganalisis efisiensi turbin pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro, Berikut adalah diagram alir proses penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:

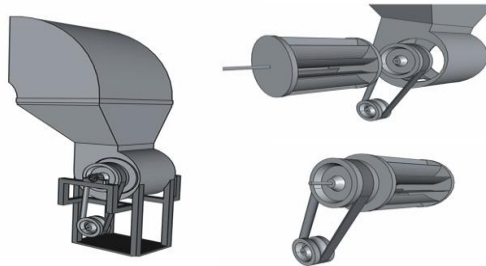
**Gambar 1.** Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Sistem Desain Turbin Angin dan Generator pada Sistem *Exhaust Fan*

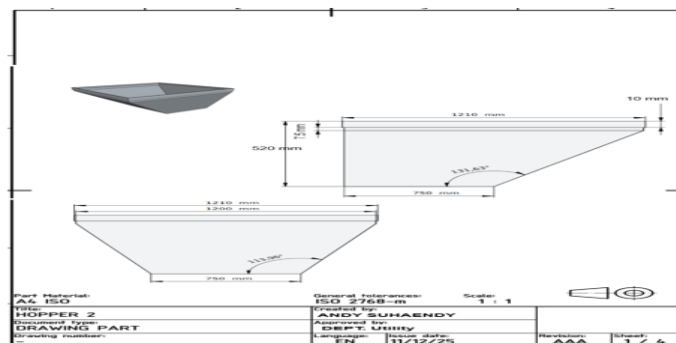
Hasil fabrikasi sistem pemanfaatan energi buangan udara panas dari exhaust fan yang digunakan dalam penelitian. Proses fabrikasi dilakukan berdasarkan desain yang telah dirancang sebelumnya, dengan menyesuaikan kondisi aktual di lapangan dan karakteristik aliran udara buangan. Tahapan fabrikasi meliputi pembuatan komponen utama, perakitan sistem, serta pemasangan pada outlet ducting exhaust.

Perancangan Sistem



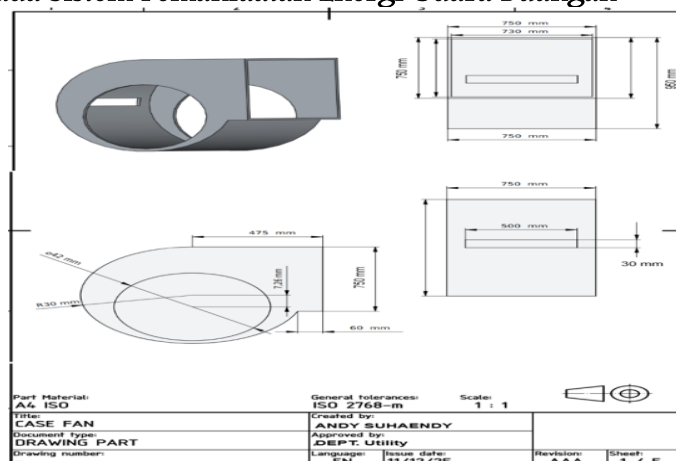
Gambar 2. Perancangan Sistem PLTB

Desain Hopper Pengarah Aliran Udara pada Outlet Ducting Exhaust



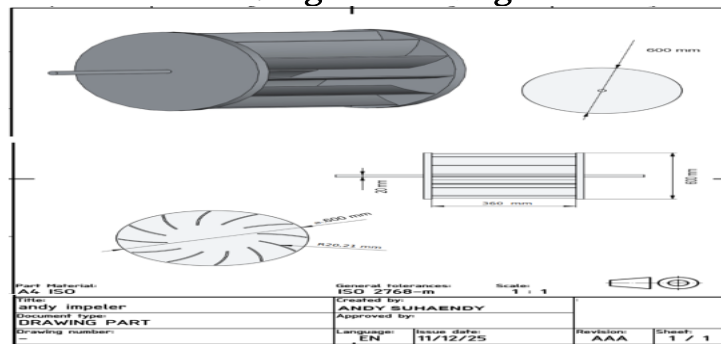
Gambar 3. Desain Hopper Pengarah Aliran Udara pada Outlet Ducting Exhaust

Desain Casing Turbin pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan



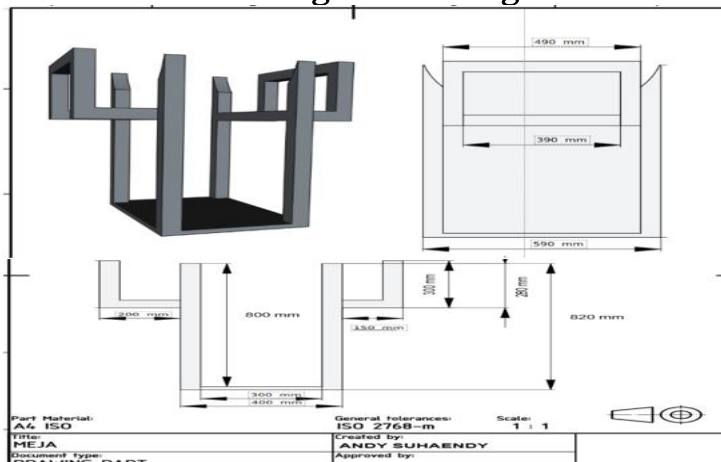
Gambar 4. Desain Casing Turbine pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan

Desain Turbin pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan



Gambar 5. Desain Turbine pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan

