



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 4430-4440

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Efisiensi Turbin *Darrieus* pada Prototipe Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut di Selat Madura

Sindu Dwi Prassetyo¹, Agus Dwi Santoso², Otri Wani Sihaloho³

^{1,2,3}Politeknik Pelayaran Surabaya

[1*sindudwi444@gmail.com](mailto:sindudwi444@gmail.com), [2agusbp2ipsbv@gmail.com](mailto:agusbp2ipsbv@gmail.com), [3otriaihaloho@gmail.com](mailto:otriaihaloho@gmail.com)

Abstrak

Energi listrik merupakan kebutuhan vital bagi kehidupan manusia, baik untuk aktivitas sehari-hari maupun kegiatan industri. Namun pasokan energi listrik di Indonesia masih bergantung pada sumber daya fosil yang tidak terbarukan, sehingga memerlukan inovasi energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah tenaga arus laut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi turbin *Darrieus* sebagai prototipe pembangkit listrik tenaga arus laut di Selat Madura. Selat Madura, dengan luas sekitar 10.962 km², memiliki potensi arus laut yang signifikan untuk dikembangkan sebagai sumber energi. Penelitian ini terfokus pada pengukuran kuat arus laut, analisis efisiensi turbin *Darrieus*, serta pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin. Metode yang digunakan meliputi pengujian prototipe turbin untuk menentukan efisiensi dan keefektifan desain yang optimal berdasarkan kondisi arus laut di Selat Madura. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin *Darrieus* memiliki efisiensi yang kurang dalam mengubah energi kinetik arus laut di selat Madura menjadi energi mekanik dan listrik karena kecepatan arus yang ada di selat Madura yang kurang. Jumlah blade serta konfigurasi turbin mempunyai pengaruh terhadap jumlah Revolution Per Minute (RPM) dan tegangan yang dihasilkan paling besar yaitu dengan kemiringan sudut blade 90o dengan rata-rata tegangan 5,89 V dengan RPM rata-rata yaitu 341,4. Dengan demikian, turbin *Darrieus* dapat menjadi solusi yang efektif jika di tempatkan pada perairan yang mempunyai arus yang kencang.

Kata kunci: Turbin Darrieus, Energi Terbarukan, Arus Laut, Efisiensi, Selat Madura

1. Latar Belakang

Di era modern saat ini, energi listrik merupakan bagian penting dari kehidupan manusia, yang mana manusia tidak bisa lepas dari kebutuhan energi listrik untuk kehidupan sehari-hari maupun kegiatan industri. Contohnya, industri perkapalan saat ini masih menjadikan pembangkit listrik tenaga diesel sebagai sumber energi utama. Dengan adanya inovasi Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL), sistem ini dapat menjadi salah satu cadangan baterai atau sumber tambahan energi listrik. Pasokan energi listrik di Indonesia saat ini masih sangat bergantung pada sumber daya alam yang tidak dapat diperbarukan, seperti bahan bakar fosil, yang jika digunakan secara terus-menerus akan habis di masa mendatang dan menimbulkan berbagai masalah lingkungan serta ketersediaan energi.

Oleh karena itu, peneliti berupaya mengembangkan inovasi energi terbarukan yang berkelanjutan dan tidak akan habis digunakan. Pemanfaatan tenaga arus laut sebagai sumber penghasil energi listrik merupakan salah satu inovasi dari energi terbarukan yang potensial. Potensi inovasi ini sangat tinggi jika dikembangkan secara serius, mengingat Indonesia memiliki wilayah laut yang luas, sehingga memudahkan pemanfaatan sumber tenaga arus laut. Salah satu lokasi yang memiliki potensi besar adalah Selat Madura, yang diperkirakan memiliki potensi energi arus laut yang cukup besar untuk dimanfaatkan. Beberapa penelitian telah mengidentifikasi potensi arus laut di Selat Madura melalui analisis kecepatan arus dan estimasi energi yang dapat dihasilkan (Hidayah, Pramaditya, & Nurhasanah, 2020). Perairan Selat Madura diduga memiliki potensi energi arus laut yang signifikan karena karakteristik arusnya yang kuat dan konsisten (Wahyudi, 2021). Studi juga dilakukan untuk mendeskripsikan karakteristik arus dan menganalisis potensi arus laut di Selat Madura (Pramaditya, 2019).

Penggunaan jenis turbin untuk PLTAL tidak bisa dilakukan secara asal, karena kekuatan arus laut di setiap daerah berbeda-beda, sehingga pemilihan turbin yang tidak tepat dapat mengurangi efisiensi dan potensi energi listrik yang dihasilkan. Berbagai jenis turbin dapat diaplikasikan tergantung pada kekuatan arus laut di lokasi pemasangan, salah satunya adalah turbin *Darrieus*. Turbin *Darrieus* merupakan jenis turbin sumbu vertikal yang

sering digunakan dalam rancangan PLTAL karena kemampuannya menangkap arus dari berbagai arah (Rafi et al., 2021). Turbin ini dirancang secara vertikal dengan beberapa bilah sudu dan termasuk dalam kategori turbin arus laut (Marine Current Turbines) yang dirancang khusus untuk memanfaatkan energi kinetik dari arus laut (Kurniawan, 2018).

Komponen utama dari turbin adalah *blade* (sudu), yang merupakan bagian paling penting karena berfungsi mengonversi energi gerak arus air menjadi energi mekanik (Rafi et al., 2021). Turbin secara umum dapat digolongkan menjadi dua tipe berdasarkan poros perputarannya, yaitu horizontal dan vertikal. Turbin dengan poros horizontal pada dasarnya hanya dapat menangkap arus dari satu arah tertentu, sehingga jika arah arus berubah, performanya akan menurun. Sebaliknya, turbin dengan poros vertikal, seperti turbin Darrieus, mampu menangkap arus dari berbagai arah, sehingga performa dan tenaga yang dihasilkan lebih stabil meskipun arah arus berubah-ubah.

