

BAB I

LATAR BELAKANG PROYEK

1.2 Pengantar

1.1 Ringkasan Isi Dokumen

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam mendukung berbagai sektor kehidupan masyarakat modern, baik di bidang ekonomi, sosial, maupun industri. Seiring dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan populasi, kebutuhan akan energi listrik terus meningkat secara signifikan. Sementara itu, ketersediaan sumber daya energi fosil yang selama ini menjadi andalan pembangkit listrik semakin terbatas dan menimbulkan berbagai masalah lingkungan seperti pemanasan global dan polusi udara. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik.

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi angin. Indonesia, sebagai negara kepulauan yang memiliki garis pantai yang panjang, memiliki potensi besar dalam memanfaatkan angin sebagai sumber energi. Area pesisir pantai, terutama yang memiliki kondisi angin yang konsisten dan kuat, sangat cocok untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Namun, pemanfaatan energi angin di Indonesia masih tergolong rendah dibandingkan dengan negara-negara lain, sehingga diperlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut terkait potensi dan implementasi teknologi ini.

Pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik berbasis energi angin menjadi langkah penting untuk memahami karakteristik dan kinerja pembangkit listrik tenaga angin, khususnya di wilayah pesisir pantai. Dengan pemodelan yang baik, dapat dilakukan perencanaan yang lebih efektif terkait desain turbin angin, penempatan yang optimal, dan integrasi sistem tenaga angin dengan jaringan distribusi listrik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik berbasis energi angin di wilayah pesisir pantai. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia serta memberikan solusi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara berkelanjutan.

1.2 Tujuan Penulisan dan Aplikasi

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Melakukan pemodelan sistem tenaga listrik berbasis energi angin di wilayah pesisir pantai
2. Melakukan simulasi kinerja turbin angin pada berbagai kondisi angin di wilayah pesisir.
3. Menganalisis potensi energi angin di wilayah pesisir pantai untuk pembangkit listrik.

1.3 Proposal

1.3.1 Masalah

Keterbatasan akses listrik di daerah pesisir dan terpencil di Indonesia masih menjadi masalah signifikan, terutama bagi masyarakat nelayan yang bergantung pada energi untuk berbagai aktivitas ekonomi dan kehidupan sehari-hari. Banyak desa nelayan yang belum terjangkau jaringan listrik PLN, sehingga mereka mengandalkan genset berbahan bakar fosil untuk kebutuhan energi. Penggunaan genset ini menyebabkan biaya operasional yang tinggi, tidak efisien, dan berdampak buruk terhadap lingkungan. Di sisi lain, pengembangan infrastruktur listrik konvensional di daerah pesisir sulit dilakukan karena tantangan geografis yang ada, yang mengharuskan pencarian solusi energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.^[5]

Wilayah pesisir Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar, terutama di daerah dengan kecepatan angin yang stabil sepanjang tahun. Namun, pemanfaatan energi angin sebagai sumber pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) masih sangat terbatas, meskipun teknologi ini memiliki potensi untuk menjadi solusi alternatif yang ramah lingkungan dan efisien. Mengoptimalkan energi angin dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, memberikan akses listrik yang lebih merata, dan mendukung aktivitas ekonomi lokal, seperti pendinginan hasil tangkapan ikan dan penerangan, yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat nelayan untuk meningkatkan kesejahteraan mereka.^[6]

1.3.2 Latar belakang masalah

Penerangan Jalan Umum (PJU) Energi Angin di Pesisir Pantai merupakan inovasi dalam upaya menyediakan pencahayaan yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Di bawah ini adalah beberapa latar belakang masalah yang mendorong pengembangan dan implementasi teknologi ini.

Krisis energi ketergantungan pada bahan bakar fosil menyebabkan krisis energi global dan harga listrik yang fluktuatif. Energi terbarukan, seperti angin, menawarkan solusi yang berkelanjutan dan stabilitas harga dalam jangka panjang. Dampak lingkungan, emisi gas rumah kaca dari pembangkit listrik berbasis fosil berkontribusi pada perubahan iklim. Penggunaan energi angin sebagai sumber daya mengurangi emisi karbon dan mendukung tujuan keberlanjutan lingkungan.