Desain Rangka pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan

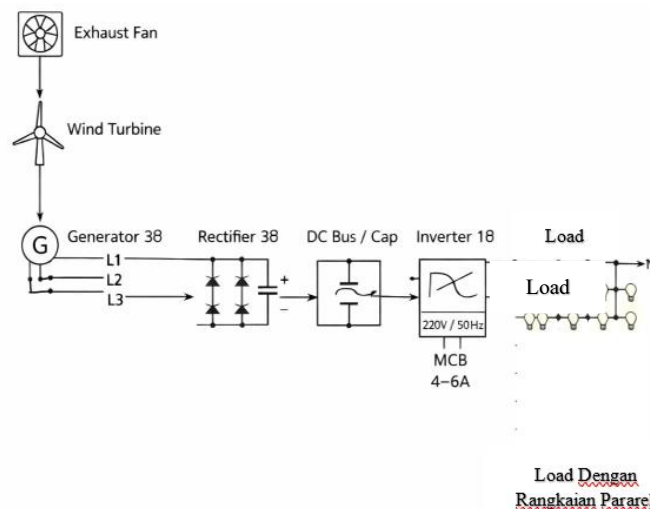


Gambar 6. Desain Rangka pada Sistem Pemanfaatan Energi Udara Buangan

Hasil Sistem PLTB Berbasis Udara Buangan *Exhaust Fan*

Skema Sistem Pengujian Pemanfaatan pembangkit *Exhaust Fan*

Single Line Diagram



Gambar 7. Single Line Diagram Pada Rangkaian Pemanfaatan *Exhaust Fan*

Penjelasan Skema Pengukuran Pengujian Sistem

Tahapan pengukuran dilakukan secara sistematis untuk mengevaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga angin dalam menyuplai daya listrik mulai dari kondisi tanpa beban

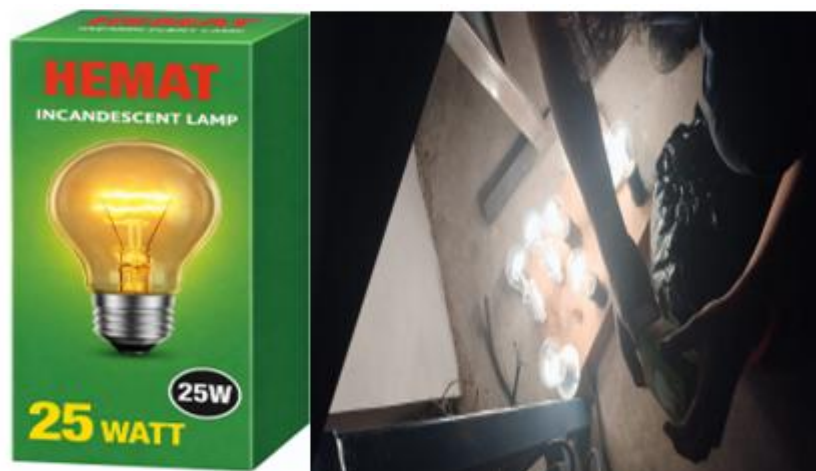
hingga mencapai kapasitas beban maksimum. Pengujian dilakukan pada tiga titik utama sistem, yaitu keluaran generator, sisi DC setelah proses penyearahan, dan keluaran inverter sebagai sumber daya akhir menuju beban. Tahap awal dimulai dengan persiapan seluruh peralatan pengukuran dan memastikan sistem bekerja sesuai konfigurasi yang telah dirancang. Selanjutnya dilakukan pengujian tanpa beban (*no load test*) untuk memperoleh karakteristik awal tegangan dan kinerja generator sebelum diberikan beban. Pengukuran kemudian dilanjutkan pada tegangan DC bus untuk mengetahui kestabilan hasil penyearahan serta kemampuan sistem dalam mempertahankan suplai DC. Setelah itu dilakukan pengukuran tegangan keluaran inverter guna mengevaluasi kualitas konversi energi dari DC menjadi AC. Tahap berikutnya adalah pengujian beban bertahap (*load test*) dengan variasi beban mulai dari 25 W menggunakan satu lampu hingga peningkatan beban secara bertahap pada rentang 25–250 W. Pengujian terakhir dilakukan pada beban maksimum 250 W untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan performa, kestabilan tegangan, serta kapasitas suplai daya pada kondisi operasi tertinggi. Seluruh rangkaian pengujian ini digunakan sebagai dasar analisis efektivitas dan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga angin dalam memenuhi kebutuhan beban listrik.

Sfesisifikasi Teknis Beban Uji (Lampu Pijar 25W)

Pengujian beban pada penelitian ini menggunakan lampu pijar sebagai beban resistif murni. Pemilihan lampu pijar didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki stabilitas tinggi terhadap faktor daya.

Tabel 3. Spesifikasi Lampu yang digunakan Dalam Pengujian

Parameter	Deskripsi Spesifikasi
Merek	Hemat
Jenis Lampu	<i>Incandescent Lamp</i> (Lampu Pijar)
Tipe Produk	PS47 (Standar <i>Pear Shape</i>)
Jenis Fitting	E27 (Sekrup standar)
Daya Nominal (P)	25 Watt
Tegangan Kerja (V)	220V ~ 240V AC
Faktor Daya (cos phi)	1,0 (Resistif Murni)



Gambar 8. Gambar Lampu Yang Digunakan Pengujian

Deskripsi dan Spesifikasi Turbin

Turbin angin dirancang menggunakan konfigurasi sumbu horizontal (*horizontal axis wind turbine*) karena memiliki kemampuan beroperasi secara efektif pada aliran udara dengan arah dan karakteristik yang berubah, termasuk aliran bertekanan tinggi dari *exhaust fan* yang bersifat turbulen. Desain ini dipilih untuk meningkatkan kemampuan penangkapan energi kinetik udara buangan dan mengoptimalkan proses konversi energi menjadi energi mekanik pada turbin. Turbin yang digunakan merupakan tipe radial dengan sumbu horizontal (*horizontal radial turbine*) dan kategori low-speed rotor yang dirancang untuk bekerja pada kecepatan putar rendah namun memiliki kemampuan menghasilkan torsi yang sesuai dengan karakteristik aliran udara dari sistem

exhaust fan. Turbin dibuat menggunakan material logam ringan untuk memperoleh konstruksi yang kuat, tahan terhadap beban mekanik, serta memiliki massa yang relatif rendah sehingga mampu meningkatkan respons putaran. Turbin dipasang secara langsung pada bagian outlet ducting exhaust agar seluruh aliran udara buangan dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber energi penggerak. Sistem turbin menggunakan 20 buah sudu yang disusun secara radial untuk meningkatkan luas penangkapan aliran udara dan menjaga kestabilan putaran selama proses pembangkitan energi listrik.