Dengan mempertimbangkan karakteristik arus laut yang dinamis dan multidireksional di perairan Indonesia, penggunaan turbin vertikal seperti Darrieus menjadi pilihan yang lebih efektif dibandingkan turbin horizontal. Penerapan teknologi ini di lokasi strategis seperti Selat Madura dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap diversifikasi sumber energi terbarukan di Indonesia. Pengembangan PLTAL tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dan ketahanan energi nasional di masa depan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan (Research and Development atau R&D) yang bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji efektivitas sistem pembangkit listrik tenaga arus laut berbasis Internet of Things (IoT). Pendekatan penelitian menggunakan model Research and Development (R&D) menurut Borg & Gall (dalam Riska Septia Wahyuningtyas, 2020), yang merupakan suatu proses sistematis untuk memproduksi, mengembangkan, dan memvalidasi produk pendidikan atau teknologi yang dapat diterapkan secara praktis. Model ini melibatkan tahapan perencanaan, desain, pengembangan, uji coba, evaluasi, dan penyempurnaan produk hingga mencapai kriteria keefektifan, kualitas, dan standar tertentu.

2.1. Desain Sistem

Sistem yang dikembangkan merupakan sistem pembangkit listrik tenaga arus laut yang terintegrasi dengan sistem monitoring berbasis IoT. Sistem ini terdiri dari dua bagian utama: (1) sistem konversi energi, dan (2) sistem pemantauan real-time.

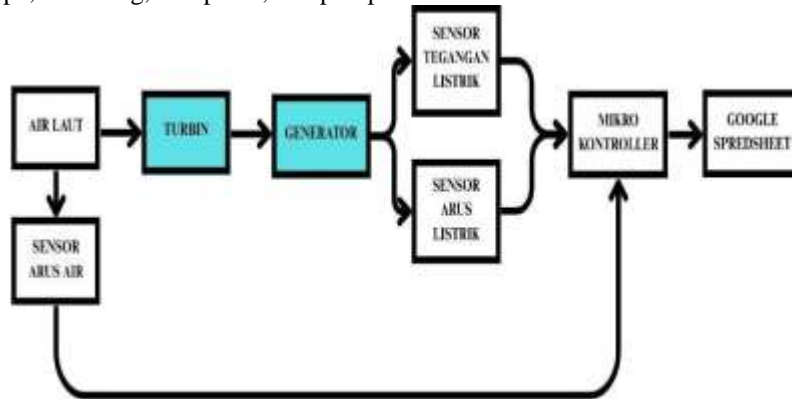
- **Komponen Utama Sistem**
 - a. Turbin Darrieus vertikal: Sebagai alat penangkap energi kinetik dari aliran air laut.
 - b. Generator DC permanen magnet 200 watt: Mengubah energi mekanik dari putaran turbin menjadi energi listrik searah (DC).
 - c. Baterai VRLA 12V: Menyimpan energi listrik yang dihasilkan untuk digunakan saat kebutuhan listrik meningkat atau aliran air berkurang.
 - d. MPPT 30A: Digunakan untuk mengoptimalkan pengisian baterai dengan menyesuaikan tegangan dan arus secara otomatis.
 - e. Mikrokontroler ESP32: Bertindak sebagai pusat pengendali sistem dan pengirim data melalui jaringan nirkabel.
 - f. Sensor-sensor:
 - Water Flow Meter (YF-S201): Mengukur kecepatan aliran air.
 - Sensor Tegangan DC (Voltage Divider): Memantau tegangan keluaran generator.
 - Sensor INA219: Mengukur arus dan daya listrik secara akurat.
 - g. LCD 20x4 I2C: Menampilkan data secara visual pada panel kontrol lokal.
 - h. Google Sheets: Digunakan sebagai platform pencatat data secara real-time melalui internet.

- **Arsitektur Sistem**

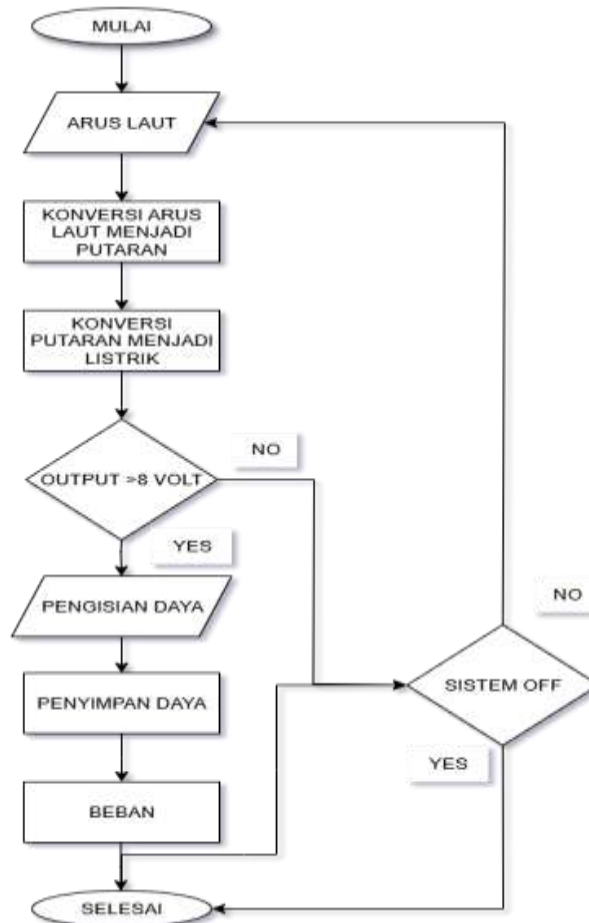
Sistem bekerja dengan prinsip bahwa arus laut menggerakkan turbin Darrieus, yang kemudian memutar generator untuk menghasilkan listrik. Listrik tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui MPPT. Sementara itu, sensor-sensor mengumpulkan data tentang kecepatan aliran air, tegangan, arus, dan daya listrik. Data tersebut dikirimkan ke mikrokontroler ESP32, diproses, dan dikirim secara nirkabel ke Google Sheets

melalui jaringan Wi-Fi. Integrasi IoT memungkinkan pemantauan performa sistem secara jarak jauh dan otomatis.