Keselamatan dan keamanan publik, kurangnya penerangan yang memadai di jalan pesisir meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas pada malam hari. PJU yang efisien dan terang dapat mengurangi kecelakaan dan meningkatkan keselamatan pengendara dan pejalan kaki. Pengurangan kejahatan, area yang kurang pencahayaan sering menjadi tempat rawan kejahatan. Penerangan yang baik dapat meningkatkan keamanan lingkungan dan kenyamanan masyarakat.

Optimalisasi potensi energi lokal, potensi energi angin di pesisir, daerah pesisir memiliki potensi energi angin yang tinggi dan melimpah. Pemanfaatan energi angin di daerah ini lebih efisien dan ekonomis dibandingkan dengan sumber energi lainnya.

Tantangan infrastruktur, keterbatasan jaringan listrik di beberapa daerah pesisir terpencil sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional. PJU berbasis energi angin dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik utama.

Manfaat ekonomi dan sosial, penghematan biaya yang menggunakan energi terbarukan dapat mengurangi biaya operasional jangka panjang dibandingkan dengan sumber energi fosil. Investasi awal yang tinggi dapat diimbangi dengan pengurangan biaya listrik dan perawatan.

Peningkatan kualitas hidup, penerangan yang memadai meningkatkan kualitas hidup masyarakat dengan menyediakan lingkungan yang aman dan nyaman. Meningkatkan daya tarik wisata di daerah pesisir yang memiliki penerangan baik.

1.3.3 Informasi Pendukung

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan salah satu elemen penting dalam menciptakan lingkungan jalan yang aman dan nyaman, terutama di malam hari. Berikut adalah beberapa informasi pendukung mengenai PJU, termasuk data dan fakta yang mendukung permasalahan serta solusi yang dapat diterapkan.

Data dan fakta keselamatan dan Keamanan PJU membantu meningkatkan visibilitas jalan, sehingga mengurangi risiko kecelakaan lalu lintas dan kejahatan. Efisiensi energi penggunaan lampu LED dalam PJU dapat mengurangi konsumsi energi dan biaya operasional karena efisiensi energi yang tinggi. Pemeliharaan Lampu PJU yang mudah dipelihara dan memiliki umur panjang dapat mengurangi biaya perawatan dan penggantian. Kualitas Penerangan Lampu PJU harus menghasilkan cahaya yang cukup untuk menerangi area yang luas tanpa menciptakan bayangan yang mengganggu.

Solusi yang diberikan penggunaan lampu LED mengganti lampu konvensional dengan lampu LED yang lebih efisien dan tahan lama. Pemeliharaan rutin untuk memastikan lampu PJU berfungsi dengan baik. Menggunakan e-katalog untuk pengadaan lampu PJU yang efisien dan berkualitas. Menempatkan lampu PJU di lokasi yang strategis untuk memaksimalkan penerangan.

1.3.4 Analisis Masalah

Penerangan Jalan Umum (PJU) di daerah pesisir pantai menghadapi tantangan signifikan terkait penyediaan energi yang efisien dan berkelanjutan. Penggunaan energi terbarukan, khususnya dari sumber energi angin dan matahari, menjadi solusi yang menarik untuk memenuhi kebutuhan ini. Berikut adalah analisis mendalam mengenai masalah dan potensi penerapan sistem PJU berbasis energi angin di pesisir pantai.

Daerah pesisir, seperti Kota Tarakan di Kalimantan Utara, memiliki potensi yang sangat baik untuk pengembangan energi terbarukan. Dengan kecepatan angin rata-rata mencapai 5,1 m/s dan tingkat penyinaran matahari yang tinggi (sekitar 70%), daerah ini ideal untuk memanfaatkan kedua sumber energi tersebut. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat memberikan solusi yang efisien dalam penyediaan listrik untuk PJU ^[1].

Keunggulan Sistem Hybrid yang menggabungkan energi angin dan matahari menawarkan beberapa keunggulan. Ketersediaan energi angin dapat berfungsi sebagai sumber listrik pada malam hari ketika panel surya tidak dapat beroperasi. Ini memastikan kontinuitas dalam penerangan jalan ^[5].

Pengurangan biaya operasional dapat memanfaatkan sumber energi lokal, biaya operasional dapat ditekan dibandingkan dengan sistem yang bergantung sepenuhnya pada jaringan listrik konvensional. Keberlanjutan pada penggunaan energi terbarukan

mendukung upaya pengurangan emisi karbon dan mempromosikan keberlanjutan lingkungan [2].