Gambar 9. Gambar Turbin Yang Digunakan Dalam Pengujian

Turbin ini dirancang untuk bekerja pada kecepatan angin rendah–menengah, sehingga cocok dengan karakteristik udara buangan industri. Desain turbin dibuat agar mampu menangkap aliran udara exhaust secara optimal dan menghasilkan torsi cukup untuk memutar generator.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Parameter Turbin dan Potensi Daya Angin

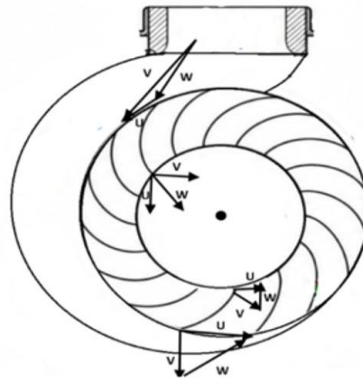
No.	Parameter Perhitungan	Persamaan	Hasil Perhitungan	Satuan
1	Luas sapuan turbin	$A = \pi r^2$	0,2826	m ²
2	Daya teoritis angin	$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$	346,53	W

Berdasarkan hasil perhitungan, turbin angin memiliki luas sapuan sebesar 0,2826 m² dan mampu menerima potensi daya angin teoritis sebesar 346,53 W pada kecepatan aliran udara 12,69 m/s. Nilai ini menunjukkan bahwa aliran udara buangan *exhaust fan* memiliki potensi energi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik skala kecil. Daya teoritis tersebut menjadi acuan awal sebelum mempertimbangkan rugi-rugi sistem akibat turbulensi, gesekan mekanik, efisiensi generator, dan transmisi, sehingga daya aktual yang dihasilkan diperkirakan lebih rendah dari nilai teoritis. Berdasarkan hasil pengukuran, kecepatan angin dari *exhaust fan* sebesar 12,69 m/s dengan diameter turbin 600 mm. Perhitungan menggunakan persamaan daya kinetik aliran udara menghasilkan luas sapuan turbin sebesar 0,2826 m² dan daya angin teoritis sebesar 346,53 Watt. Nilai tersebut menunjukkan potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator DC.

Aliran Udara dan Segitiga Kecepatan pada Turbin

Aliran udara dari *exhaust fan* masuk melalui bagian atas *ducting*, mengenai sudu rotor, menghasilkan gaya putar pada poros turbin, kemudian keluar melalui sisi turbin mengikuti arah putaran rotor. Analisis segitiga kecepatan digunakan untuk menjelaskan perubahan energi kinetik udara menjadi energi mekanik melalui hubungan antara kecepatan aliran udara (V), kecepatan sudu (U), dan kecepatan relatif (W). Pada turbin yang dirancang, udara memasuki rotor dari bagian atas dan mengenai sudu dengan sudut kemiringan 20°.

Segitiga kecepatan gabungan inlet dan outlet pada satu diagram



Gambar 10. Gambar aliran Segitiga Kecepatan

Gambar tersebut menunjukkan segitiga kecepatan pada sisi *inlet* dan *outlet* turbin yang digunakan untuk menganalisis perubahan arah aliran udara *exhaust* serta proses perpindahan energi. Pada sisi *inlet*, udara dengan kecepatan absolut (V_1) berinteraksi dengan kecepatan sudu (U_1) sehingga menghasilkan kecepatan relatif (W_1) yang memutar rotor. Setelah melewati sudu, udara keluar dengan kecepatan absolut (V_2), kecepatan sudu (U_2), dan kecepatan relatif (W_2), di mana komponen tangensial *outlet* lebih kecil karena sebagian energi telah dikonversi menjadi energi mekanik. Perubahan momentum aliran dari *inlet* ke *outlet* menghasilkan gaya pada sudu yang menyebabkan rotor berputar. Dengan demikian, energi kinetik udara buangan (*exhaust*) berhasil diubah menjadi energi mekanik dan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Analisis segitiga kecepatan digunakan untuk menjelaskan mekanisme konversi energi sekaligus mengevaluasi kinerja turbin.

Menghitung Kecepatan Sudut (ω)

Tabel 4. Hasil Perhitungan

Parameter	Nilai
Kecepatan absolut (V)	12,69 m/s
Kecepatan keliling sudu (U)	18,56 m/s
Komponen tangensial (Vw)	11,92 m/s
Komponen radial (Vf)	4,34 m/s
Kecepatan relatif (W)	7,93 m/s

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kecepatan sudut rotor sebesar 61,85 rad/s dan kecepatan sudu inlet sebesar 18,55 m/s. Aliran udara *exhaust* memiliki kecepatan absolut sebesar 12,69 m/s sehingga menghasilkan kecepatan relatif terhadap sudu sebesar 7,93 m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa aliran udara *exhaust* mampu memberikan gaya tangensial pada sudu turbin sehingga rotor dapat berputar secara kontinyu.

Sistem Generator

Generator merupakan komponen yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik. Penelitian ini menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG) model PMG-S-12V tiga fasa karena memiliki efisiensi tinggi, konstruksi sederhana, tidak memerlukan sistem eksitasi eksternal, serta sesuai untuk sistem pembangkit skala kecil dengan tegangan rendah dan performa yang stabil pada variasi putaran.

Sistem Generator



Gambar 11. Nameplate Spesifikasi Generator Yang Di Gunakan Pada Pnelitian

Generator dihubungkan ke poros turbin menggunakan kopling fleksibel untuk meminimalkan getaran dan rugi mekanis.

Sistem Transmisi Pulley

Sistem transmisi pulley merupakan mekanisme pemindah daya yang menggunakan sabuk (belt) dan dua buah pulley untuk mentransmisikan putaran dari poros penggerak (driver) ke poros yang digerakkan (driven). Pada sistem yang digunakan dalam penelitian ini, pulley bagian atas terhubung dengan sumber energi mekanik (misalnya turbin atau motor penggerak), sedangkan pulley bagian bawah terhubung langsung dengan poros generator. untuk meningkatkan kecepatan putaran generator, digunakan sistem transmisi pulley pada gambar di bawah ini:



Gambar 12. Spesifikasi Pulley Transmisi Yang Digunakan pada Penelitian

Setiap 1 putaran turbin menghasilkan ± 2.67 putaran pada generator sehingga output listrik meningkat.