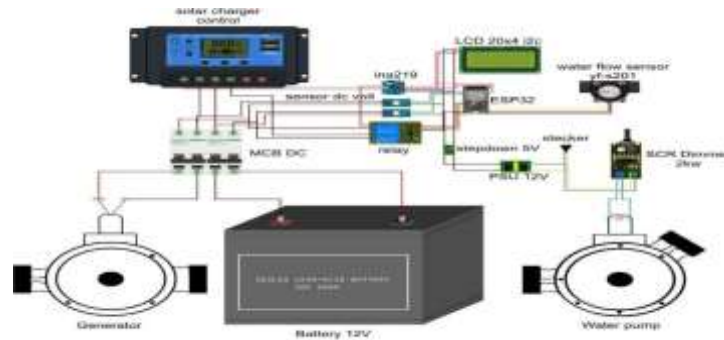
Desain sistem ditunjukkan dalam blok diagram (Gambar 1), flowchart (Gambar 2), dan wiring diagram (Gambar 3), serta dilengkapi dengan desain mekanik 3D (Gambar 4) yang mencakup dimensi komponen fisik seperti akrilik, pipa, mounting, box panel, dan pompa.



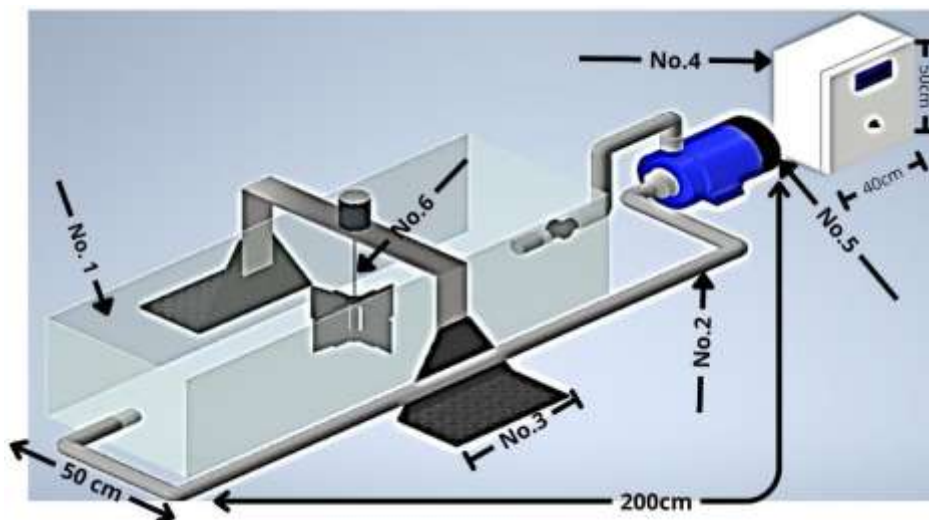
Gambar 1. Blok Diagram Perancangan Sistem
Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 2. Flowchart Alat
Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 3. Wiring Diagram Alat
Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 4. Desain Mekanik 3D
Sumber: Dokumen Pribadi

2.2. Perencanaan Alat

Perancangan alat dilakukan secara terstruktur melalui tahapan berikut:

1. Analisis Kebutuhan: Identifikasi kebutuhan energi dan kondisi lingkungan di lokasi potensial pemanfaatan arus laut.
2. Perancangan Mekanik dan Elektronik: Merancang struktur fisik sistem, termasuk turbin, housing, dan panel kontrol, serta menyusun rangkaian elektronik.
3. Pemilihan Komponen: Memilih komponen berdasarkan spesifikasi teknis dan ketersediaan.
4. Integrasi Sistem: Menghubungkan semua komponen secara fisik dan logis sesuai dengan blok diagram dan wiring diagram.
5. Pengkodean Mikrokontroler: Mengembangkan program pada ESP32 untuk membaca data sensor, mengolahnya, dan mengirimkannya ke Google Sheets.
6. Uji Coba dan Evaluasi: Melakukan serangkaian pengujian untuk memastikan kinerja optimal dan akurasi sistem.

2.3. Tahapan Pengembangan

Proses pengembangan dilakukan dalam beberapa tahap:

1. Tahap Perencanaan dan Analisis: Mengidentifikasi tujuan, kebutuhan, dan batasan teknis.
2. Tahap Desain: Merancang sistem secara keseluruhan, termasuk mekanik, elektronik, dan software.
3. Tahap Pembuatan Prototipe: Membuat prototipe alat berdasarkan rancangan.
4. Tahap Uji Coba: Melakukan pengujian statis dan dinamis.
5. Tahap Evaluasi dan Perbaikan: Menganalisis hasil pengujian dan melakukan modifikasi jika diperlukan.
6. Tahap Validasi: Mengonfirmasi bahwa sistem memenuhi kriteria keefektifan dan kualitas.