Tantangan implementasi ini ada banyak keuntungan, terdapat beberapa tantangan dalam penerapan sistem PJU berbasis energi angin. Biaya awal yang tinggi Investasi awal untuk instalasi turbin angin dan panel surya masih relatif tinggi, meskipun analisis ekonomi menunjukkan bahwa proyek ini layak secara finansial dengan nilai Benefit Cost Ratio (BCR) lebih dari [4].

Keterbatasan teknologi yang ada saat ini mungkin belum sepenuhnya optimal untuk kondisi spesifik di daerah pesisir, seperti ketahanan terhadap korosi akibat lingkungan laut. Perawatan dan pemeliharaan sistem hybrid memerlukan pemeliharaan rutin untuk memastikan efisiensi operasional, yang bisa menjadi tantangan di lokasi terpencil.

Untuk mengatasi masalah ini, beberapa langkah rekomendasi dapat diterapkan studi kelayakan mendalam. Melakukan studi kelayakan lebih lanjut untuk mengevaluasi potensi spesifik dari setiap lokasi penerangan jalan umum. Kolaborasi dengan institusi penelitian menggandeng universitas dan lembaga penelitian untuk mengembangkan teknologi yang lebih efisien dan tahan lama. Program penyuluhan masyarakat meningkatkan kesadaran masyarakat tentang manfaat penggunaan energi terbarukan untuk mendorong dukungan terhadap proyek-proyek ini.

1.3.5 Konstrain Ekonomi

Konstrain ekonomi pada penerangan jalan umum berbasis energi angin di pesisir pantai meliputi biaya investasi awal yang tinggi, biaya operasional dan pemeliharaan yang signifikan, serta variabilitas sumber energi yang mempengaruhi ketersediaan listrik. Meskipun analisis ekonomi menunjukkan kelayakan proyek ini, dukungan kebijakan dan insentif dari pemerintah sangat diperlukan untuk mendorong implementasi yang lebih luas dan berkelanjutan.

1.3.6 Konstrain Manufakturabilitas (manufacturability)

Konstrain manufakturabilitas pada PJU berbasis energi angin di pesisir pantai meliputi kompleksitas proses produksi, ketersediaan bahan baku, biaya produksi yang tinggi, kebutuhan akan standarisasi kualitas produk, serta pelatihan tenaga kerja. Mengatasi tantangan ini memerlukan kolaborasi antara pemerintah, industri, dan lembaga pendidikan untuk menciptakan solusi yang berkelanjutan dan efisien dalam pengembangan PJU berbasis energi terbarukan di daerah pesisir.

1.3.7 Konstrai Keberlanjutan (sustainability)

Konstrai keberlanjutan pada Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis energi angin di wilayah pesisir pantai meliputi variabilitas sumber energi, biaya awal dan pemeliharaan, dampak lingkungan, keterlibatan masyarakat lokal, serta kebijakan dan regulasi yang mendukung. Mengatasi tantangan-tantangan ini melalui pendekatan kolaboratif dan perencanaan yang matang akan sangat penting untuk mencapai keberhasilan jangka panjang dari proyek PJU ini.

1.3.8 Konstrai lainnya

1.3.9 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Penelitian PJU berbasis energi angin bertujuan untuk memenuhi kebutuhan teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan dengan mengembangkan sistem penerangan jalan umum (PJU) yang ramah lingkungan dan efisien. Sistem ini memanfaatkan energi angin sebagai sumber utama, dirancang untuk bekerja pada berbagai kecepatan angin ($\geq 2,5$ m/s), dan dapat beroperasi secara mandiri tanpa koneksi PLN, menjadikannya ideal untuk daerah terpencil atau pesisir. Dilengkapi dengan baterai berkualitas tinggi untuk penyimpanan energi, lampu LED hemat energi (40–60 Watt), dan komponen yang tahan terhadap cuaca ekstrem, sistem ini juga menawarkan efisiensi biaya lebih rendah dibandingkan genset berbahan bakar fosil. Secara sosial, PJU berbasis energi angin meningkatkan kualitas hidup dengan menyediakan penerangan jalan yang aman dan mendukung aktivitas ekonomi lokal, seperti penerangan dermaga atau pasar malam. Selain itu, sistem ini berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan mendukung keberlanjutan energi jangka panjang dengan komponen yang ramah lingkungan dan mudah dipelihara.