Inverter DC to AC

Inverter berfungsi mengubah tegangan DC 48 V menjadi AC 220V.



Gambar 13. Spesifikasi Inverter Yang Digunakan pada Penelitian

Inverter ini menjadi komponen utama yang mengubah energi mekanik turbin menjadi listrik yang dapat digunakan oleh peralatan industri.

Alur Kerja Sistem Secara Keseluruhan

Aliran energi pada sistem pembangkit listrik tenaga angin (*PLTB*) berbasis pemanfaatan udara buangan *exhaust fan* berlangsung melalui beberapa tahapan konversi energi. Proses dimulai ketika *exhaust fan* menghasilkan aliran udara dengan kecepatan sekitar 6,75–8,5 m/s, kemudian aliran tersebut diarahkan melalui *ducting* menuju turbin untuk menghasilkan gaya putar pada sudu rotor. Putaran turbin selanjutnya diteruskan melalui sistem transmisi menggunakan pulley 8 inch yang terhubung dengan pulley 3 inch, sehingga kecepatan putaran pada sisi generator dapat meningkat. Energi mekanik dari putaran poros kemudian dikonversi oleh generator menjadi energi listrik berupa tegangan 12 V DC. Selanjutnya, energi listrik DC tersebut dikonversi oleh inverter menjadi tegangan 220 V AC yang dapat digunakan untuk menyuplai beban listrik. Melalui rangkaian proses tersebut, lampu dapat menyala menggunakan energi hasil konversi dari aliran udara buangan *exhaust fan* sebagai sumber energi pada sistem *PLTB*.

Karakteristik Aliran Udara Buangan

Karakteristik aliran udara buangan dianalisis berdasarkan parameter kecepatan aliran dan luas penampang *ducting exhaust* untuk mengetahui potensi energi yang tersedia sebagai sumber penggerak turbin. Berdasarkan hasil pengukuran, *ducting exhaust* memiliki bentuk persegi dengan dimensi 121 cm × 121 cm, sehingga diperoleh luas penampang aliran sebesar 0,6561 m². Dengan kecepatan aliran udara sebesar 6,7 m/s, debit aliran udara yang melewati *ducting* dihitung menggunakan persamaan kontinuitas dan menghasilkan nilai sebesar 4,39 m³/s. Nilai debit yang cukup besar ini menunjukkan bahwa sistem memiliki volume aliran udara yang signifikan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi kinetik. Meskipun kecepatan udara relatif rendah, jumlah massa udara yang mengalir dalam satuan waktu tetap tinggi sehingga mampu memberikan potensi energi yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik melalui turbin dan selanjutnya menjadi energi listrik.

Setelah pemasangan *casing turbine*, kecepatan udara buangan berada pada rentang 10,70–14,62 m/s dengan rata-rata 12,69 m/s, sedangkan temperatur relatif stabil pada kisaran 37,0–39,1 °C sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap variasi kecepatan udara. Variasi kecepatan dipengaruhi oleh distribusi aliran yang tidak merata, turbulensi, serta gesekan pada dinding *ducting*. *Casing turbine* berfungsi mengarahkan dan menstabilkan aliran udara agar lebih terfokus menuju sudu turbin, sehingga pemanfaatan energi kinetik menjadi lebih efektif. Meskipun terjadi sedikit penurunan kecepatan akibat hambatan aliran dan interaksi dengan sudu turbin, kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian energi kinetik udara telah berhasil dikonversi menjadi energi mekanik untuk menghasilkan energi listrik.

Efisiensi Sistem Pemanfaatan Buangan dan Estimasi Kontribusi Energi Listrik terhadap Kebutuhan Energi Industri

Estimasi kontribusi energi listrik dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem pemanfaatan udara buangan *exhaust fan* dalam mendukung kebutuhan energi listrik di lingkungan industri. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan energi listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pendukung, meskipun belum dirancang untuk menggantikan suplai energi utama dari jaringan listrik. Pemanfaatan energi buangan yang sebelumnya terlepas ke lingkungan memberikan peluang untuk meningkatkan efisiensi energi melalui proses konversi energi kinetik udara menjadi energi listrik. Implementasi sistem secara berkelanjutan dapat mendukung konsep industri hijau dengan mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan pemanfaatan sumber energi alternatif.

Berdasarkan hasil perhitungan faktor daya (*power factor*), diperoleh nilai $\cos \varphi$ sebesar 0,514. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem masih memiliki komponen daya reaktif yang cukup besar sehingga pemanfaatan daya listrik belum mencapai kondisi optimal. Rendahnya nilai faktor daya dipengaruhi oleh karakteristik beban yang digunakan serta kinerja generator dalam menghasilkan energi listrik. Kondisi ini menyebabkan sebagian daya yang tersedia tidak sepenuhnya dikonversi menjadi daya aktif yang dapat digunakan oleh beban, sehingga efisiensi sistem menjadi berkurang.

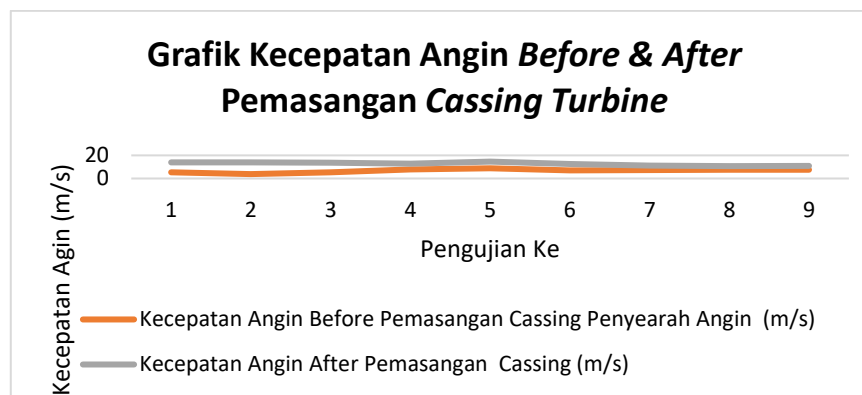
Hasil perhitungan daya keluaran inverter menunjukkan bahwa sistem memiliki daya semu sebesar 486 W, sedangkan daya nyata yang benar-benar digunakan oleh beban lampu hanya

mencapai sekitar 250 W. Perbedaan antara daya semu dan daya nyata terjadi akibat pengaruh faktor daya sebesar 0,51, di mana semakin rendah nilai $\cos \phi$, semakin besar selisih antara energi yang disuplai dan energi yang benar-benar dimanfaatkan oleh beban. Oleh karena itu, peningkatan kualitas sistem dapat dilakukan melalui optimasi generator, pemilihan karakteristik beban, serta perbaikan faktor daya untuk meningkatkan efektivitas pemanfaatan energi listrik.