2.4. Prosedur Pengujian

Pengujian dilaksanakan di laboratorium Politeknik Pelayaran Surabaya, diluar jam kuliah, untuk memastikan konsistensi dan ketepatan waktu. Pengujian dibagi menjadi dua tahap:

a. Uji Statis

Tujuan uji statis adalah memverifikasi fungsi masing-masing komponen secara terpisah. Setiap komponen diuji berdasarkan spesifikasi teknis, antara lain:

- Fungsi sensor tegangan, arus, dan aliran air.
- Kinerja mikrokontroler dalam membaca dan mengirim data.
- Keandalan koneksi antar komponen.

b. Uji Dinamis

Uji dinamis dilakukan setelah semua komponen terintegrasi. Tujuannya adalah mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan. Uji ini mencakup:

- Simulasi aliran air menggunakan pompa AC 220 volt.
- Pengaturan kecepatan aliran air (beragam tingkat kecepatan).
- Pengambilan data dari sensor secara real-time selama 30 kali percobaan.
- Pemantauan efisiensi sistem terhadap variasi sudut blade turbin.
- Validasi akurasi data yang dikirim ke Google Sheets.

Hasil pengujian direkam dalam tabel dan dianalisis untuk menentukan efisiensi konversi energi, stabilitas sistem, dan akurasi pengukuran.

2.5. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

- Pengukuran langsung oleh sensor-sensor (YF-S201, INA219, Voltage Divider).
- Pemantauan otomatis melalui ESP32 dan Google Sheets.
- Observasi visual melalui LCD 20x4 I2C.
- Catatan manual selama proses pengujian untuk mendokumentasikan anomali atau gangguan.

2.6. Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi:

- Efisiensi konversi energi kinetik ke listrik.
- Akurasi pengukuran sensor.
- Performa sistem dalam kondisi berbeda (kecepatan aliran air, sudut blade).
- Keandalan transmisi data melalui IoT.

Analisis dilakukan dengan metode statistik deskriptif (rata-rata, deviasi standar) dan perbandingan antar kondisi pengujian.

3. Hasil dan Diskusi

Selanjutnya adalah pembahasan tentang hasil pengujian alat yang telah dilakukan serta analisis terhadap data yang diperoleh selama proses uji coba. Pengujian dilakukan melalui dua tahap utama, yaitu uji statis dan uji dinamis, untuk memastikan kinerja setiap komponen secara individual maupun sebagai sistem terintegrasi. Selain itu, dilakukan pula analisis terhadap efektivitas sistem pembangkit listrik tenaga arus laut berbasis IoT, khususnya dalam hal konversi energi dan pemantauan real-time.

3.1. Hasil Uji Statis

Uji statis bertujuan untuk memverifikasi fungsi masing-masing komponen sebelum integrasi sistem secara keseluruhan. Hasil uji menunjukkan bahwa semua komponen bekerja sesuai dengan spesifikasi teknis dan dapat diandalkan untuk operasi selanjutnya.

1. Pengujian Putar Sudut Turbin

Pengujian ini dilakukan untuk mengatur sudut blade turbin Darrieus agar dapat diuji pada berbagai kemiringan (45°, 90°, dan 0°). Dari hasil pengamatan, mekanisme penyetel sudut berfungsi dengan baik, memungkinkan perubahan sudut secara presisi. Hal ini penting untuk mengevaluasi dampak sudut blade terhadap efisiensi konversi energi.

2. Pengujian Generator DC 12 Volt

Generator DC 200 watt berhasil menghasilkan tegangan dan arus sesuai ekspektasi saat diputar oleh turbin. Data dari Tabel 4.1 menunjukkan bahwa tegangan output berkisar antara 11.7 V hingga 12.3 V, dengan arus sekitar 0.47–0.56 A, menghasilkan daya rata-rata sekitar 6.0 W pada kecepatan putaran 300–335 RPM. Nilai ini mendekati spesifikasi generator, menunjukkan bahwa komponen ini berfungsi optimal.

Tabel 1. Uji Statis Generator DC 12 Volt

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Putaran (RPM)	Date	Lokasi
1.	12.1	0.52	6.29	320	27/06/2025	Poltektep Surabaja
2.	11.9	0.50	5.95	310	27/06/2025	Poltektep Surabaja
3.	12.0	0.51	6.12	315	27/06/2025	Poltektep Surabaja
4.	11.8	0.49	5.78	305	27/06/2025	Poltektep Surabaja
5.	12.2	0.53	6.47	325	27/06/2025	Poltektep Surabaja
6.	12.1	0.51	6.17	318	27/06/2025	Poltektep Surabaja
7.	11.9	0.48	5.71	310	27/06/2025	Poltektep Surabaja
8.	12.0	0.50	6.00	312	27/06/2025	Poltektep Surabaja
9.	12.3	0.54	6.64	330	27/06/2025	Poltektep Surabaja
10.	12.1	0.53	6.41	326	27/06/2025	Poltektep Surabaja
11.	11.7	0.47	5.50	300	28/06/2025	Poltektep Surabaja
12.	12.0	0.51	6.12	318	28/06/2025	Poltektep Surabaja
13.	11.8	0.49	5.78	306	28/06/2025	Poltektep Surabaja
14.	12.2	0.52	6.34	322	28/06/2025	Poltektep Surabaja
15.	12.0	0.50	6.00	315	28/06/2025	Poltektep Surabaja
16.	11.9	0.48	5.71	309	28/06/2025	Poltektep Surabaja
17.	12.3	0.55	6.77	333	28/06/2025	Poltektep Surabaja
18.	12.1	0.53	6.41	327	28/06/2025	Poltektep Surabaja
19.	11.8	0.48	5.66	307	28/06/2025	Poltektep Surabaja
20.	12.0	0.52	6.24	316	28/06/2025	Poltektep Surabaja
21.	12.2	0.54	6.59	328	29/06/2025	Poltektep Surabaja
22.	11.9	0.49	5.83	308	29/06/2025	Poltektep Surabaja
23.	12.1	0.50	6.05	319	29/06/2025	Poltektep Surabaja
24.	11.8	0.47	5.55	305	29/06/2025	Poltektep Surabaja
25.	12.3	0.56	6.89	335	29/06/2025	Poltektep Surabaja
26.	12.0	0.51	6.12	317	29/06/2025	Poltektep Surabaja
27.	12.2	0.53	6.47	324	29/06/2025	Poltektep Surabaja
28.	11.9	0.50	5.95	311	29/06/2025	Poltektep Surabaja
29.	12.1	0.52	6.29	320	29/06/2025	Poltektep Surabaja
30.	12.0	0.50	6.00	315	29/06/2025	Poltektep Surabaja