1.3.10 Tujuan

Tujuan utama dari penelitian PJU berbasis energi angin adalah mengembangkan sistem penerangan jalan umum yang efisien, mandiri, dan ramah lingkungan. Secara teknis, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem PJU yang sepenuhnya bergantung pada energi angin, meningkatkan efisiensi konversi energi angin menggunakan turbin angin vertikal (VAWT), serta menyediakan sistem penyimpanan energi yang dapat menyimpan daya selama 2–3 hari tanpa angin. Sistem ini juga dirancang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem di daerah pesisir dan menggunakan lampu LED hemat energi. Dari segi ekonomi, penelitian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa sistem PJU berbasis energi angin lebih hemat biaya dibandingkan dengan genset berbahan bakar fosil atau jaringan

PLN, serta menyediakan solusi penerangan yang berbiaya rendah untuk wilayah terpencil. Secara sosial dan lingkungan, penelitian ini mendukung elektrifikasi di daerah pesisir yang belum teraliri listrik, meningkatkan keamanan dan aktivitas malam hari, serta mendorong pemanfaatan energi terbarukan untuk mengurangi dampak lingkungan, seperti ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi karbon.

1.4 Solusi

1. Turbin Angin

Solusi: Gunakan Turbin Angin Vertikal (VAWT)

Alasan:

VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) lebih cocok untuk wilayah pesisir karena mampu menangkap angin dari berbagai arah tanpa perlu penyesuaian. Turbin angin vertikal dapat bekerja pada kecepatan angin rendah (mulai dari 2,5 m/s) yang umum di daerah pesisir, serta tahan terhadap kecepatan angin tinggi hingga 25 m/s. Bahan turbin menggunakan Polivinil Klorida (PVC) atau aluminium tahan karat untuk memastikan daya tahan terhadap korosi akibat udara asin.

2. Penyimpanan Energi: Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)

Solusi: Gunakan Baterai dengan Kapasitas Cadangan 2–3 Hari

Alasan:

Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄): Memiliki siklus hidup panjang (2.000–5.000 siklus) dan lebih tahan terhadap kondisi cuaca ekstrem dibandingkan baterai jenis lainnya. Baterai ini mampu menyimpan energi yang cukup untuk menjaga lampu tetap menyala saat tidak ada angin selama 2–3 hari.

3. Pengelolaan Energi: Controller MPPT

Solusi: Gunakan Controller MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Alasan:

MPPT mampu mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin, sehingga efisiensi konversi energi meningkat.

MPPT juga melindungi baterai dari kerusakan akibat overcharging (pengisian daya berlebih) dan over discharging (pengosongan daya berlebih).

4. Penerangan: Lampu LED Hemat Energi

Solusi: Gunakan Lampu LED 40–60 Watt dengan Efisiensi Tinggi

Alasan:

LED hemat energi memiliki efisiensi ≥ 130 lumen/Watt, sehingga mampu menghasilkan pencahayaan yang terang dengan konsumsi daya rendah. Dengan masa pakai ≥ 50.000 jam, lampu LED dapat mengurangi kebutuhan perawatan rutin. Dilengkapi sensor cahaya otomatis untuk menyalakan/mematikan lampu berdasarkan kondisi terang/gelap, sehingga lebih hemat energi.

5. Struktur: Tiang dan Kotak Kontrol yang Tahan Cuaca

Solusi: Gunakan Tiang Baja Galvanis dan Kotak Kontrol Tahan Air

Alasan:

Tiang berbahan baja galvanis tahan karat dengan tinggi 6–9 meter dirancang untuk menahan kecepatan angin hingga 120 km/jam, yang sering terjadi di wilayah pesisir.

Kotak kontrol (tempat baterai dan controller) menggunakan bahan aluminium atau baja berlapis anti-karat dengan tingkat perlindungan IP65, sehingga tahan terhadap kelembapan, hujan, dan udara asin.

1.4.1 Karakteristik Produk

- Fitur Utama:

Penerangan Jalan Umum (PJU) di daerah pesisir pantai berfungsi untuk meningkatkan keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan pada malam hari. PJU membantu pengguna jalan melihat dengan jelas, mengurangi risiko kecelakaan, dan mencegah tindakan kriminal. Selain itu, PJU juga memiliki fungsi dekoratif dan dapat meningkatkan keindahan lingkungan. Penggunaan sistem pintar dalam PJU memungkinkan pengaturan yang efisien, menghemat biaya listrik, dan memperpanjang umur lampu. Desain PJU di kawasan pesisir juga harus mempertimbangkan ketahanan terhadap cuaca ekstrem.