Efisiensi pemanfaatan energi buangan ditentukan berdasarkan perbandingan antara daya listrik aktual yang dihasilkan sistem dengan potensi daya angin teoritis yang tersedia. Berdasarkan hasil pengujian, daya listrik aktual yang dihasilkan masih berada di bawah nilai teoritis akibat adanya rugi-rugi energi pada setiap tahapan konversi, seperti kehilangan mekanik pada turbin dan transmisi, turbulensi aliran udara, serta keterbatasan efisiensi generator dan inverter. Meskipun demikian, sistem ini menunjukkan bahwa energi buangan exhaust fan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif skala kecil yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi dalam konsep industri berkelanjutan.

Analisis Grafik Hasil Pengujian

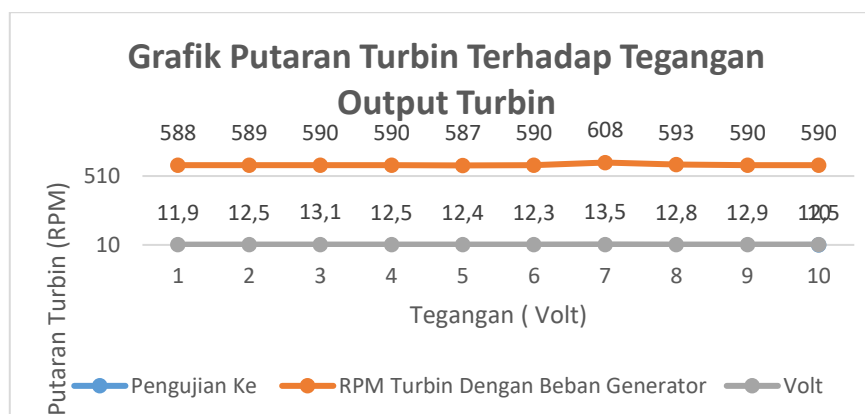
Pengaruh *Cassing Turbine* Penyearah Aliran Angin Terhadap Kecepatan Angin



Gambar 14. Grafik Kecepatan Angin *Before* dan *After* Pemasangan *Cassing Turbine*

Berdasarkan grafik perbandingan kecepatan angin sebelum (*before*) dan setelah (*after*) pemasangan *casing turbine*, terlihat bahwa pemasangan *casing* mampu meningkatkan dan menjaga kestabilan kecepatan aliran udara menuju turbin. Kecepatan angin setelah pemasangan *casing* menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan kondisi sebelum pemasangan yang mengalami fluktuasi lebih besar pada setiap pengujian. Peningkatan ini menunjukkan bahwa *casing turbine* berfungsi sebagai pengarah aliran (*flow guide*) yang membantu mengurangi penyebaran turbulensi serta memusatkan energi kinetik udara menuju area sudu turbin. Dengan demikian, penggunaan *casing* berkontribusi dalam meningkatkan kualitas aliran udara yang diterima turbin sehingga berpotensi meningkatkan performa konversi energi pada sistem pembangkit listrik tenaga angin berbasis udara buangan *exhaust fan*.

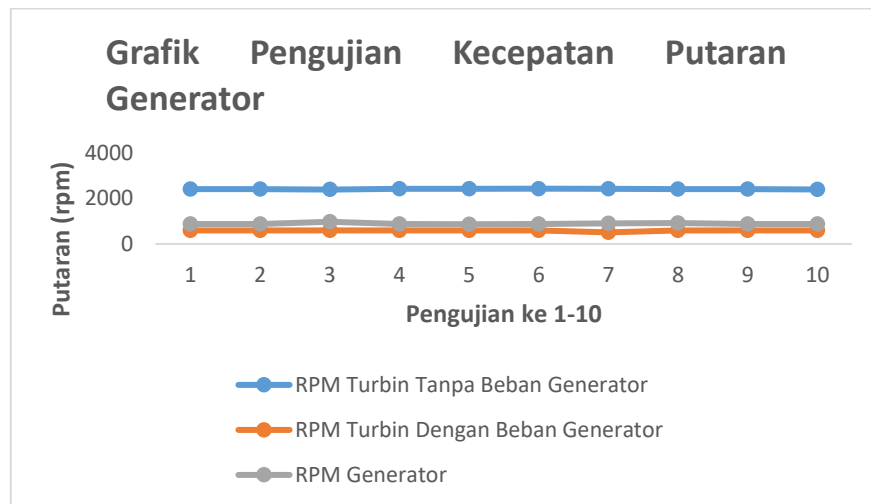
Pengaruh Putaran Terhadap Tegangan



Gambar 15. Grafik Hubungan Putaran Turbin terhadap Tegangan Output Generator

Berdasarkan grafik hubungan putaran turbin terhadap tegangan keluaran generator, terlihat bahwa peningkatan putaran turbin berada pada rentang yang relatif stabil, yaitu sekitar 587–608 RPM, dengan tegangan keluaran yang dihasilkan berkisar antara 11,9–13,5 V. Putaran tertinggi terjadi pada pengujian ke-7 sebesar 608 RPM yang menghasilkan tegangan sebesar 13,5 V, sedangkan putaran terendah terjadi pada pengujian ke-5 sebesar 587 RPM dengan tegangan 12,4 V. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putaran turbin memiliki pengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan generator, di mana peningkatan RPM cenderung meningkatkan tegangan keluaran. Stabilitasnya putaran turbin selama pengujian menunjukkan bahwa sistem transmisi dan generator mampu bekerja secara konsisten dalam mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Namun, variasi kecil pada tegangan menunjukkan adanya pengaruh faktor eksternal seperti perubahan aliran udara, beban generator, serta rugi-rugi mekanik pada sistem pembangkit.