3. Pengujian Modul ESP32

Modul mikrokontroler ESP32 diuji untuk memastikan stabilitas booting, koneksi Wi-Fi, dan konsumsi daya. Dari 30 kali pengujian (Tabel 4.2), tercatat 26 kali berhasil booting dan terhubung ke jaringan, sedangkan 4 kali gagal karena gangguan sinyal atau reset spontan. Kondisi ini masih dapat diterima, terutama karena penggunaan modul ESP32 dalam lingkungan laboratorium dengan interferensi minimal. Konsumsi arus stabil di kisaran 114–122 mA, dengan tegangan keluaran 3.28–3.32 V, menunjukkan efisiensi tinggi.

4. Pengujian MCB dan MPPT

MCB dan MPPT diuji dalam kondisi non-operasional (tanpa beban penuh) untuk memastikan keamanan dan kesiapan sistem. Hasil menunjukkan bahwa MCB responsif terhadap lonjakan arus, sedangkan MPPT mampu menyesuaikan tegangan dan arus secara otomatis saat terhubung ke baterai, menunjukkan fungsionalitas yang baik.

5. Pengujian Akses Google Spreadsheet

ESP32 berhasil terhubung ke Google Sheets dan mengirimkan data secara real-time melalui API. Gambar 4.5 menunjukkan log data di serial monitor yang mencatat waktu, nilai sensor, dan status koneksi. Ini membuktikan bahwa sistem monitoring IoT berfungsi dengan baik.

6. Pengujian Sensor DC Volt

Sensor DC volt (modul voltage divider) diuji dengan input tegangan dari 2 V hingga 12 V. Hasil pengujian (Tabel 4.3) menunjukkan kesalahan relatif maksimal 2.5% pada tegangan rendah (2 V), dan rata-rata error 0.8% untuk rentang 5–12 V. Error ini dikategorikan cukup akurat untuk aplikasi monitoring energi.

7. Pengujian Sensor INA219

Sensor INA219 digunakan untuk mengukur arus dan daya. Dari Tabel 4.4, nilai error arus rata-rata sekitar 1.8%, dengan nilai maksimal 3.5%. Kesalahan terjadi pada rentang arus rendah (<100 mA), tetapi meningkatkan akurasi dengan kalibrasi tambahan. Sensor ini mampu mendeteksi perubahan arus secara real-time, menjadikannya sangat efektif untuk pemantauan sistem.

8. Pengujian Step Down

Modul step-down berhasil menurunkan tegangan dari 12 V menjadi 5 V dengan efisiensi tinggi. Output stabil di sekitar $5.00\text{ V} \pm 0.05\text{ V}$, memenuhi kebutuhan ESP32 dan komponen lainnya.

9. Pengujian LCD I2C 20x4

LCD berhasil menampilkan teks "Rancang Bangun Monitoring Turbin Darrieus" secara jelas dan stabil. Ini menunjukkan bahwa komunikasi I2C antara ESP32 dan LCD berjalan lancar.

10. Pengujian Flow Meter YF-S201

Sensor flow meter mampu mendeteksi laju aliran air dengan akurasi cukup baik. Pada pengujian dengan aliran 26–27 L/min, sensor menghasilkan pulsa yang sesuai dengan rumus $Flow\ rate = (Pulse \times 60) / 7.5$. Hasilnya dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan gelas ukur, menunjukkan selisih maksimal 5%, yang masih dalam batas toleransi untuk aplikasi ini.

3.2. Hasil Uji Dinamis

Uji dinamis dilakukan setelah semua komponen terintegrasi, dengan simulasi aliran air menggunakan pompa AC. Tujuan utama adalah menguji kinerja sistem secara keseluruhan, termasuk konversi energi dan pemantauan real-time.

1. Pengujian Google Spreadsheet

Data dari sensor-sensor dikirim secara otomatis ke Google Sheets melalui ESP32. Gambar 4.12 menunjukkan bahwa data seperti waktu, tegangan baterai, tegangan input, arus input, dan laju aliran (flowrate) direkam secara real-time. Perubahan nilai flowrate dari 0 L/min menjadi 26–27 L/min menunjukkan respons cepat dari sistem terhadap aktivasi pompa. Fitur ini memungkinkan pemantauan jarak jauh tanpa perlu hadir langsung di lokasi.

2. Pengujian Keseluruhan Sistem

Sistem diuji dengan tiga variasi sudut blade: 45°, 90°, dan 0°. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan signifikan dalam output daya dan RPM, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6, 4.7, dan 4.8.