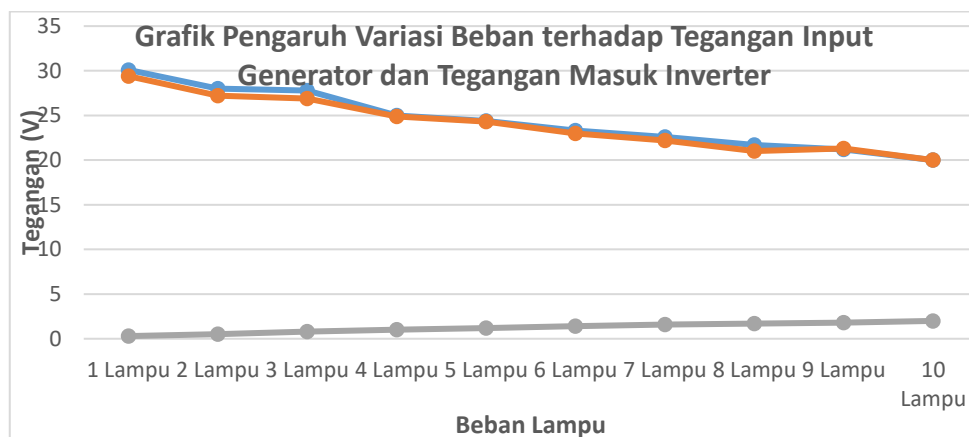
Pengaruh putaran turbin dan generator pada kondisi tanpa beban dan dengan beban generator



Gambar 16. Grafik Hubungan putaran turbin dan generator pada kondisi tanpa beban dan dengan beban generator

Berdasarkan grafik pengujian putaran generator, putaran turbin tanpa beban berada pada nilai tertinggi sekitar 2.400 RPM, sedangkan saat terhubung dengan generator mengalami penurunan menjadi sekitar 590 RPM akibat adanya beban dan torsi balik generator. Putaran generator berada pada kisaran 850–950 RPM dan relatif stabil selama pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem transmisi mampu meningkatkan putaran menuju generator serta mempertahankan kinerja sistem dalam proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Pengaruh variasi beban terhadap tegangan input generator dan tegangan masuk inverter



Gambar 17. Grafik pengaruh variasi beban terhadap tegangan input generator dan tegangan masuk inverter

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemanfaatan energi buangan *exhaust fan* menggunakan turbin angin sumbu horizontal tipe *low-speed rotor* mampu mengonversi energi kinetik udara buangan menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan beban ringan. Sistem yang dikembangkan menghasilkan kecepatan aliran udara rata-rata sebesar 12,69 m/s, luas sapuan turbin sebesar 0,2826 m², serta potensi daya angin teoritis sebesar 346,53 W. Dari hasil pengujian, sistem mampu menghasilkan daya listrik aktual sekitar 250 W, yang menunjukkan bahwa energi buangan dari sistem ventilasi industri memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif melalui pendekatan *waste energy recovery*. Pemanfaatan energi sisa dari sistem industri menjadi salah satu strategi penting dalam peningkatan efisiensi energi karena mampu mengurangi kehilangan energi yang sebelumnya dilepaskan ke lingkungan serta mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan (Hodroj et al., 2024).

Temuan penelitian ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa aliran udara buangan dari sistem ventilasi memiliki peluang untuk dikonversi menjadi energi listrik, terutama pada fasilitas industri yang memiliki operasi *exhaust fan* secara kontinu. Berbeda dengan turbin angin konvensional yang bergantung pada variasi arah dan kecepatan angin alami, sistem pada penelitian ini memanfaatkan aliran udara terarah dari *ducting exhaust* sehingga energi kinetik udara dapat lebih efektif diarahkan menuju rotor turbin. Studi mengenai pemanfaatan energi dari udara buangan menunjukkan bahwa pemasangan turbin pada jalur keluaran udara dapat meningkatkan nilai tambah energi dari sistem ventilasi yang sebelumnya hanya berfungsi sebagai pembuang udara panas (Abdullah et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa konsep integrasi turbin kecil pada sistem *exhaust* memiliki peluang untuk diterapkan sebagai teknologi pendukung efisiensi energi pada sektor industri.

Karakteristik desain turbin menjadi faktor penting dalam menentukan kemampuan sistem dalam menangkap energi udara buangan. Pada penelitian ini digunakan turbin sumbu horizontal tipe radial dengan kategori *low-speed rotor* yang dirancang untuk menghasilkan torsi pada kondisi kecepatan putar rendah. Konfigurasi tersebut sesuai dengan karakteristik aliran udara buangan yang memiliki pola turbulensi akibat interaksi dengan sistem ventilasi dan saluran *ducting*. Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa turbin dengan desain yang sesuai terhadap karakteristik aliran masuk mampu meningkatkan koefisien pemanfaatan energi karena mengurangi kehilangan energi akibat ketidaksesuaian antara arah aliran udara dan sudut sudu turbin (Manwell et al., 2024). Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi turbin pada penelitian ini menjadi aspek penting dalam memastikan energi kinetik udara dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara optimal.

Peningkatan kualitas aliran udara melalui pemasangan *casing turbine* juga memberikan pengaruh terhadap performa sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah pemasangan *casing*, kecepatan udara menuju turbin menjadi lebih stabil dengan rata-rata 12,69 m/s. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa *casing turbine* berfungsi sebagai pengarah aliran (*flow guide*) yang membantu memusatkan energi kinetik udara menuju area sudu rotor. Penggunaan komponen pengarah aliran telah banyak diterapkan pada sistem turbin skala kecil karena mampu mengurangi efek turbulensi dan meningkatkan distribusi kecepatan udara pada sisi masuk turbin (Bourabaa et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan performa sistem tidak hanya ditentukan oleh desain rotor, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam mengelola karakteristik aliran sebelum memasuki turbin.