Tabel 4.6 Uji Sudut Blade 45°

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	RPM	Date	Lokasi
1.	2.25	1.30	2.925	140	15/07/2025	Poltekel Surabaya
2.	2.18	1.28	2.790	133	15/07/2025	Poltekel Surabaya
3.	3.30	1.33	4.389	195	15/07/2025	Poltekel Surabaya
4.	3.10	1.25	3.875	185	15/07/2025	Poltekel Surabaya
5.	2.22	1.29	2.864	137	15/07/2025	Poltekel Surabaya
6.	3.27	1.31	4.284	104	15/07/2025	Poltekel Surabaya
7.	2.15	1.26	2.709	129	15/07/2025	Poltekel Surabaya
8.	3.35	1.34	4.489	197	15/07/2025	Poltekel Surabaya
9.	2.28	1.32	3.010	144	15/07/2025	Poltekel Surabaya
10.	3.20	1.27	4.064	194	16/07/2025	Poltekel Surabaya
11.	1.33	1.33	1.769	84	16/07/2025	Poltekel Surabaya
12.	2.19	1.28	2.803	134	16/07/2025	Poltekel Surabaya
13.	3.25	1.30	4.225	192	16/07/2025	Poltekel Surabaya
14.	2.16	1.27	2.743	131	16/07/2025	Poltekel Surabaya
15.	2.29	1.31	3.000	143	16/07/2025	Poltekel Surabaya
16.	2.21	1.29	2.851	136	16/07/2025	Poltekel Surabaya
17.	3.30	1.32	4.356	194	16/07/2025	Poltekel Surabaya
18.	3.12	1.25	3.900	186	16/07/2025	Poltekel Surabaya

19.	2.26	1.30	2.938	140	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
20.	2.22	1.28	2.842	136	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
21.	3.31	1.33	4.402	196	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
22.	3.14	1.26	3.956	189	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
23.	2.18	1.27	2.769	132	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
24.	2.34	1.34	3.136	150	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
25.	2.25	1.30	2.925	140	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
26.	3.20	1.28	4.096	196	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
27.	2.28	1.32	3.010	144	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
28.	2.16	1.25	2.700	129	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
29.	3.29	1.31	4.310	191	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
30.	3.23	1.29	4.167	189	18/07/2025	Poltekpel Surabaya

Sumber: Dokumen pribadi

Tabel 4.7 Uji Sudut Blade 90°

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	RPM	Date	Lokasi
1.	5.85	1.82	10.647	339	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
2.	5.12	1.86	9.523	303	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
3.	5.90	1.80	10.620	340	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
4.	5.05	1.85	9.342	297	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
5.	5.97	1.83	10.925	348	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
6.	6.08	1.84	11.187	356	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
7.	5.00	1.85	9.250	294	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
8.	5.88	1.81	10.643	339	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
9.	5.14	1.86	9.560	304	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
10.	6.93	1.82	12.613	396	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
11.	5.11	1.85	9.454	301	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
12.	5.96	1.83	10.907	347	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
13.	5.04	1.84	9.274	295	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
14.	6.91	1.80	12.438	396	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
15.	6.07	1.86	11.290	389	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
16.	5.89	1.82	10.720	341	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
17.	5.13	1.85	9.491	302	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
18.	5.94	1.83	10.870	346	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
19.	5.10	1.86	9.486	302	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
20.	5.92	1.81	10.715	341	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
21.	5.06	1.84	9.310	296	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
22.	5.95	1.82	10.829	344	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
23.	6.09	1.85	11.267	359	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
24.	4.87	1.80	8.766	279	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
25.	5.02	1.83	9.187	293	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
26.	5.98	1.82	10.884	347	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
27.	6.03	1.84	11.095	353	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
28.	5.86	1.81	10.607	337	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
29.	6.00	1.85	11.100	353	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
30.	5.99	1.83	10.962	349	18/07/2025	Poltekpel Surabaya

Sumber: Dokumen pribadi

Tabel 4.8 Uji Sudut Blade 0°

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	RPM	Date	Lokasi
1.	1.25	0.48	0.600	115	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
2.	2.40	0.51	1.224	234	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
3.	1.15	0.46	0.529	101	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
4.	1.28	0.47	0.602	115	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
5.	2.36	0.50	1.0	225	15/07/2025	Poltekpel Surabaya

6.	1.22	0.48	0.586	112	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
7.	1.18	0.45	0.531	101	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
8.	1.31	0.49	0.642	123	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
9.	0.30	0.48	0.144	27	15/07/2025	Poltekpel Surabaya
10.	1.26	0.47	0.592	113	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
11.	1.17	0.45	0.526	100	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
12.	1.29	0.48	0.619	118	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
13.	2.34	0.50	1.170	223	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
14.	0.19	0.46	0.087	17	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
15.	1.24	0.47	0.583	111	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
16.	1.20	0.45	0.540	103	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
17.	1.35	0.49	0.661	126	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
18.	1.23	0.47	0.578	110	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
19.	1.16	0.46	0.534	102	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
20.	2.37	0.50	1.185	226	16/07/2025	Poltekpel Surabaya
21.	1.21	0.45	0.544	104	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
22.	1.33	0.49	0.652	125	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
23.	1.28	0.48	0.614	117	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
24.	2.30	0.49	1.127	215	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
25.	1.27	0.47	0.597	114	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
26.	1.32	0.49	0.647	124	17/07/2025	Poltekpel Surabaya
27.	1.18	0.45	0.531	101	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
28.	1.36	0.50	0.680	130	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
29.	1.19	0.46	0.547	105	18/07/2025	Poltekpel Surabaya
30.	1.22	0.47	0.573	109	18/07/2025	Poltekpel Surabaya