Analisis segitiga kecepatan menunjukkan bahwa proses konversi energi terjadi melalui interaksi antara kecepatan absolut udara, kecepatan sudu, dan kecepatan relatif terhadap rotor. Pada penelitian ini, aliran udara dengan kecepatan absolut 12,69 m/s menghasilkan kecepatan relatif sebesar 7,93 m/s dan kecepatan keliling sudu sebesar 18,55 m/s. Parameter tersebut menunjukkan bahwa aliran udara mampu menghasilkan gaya tangensial pada sudu sehingga rotor dapat berputar secara kontinu. Perubahan momentum udara antara sisi *inlet* dan *outlet* rotor menjadi mekanisme utama dalam menghasilkan torsi mekanik yang selanjutnya diteruskan menuju generator. Hasil ini memperlihatkan bahwa desain sudu dan kondisi aliran memiliki

peranan penting dalam menentukan kemampuan sistem dalam mengekstraksi energi dari udara buangan.

Pada sistem pembangkitan listrik, penggunaan Permanent Magnet Generator (PMG) memungkinkan proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik berlangsung secara efektif pada sistem skala kecil. Namun, hasil pengujian menunjukkan bahwa pembebanan generator memberikan pengaruh terhadap karakteristik putaran turbin. Pada kondisi tanpa beban, putaran turbin mencapai sekitar 2.400 RPM, sedangkan setelah generator terhubung dengan beban, putaran turun menjadi sekitar 590 RPM akibat munculnya torsi elektromagnetik yang berlawanan terhadap arah putaran rotor. Fenomena tersebut merupakan karakteristik umum pada sistem pembangkit listrik karena peningkatan beban listrik akan meningkatkan hambatan elektromagnetik pada generator (Chapman, 2023). Sistem transmisi pulley yang digunakan pada penelitian ini mampu meningkatkan putaran menuju generator hingga mencapai kisaran 850–950 RPM, sehingga proses pembangkitan listrik tetap dapat berlangsung secara stabil.

Hubungan antara putaran turbin dan tegangan keluaran generator menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar memiliki kecenderungan meningkatkan tegangan listrik yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa putaran turbin berada pada rentang 587–608 RPM dengan tegangan keluaran generator sebesar 11,9–13,5 V. Stabilitas hubungan antara putaran dan tegangan menunjukkan bahwa sistem transmisi dan generator mampu bekerja secara konsisten dalam melakukan konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Namun, variasi kecil pada tegangan keluaran menunjukkan adanya pengaruh faktor eksternal seperti perubahan distribusi aliran udara, karakteristik beban, serta rugi-rugi mekanik pada sistem transmisi. Berdasarkan analisis efisiensi energi, daya listrik aktual yang dihasilkan sistem masih lebih rendah dibandingkan potensi daya angin teoritis sebesar 346,53 W. Perbedaan tersebut terjadi akibat adanya kehilangan energi pada setiap tahapan konversi, mulai dari interaksi aliran udara dengan sudu turbin, gesekan mekanik pada poros dan transmisi, efisiensi generator, hingga proses konversi daya pada inverter. Selain itu, nilai faktor daya (*power factor*) sebesar 0,514 menunjukkan bahwa sistem masih memiliki komponen daya reaktif yang cukup besar sehingga pemanfaatan daya aktif belum optimal. Kondisi ini menyebabkan daya semu inverter sebesar 486 W hanya menghasilkan daya nyata sekitar 250 W pada beban lampu. Peningkatan efisiensi sistem dapat dilakukan melalui optimasi karakteristik generator, perbaikan faktor daya, serta penggunaan sistem kontrol daya yang lebih sesuai dengan karakteristik beban.

Dari perspektif penerapan industri, penelitian ini memberikan implikasi bahwa udara buangan dari sistem ventilasi dapat dikembangkan sebagai sumber energi tambahan untuk mendukung kebutuhan listrik skala kecil. Sistem ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti sumber energi utama, tetapi sebagai teknologi pendukung yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi melalui pemanfaatan kembali energi yang sebelumnya terbuang. Implementasi teknologi *waste energy recovery* pada sistem industri berpotensi mendukung konsep industri hijau melalui pengurangan pemborosan energi dan peningkatan efisiensi operasional (Singh et al., 2024). Meskipun sistem yang dikembangkan menunjukkan potensi yang baik, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian masih dilakukan pada satu karakteristik *exhaust fan* dan kondisi operasi tertentu sehingga variasi performa pada kondisi industri yang berbeda belum sepenuhnya dianalisis. Selain itu, efisiensi total sistem masih dipengaruhi oleh faktor aerodinamis rotor, rugi mekanik transmisi, karakteristik generator, serta kualitas konversi daya inverter. Keterbatasan tersebut menjadi dasar untuk pengembangan penelitian berikutnya melalui optimasi desain sudu berbasis simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*), peningkatan efisiensi transmisi, serta integrasi sistem penyimpanan energi. Pengembangan lebih lanjut diharapkan mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam menghasilkan energi listrik yang lebih stabil dan efisien untuk mendukung penerapan teknologi energi berkelanjutan pada sektor industri.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, fabrikasi, dan pengujian, sistem pemanfaatan udara buangan (*exhaust fan*) menggunakan turbin angin sumbu horizontal tipe *low-speed rotor* mampu bekerja dengan baik pada kecepatan udara rata-rata 12,69 m/s dan temperatur 33,43 °C, sehingga

menunjukkan potensi udara buangan industri sebagai sumber energi alternatif. Sistem menghasilkan putaran turbin rata-rata 2411 RPM dengan tegangan generator 12,3–13,5 V (rata-rata 12,6 V) yang relatif stabil.