Sumber: Dokumen pribadi

Analisis Data Berdasarkan Sudut Blade

Tabel 4.9 Tabel Hasil Data Masing-Masing Sudut *Blade*

Sudut <i>Blade</i>	Tegangan Rata-Rata	Daya Rata-Rata	RPM Rata-Rata
45°	2,76	3,21	150.1
90°	5.87	10,4	335.7
0°	1.27	0,59	117.9

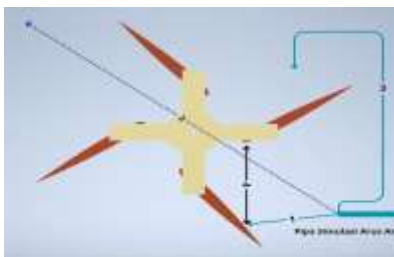
Sumber: Dokumen pribadi

Dari tabel di atas, sudut 90° menghasilkan performa terbaik, dengan daya rata-rata 10.4 W dan RPM 335.7, sedangkan sudut 0° hanya menghasilkan 0.59 W dan RPM 117.9. Rasio antara daya maksimum dan minimum adalah:

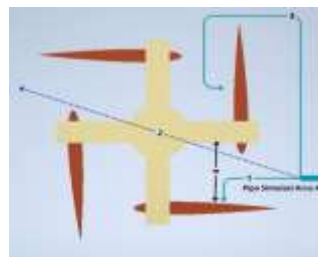
$$\frac{0.59}{10.4} \approx 17.6$$

Hal ini menunjukkan bahwa perubahan sudut blade memiliki dampak besar terhadap efisiensi sistem.

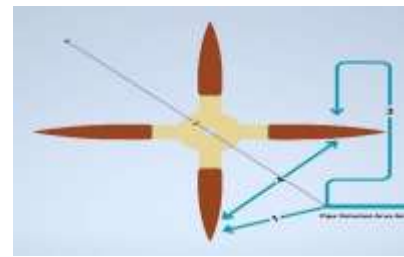
3. Analisis Fisik dan Aerodinamika Turbin



(a) 90°



(b) 45°



(c) 0°

Gambar 5. Analisa Turbin Kemiringan 90°, 45° dan 0°

Gambar 5. menunjukkan analisis visual terhadap aliran air dan celah antar blade. Pada sudut 90°, celah antar blade lebih sempit dibandingkan sudut 45° dan 0°, sehingga aliran air lebih efektif menabrak blade dan menghasilkan momen putar yang lebih besar. Sedangkan pada sudut 0°, blade hampir sejajar dengan arus, menyebabkan gaya dorong minimal dan banyak energi hilang melalui celah lebar antar blade.

- Sudut 90°: Blade menangkap energi kinetik secara maksimal karena orientasi tegak lurus terhadap aliran air → efisiensi tinggi.
- Sudut 45°: Energi tangkap lebih rendah karena komponen gaya dorong tidak maksimal.
- Sudut 0°: Hanya terjadi gesekan, tidak ada gaya dorong → output sangat rendah.

3.3 Diskusi

1. Efektivitas Konversi Energi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengubah energi kinetik arus air menjadi energi listrik secara efektif, terutama pada sudut blade 90°. Peningkatan daya dari 0.59 W (0°) menjadi 10.4 W (90°) menunjukkan bahwa desain sudut blade merupakan faktor kunci dalam efisiensi turbin Darrieus.

2. Akurasi Sensor dan Sistem Monitoring

Semua sensor (DC volt, INA219, flow meter) menunjukkan akurasi yang cukup tinggi, dengan error <3% untuk kebanyakan kondisi. Integrasi dengan ESP32 dan Google Sheets memungkinkan pemantauan real-time yang andal, memberikan solusi praktis bagi masyarakat pesisir untuk memantau kinerja pembangkit listrik secara jarak jauh.

3. Keandalan Komponen Elektronik

ESP32 menunjukkan keandalan yang baik, meskipun terjadi beberapa kegagalan booting (13.3%) akibat gangguan sinyal. Namun, dengan penggunaan shield anti-interferensi dan penyimpanan data lokal (misalnya SD card), sistem dapat ditingkatkan keandalannya.

4. Potensi Penerapan

Sistem ini layak untuk diterapkan di daerah pesisir dengan arus laut yang stabil. Dengan pengembangan lebih lanjut, seperti penggunaan turbin berukuran lebih besar dan sistem penyimpanan energi yang lebih kapasitas, sistem ini dapat menjadi solusi energi terbarukan yang berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa prototipe turbin Darrieus mampu menghasilkan energi listrik dari aliran arus laut buatan, meskipun kinerjanya sangat bergantung pada parameter tertentu, terutama sudut kemiringan blade. Sudut blade terbukti sangat berpengaruh terhadap performa sistem, di mana konfigurasi sudut 90° menghasilkan daya keluaran tertinggi dengan rata-rata 10,4 watt, menjadikannya konfigurasi paling optimal dalam prototipe ini. Meskipun efisiensi tertinggi terjadi pada sudut 0°, daya yang dihasilkan relatif rendah sehingga kurang ideal untuk aplikasi praktis. Generator DC yang digunakan mampu mengkonversi energi mekanik dari putaran turbin menjadi energi listrik yang kemudian disimpan dalam baterai, namun proses transfer energi masih mengalami kehilangan daya yang perlu dioptimalkan. Sistem monitoring yang dirancang menggunakan sensor tegangan DC, INA219 untuk pengukuran arus, serta flow meter YF-S201 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 telah berhasil diimplementasikan dengan baik dan mampu mengirimkan data secara real-time ke Google Spreadsheet, menunjukkan konektivitas dan kestabilan sistem dalam mencatat data secara akurat. Pengukuran tegangan, arus, dan laju aliran air (flowrate) menunjukkan hasil yang konsisten antara pembacaan sensor dan verifikasi manual, dengan flow meter YF-S201 terbukti responsif terhadap perubahan volume aliran air pada kisaran 18–27 liter/menit. Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin Darrieus tidak cocok untuk diterapkan di Selat Madura karena arus laut di lokasi tersebut terlalu lemah untuk mampu memutar turbin dan menghasilkan tegangan atau daya yang signifikan, sehingga memerlukan pertimbangan ulang dalam pemilihan lokasi atau jenis turbin yang lebih sesuai dengan kondisi arus rendah.