Daya listrik aktual yang dihasilkan sekitar 250 W, dengan selisih terhadap nilai teoritis dipengaruhi oleh rugi-rugi mekanik, turbulensi aliran, serta efisiensi generator dan sistem transmisi. Meskipun kontribusinya masih terbatas untuk beban ringan, sistem ini berpotensi mengurangi konsumsi energi listrik konvensional dan mendukung penerapan konsep industri hijau melalui pemanfaatan energi buangan. Secara keseluruhan, penelitian membuktikan bahwa udara panas dari *exhaust fan* layak dikembangkan sebagai sumber energi baru terbarukan, dengan peluang peningkatan kinerja melalui optimasi desain turbin, efisiensi generator, sistem transmisi, dan pengaturan aliran udara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan saran, dukungan, dan inspirasi selama proses penelitian. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua partisipan dan responden yang telah meluangkan waktu untuk berpartisipasi dalam penelitian ini. Tak lupa, kami juga mengucapkan terima kasih kepada lembaga atau institusi yang telah memberikan dukungan dan fasilitas dalam menjalankan penelitian ini. Semua kontribusi dan bantuan yang diberikan sangat berarti bagi kelancaran dan kesuksesan penelitian ini. Terima kasih atas segala kerja keras dan kolaborasi yang telah terjalin.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, F., Boumaiza, A., Sanfilippo, A., & Al-fagih, L. (2025). A comprehensive review on green finance and its impact on net zero energy transition : From the perspective of renewable energy development. *Energy Strategy Reviews*, 62(October), 101948. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101948>
- Cipollina, M., De Pascale, G., & Esposito, L. (2025). The twin innovation-renewable energy production of Italian provinces: New evidence from spatial panel analysis. *Energy Policy*, 206(July), 114799. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114799>
- Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J., & Kesti, J. (2016). Heat Recovery from Exhaust Air as a Thermal Storage Energy Source for Geothermal Energy Piles. *Energy Procedia*, 96(October), 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.179>
- Fazlizan, A., Chong, W. T., Yip, S. Y., Hew, W. P., & Poh, S. C. (2015). Design and experimental analysis of an exhaust air energy recovery wind turbine generator. *Energies*, 8(7), 6566–6584. <https://doi.org/10.3390/en8076566>
- Fitrianza, Arifin, F., & RS, C. (2025). Optimizing the Performance of Wind Turbines Using Exhaust Gas At the Borang Gas Power Plant. *International Journal of Mechanics, Energy Engineering and Applied Science (IJMEAS)*, 3(2), 9–14. <https://doi.org/10.53893/ijmeas.v3i2.405>
- Melguizo, A., Katz, R., & Jung, J. (2026). Can AI grow green? Evidence of a Kuznets curve among AI, renewable energies and emissions. *Energy Policy*, 208(September 2025). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114883>
- Ramalingam, S., Hassan, W. H., Subramanian, M., Khan, M. I., Elkamchouchi, D. H., Tarakaramu, N., & Prashanth, K. K. (2025). Synergies for sustainability: Renewable energy, urban planning, and green industry in carbon emission reduction. *Sustainable Futures*, 10(April 2024), 101222. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101222>
- Satria Tresnajaya, M., Indra Partha, C. G., & Sukerayasa, I. W. (2020). Pemanfaatan Udara Buang Exhaust Fan Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Dengan Penambahan Wind Tunnel Berbasis Atmega 2560. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(4), 51. <https://doi.org/10.24843/spektrum.2020.v07.i04.p7>
- Swardika, I. K., & Santiary, P. A. W. (2018). Analisis Potensi Angin Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik Di Indonesia Dengan Data Meteorologi Satellite Remote Sensing. *Matrix*, 8(3), 52–58. <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/matrix/article/view/1059>

- Vidyatmoko. (2020). Jurnal Analisis Kebijakan | Vol. 4 No. 2 Tahun 2020. *Jurnal Analisis Kebijakan*, 4(2), 26–39.
- Chong, W. T., Yip, S. Y., Fazlizan, A., Poh, S. C., Hew, W. P., Tan, E. P., & Lim, T. S. (2014). *Design of an exhaust air energy recovery wind turbine generator for energy conservation in commercial buildings*. *Renewable Energy*, 67, 252–256. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.028>
- Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., Ping, H. W., & Tan, E. P. (2015). *Design and Experimental Analysis of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator*. *Energies*, 8(7), 6566–6584. <https://doi.org/10.3390/en8076566>
- Tabatabaeikia, S., Nik-Ghazali, N. N., Chong, W. T., Shahizare, B., Fazlizan, A., Esmailzadeh, A., & Izadyar, N. (2016). *A Comparative Computational Fluid Dynamics Study on an Innovative Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator*. *Energies*, 9(5).
- Chong, W. T., dkk. (2016). *Computational and Experimental Optimization of the Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator*. *Energy Conversion and Management*, 126, 862–874. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.039>
- Chong, W. T., dkk. (2014). *The Experimental Study on the Wind Turbine's Guide-Vanes and Diffuser of an Exhaust Air Energy Recovery System Integrated with the Cooling Tower*. *Energy Conversion and Management*, 87, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.009>
- Chong, W. T., dkk. (2013). *Early Development of an Energy Recovery Wind Turbine Generator for Exhaust Air System*. *Applied Energy*, 112, 568–575. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.042>
- Degefa, M. W., & Teferi, S. T. (2014). *Energy Recovery from Exhaust Air of Textile Industry*. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 3(4), 82–86. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20140304.12>
- Tresnajaya, M. S., Indra Partha, C. G., & Sukerayasa, I. W. (2020). *Pemanfaatan Udara Buang Exhaust Fan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dengan Penambahan Wind Tunnel Berbasis ATmega 2560*. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(4), 51–59.
- Banerjee, S., & Maity, T. (2025). *Energy Recovery from Mine Ventilation Exhaust Air Using Hybrid Savonius–Darrieus Vertical Axis Wind Turbine*. *International Journal of Ventilation*.
- Abdullah, A., Hassan, M., & Rahman, M. (2024). Recovery of electrical power from exhaust air: Role of vertical axis wind turbine. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(6), e14502. <https://doi.org/10.1002/ep.14502>
- Bourabaa, N., Boumeddane, B., & Hamid, A. (2023). Investigation of flow guiding techniques for improving small wind turbine performance under turbulent airflow conditions. *Energy Conversion and Management*, 291, 117311. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117311>
- Chapman, S. J. (2023). *Electric machinery fundamentals* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hodroj, M., Al Takash, A., Faraj, J., Taher, R., Lemenand, T., & Khaled, M. (2024). Comprehensive review, categorization, and practical insights on heat recovery from hot air and exhaust gas in engineering applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159, 108165. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108165>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2024). *Wind energy explained: Theory, design and application* (4th ed.). Wiley.
- Singh, R., Dogra, S., Dixit, S., et al. (2024). Advancements in thermoelectric materials for efficient waste heat recovery and renewable energy generation. *Hybrid Advances*, 5, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100176>