Referensi

1. Anwar Saputro, A., Zainul Hidayah, Program Studi Ilmu Kelautan, Ilmu Kelautan dan Perikanan, J., Pertanian, F., Trunojoyo Madura, U., & Raya Telang, J. (2021). *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Pertanian, Perikanan dan Kelautan 2021*. Hotel Dafam Pacific Caesar Surabaya. <https://tanahair.indonesia>. Diakses pada tanggal 15 Desember 2024.

2. Ardhi, S., Putera Gunawan, T., Tjandra, S., & Dewi, G. L. (2023). *Penerapan metode regresi linear dalam pengembangan pengukuran aliran air pada sensor YF-S201* (Vol. 26, Issue 1). <http://univ45sby.ac.id/ejournal/index.php/industri/index>. Diakses pada tanggal 15 Desember 2024.
3. Arya Nendra Nico, & Eko Yohanes. (2023). *Analisa kinerja kincir air tipe undershot skala pikohidro menggunakan sudu NACA 6414 dengan variasi jumlah sudu 5, 7, dan 9*. https://eprints.itn.ac.id/10951/9/1911079_JURNAL.pdf.
4. Dumatubun, I. A. P. P., Widodo Setiyo Pranowo, Aida Sartimbul, Johar Setiyadi, Syarifah Hikmah Julinda Sari, & Fahreza Okta Setyawan. (2025). Karakteristik arus permukaan laut pada Selat Madura. *Jurnal Chart Datum*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v10i1.325>.
5. Effendi, R., Siswanto, R., Studi Teknik Mesin, P., Akhmad Yani Km, J., & Selatan, K. (2019). *Proses manufaktur turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus* (Vol. 01, Issue 02). file:///D:/JUNAL%20JURNAL/1742-3019-1-SM.pdf.
6. Hidayah, R., Pramaditya, A., & Nurhasanah, F. (2020). *Rancangan pembangkit listrik tenaga arus laut berbasis Marine Cadaster di Selat Madura*. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 8(3), 112–120.
7. Hidayah, Z., Nuzula, N. I., & Wiyanto, D. B. (2020). Analisa keberlanjutan pengelolaan sumber daya perikanan di perairan Selat Madura Jawa Timur. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 22(2), 101. <https://doi.org/10.22146/jfs.53099>.
8. Husain Firman, & Widianingrum Windi. (2021). *Pemanfaatan energi arus laut pada Teluk Awerange*. file:///D:/JUNAL%20JURNAL/PEMANFAATAN%20ENERGI%20ARUS%20LAUT%20PADA%20TELUK%20AWERANGE.pdf. Diakses pada tanggal 24 Februari 2025.
9. Imran, A., & Rasul, M. (2020). *Pengembangan tempat sampah pintar menggunakan ESP32* (Vol. 17, Issue 2). Diakses pada tanggal 15 Desember 2024.
10. Kaware, D., Tumbelaka, H. H., & Santoso, M. (2018). *Analisa efisiensi penggunaan MPPT pada solar cell*. file:///C:/Users/SINDU/Downloads/ekakwulandari,+FE1051+276-280.pdf.
11. Kurniawan, T. A. (2018). *Studi awal desain turbin arus laut untuk pemanfaatan energi terbarukan di perairan Indonesia*. *Jurnal Teknik ITS*, 7(1), 2337–5312.
12. Pramaditya, A. (2019). *Analisis potensi arus pasang surut sebagai sumber tenaga listrik di Selat Madura*. [Skripsi, Universitas Diponegoro]. Repository Universitas Diponegoro.
13. Rafi, I., Setiawan, B., & Sutrisno, T. (2021). *Perancangan turbin Darrieus sumbu vertikal untuk pembangkit listrik tenaga arus laut*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 89–97.
14. Rafi, R., Ronaldo, A., & Muhammad Mukti Asyidiqi, dan. (2021). *Studi eksperimen model water flow deflector untuk meningkatkan performa turbin arus laut tipe vertikal pada kecepatan arus rendah*. *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(2). file:///D:/JUNAL%20JURNAL/STUDI%20JENIS%20BLADE.pdf.
15. Riska Septia Wahyuningtyas, F. N. S. (2020). *Pengembangan modul pembelajaran berbasis kearifan lokal*. Diakses pada tanggal 5 Februari 2025.
16. Suriana, W., Gede, I., Setiawan, A., Made, I., & Graha, S. (2021). *Rancang bangun sistem pengaman kotak dana punia berbasis mikrokontroler NodeMCU ESP32 dan aplikasi Telegram* (Vol. 4, Issue 2). file:///D:/JUNAL%20JURNAL/3198-Article%20Text-8208-3-10-20220106.pdf.
17. Tri Monda, H., & Santi Rudati, P. (n.d.). *Sistem pengukuran daya pada sensor node wireless sensor network*. Diakses pada tanggal 3 Maret 2025.
18. Wahyudi, A. (2021). *Kajian potensi arus laut sebagai energi alternatif di Selat Madura*. *Jurnal Ilmiah Teknik Energi*, 10(1), 45–52.