- Fitur Dasar:

1. Turbin angin merupakan komponen utama yang mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Dalam konteks PJU, menggunakan desain vertikal

2. Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Generator yang digunakan adalah jenis DC atau AC, pada desain sistem dan kebutuhan daya.
 3. Baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin. Energi ini digunakan untuk menerangi jalan saat malam hari atau ketika kecepatan angin rendah.
 4. Lampu jalan yang digunakan dalam sistem PJU biasanya adalah lampu LED (Light Emitting Diode). Lampu LED memiliki efisiensi tinggi dalam menghasilkan cahaya dan daya tahan yang lebih lama.
 5. Kontroler pengisian berfungsi untuk mengatur aliran listrik antara turbin, baterai, dan lampu jalan. Kontroler ini memastikan bahwa baterai tidak overcharge atau discharge berlebihan, serta mengoptimalkan penggunaan energi.
 6. Sensor cahaya dapat digunakan untuk mendeteksi tingkat pencahayaan lingkungan sekitar. Dengan adanya sensor ini, lampu jalan akan otomatis menyala saat gelap dan mati saat terang, sehingga menghemat energi.
 7. Tiang lampu berfungsi sebagai penyangga bagi turbin angin dan lampu jalan. Tiang ini biasanya terbuat dari bahan tahan korosi seperti baja galvanis atau beton, dan dirancang untuk menahan beban serta stabil terhadap kondisi cuaca ekstrem di pesisir pantai.
- Fitur Tambahan:
 1. Sensor gerak pencahayaan untuk mendeteksi apakah ada manusia di bawah PJU agar lampu menyala dengan terang dan membantu untuk penerangan yang maksimal.
 - Sifat solusi yang diharapkan
 1. Dapat menyediakan sumber energi yang berkelanjutan.
 2. Memanfaatkan potensi angin di daerah pesisir.
 3. Dapat menghasilkan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan dengan sumber energi fosil.
 4. Dapat meningkatkan ketahanan energi lokal.
 5. Dapat mendukung pencapaian target pemerintah dalam transisi menuju energi bersih dan berkelanjutan.

1.4.2 Usulan Solusi

1.4.2.1 Solusi 1

1. Turbin Angin:

Gunakan turbin angin horizontal (HAWT) dengan bilah berbahan carbon fiber composite.

Alasan: Material ini lebih ringan, tahan korosi, dan menghasilkan putaran lebih stabil pada kecepatan angin rendah hingga tinggi. Desain HAWT dapat memaksimalkan efisiensi di area dengan arah angin dominan yang stabil.

2. Penyimpanan Energi:

Gunakan baterai gel lead-acid deep cycle.

Alasan: Lebih murah dibandingkan baterai LiFePO₄ dan memiliki umur siklus yang cukup panjang untuk kebutuhan penerangan (1.000–1.200 siklus).

3. Controller:

Gunakan controller PWM (Pulse Width Modulation).

Alasan: PWM lebih sederhana dan murah dibandingkan MPPT, cocok untuk sistem kecil dengan produksi daya terbatas.

4. Penerangan:

Gunakan lampu LED modular dengan daya 30–50 Watt.

Alasan: Desain modular memungkinkan penggantian panel LED yang rusak tanpa mengganti seluruh unit lampu.

5. Struktur:

Tiang menggunakan aluminium anodized dan kotak kontrol menggunakan polycarbonate tahan UV.

Alasan: Material ini lebih ringan dan tahan terhadap korosi jangka panjang, meski sedikit lebih mahal.

1.4.2.2 Solusi 2

1. Turbin Angin:

Gunakan turbin VAWT berukuran kecil (kapasitas 300W).

Alasan: Ukuran kecil memudahkan pemasangan dan cukup untuk menopang sistem penerangan dengan dukungan panel surya.

2. Penyimpanan Energi:

Gunakan kombinasi baterai LiFePO₄ dengan kapasitas cadangan 1–2 hari dan sistem superkapasitor.

Alasan: Superkapasitor dapat menyimpan energi dalam waktu singkat untuk mendukung puncak beban sementara, sehingga baterai lebih tahan lama.

3. Controller:

Gunakan dual MPPT controller yang mendukung energi angin dan surya.

Alasan: Controller ini mengelola energi dari turbin angin dan panel surya secara efisien, memanfaatkan sumber daya terbaik sesuai kondisi.

4. Penerangan:

Gunakan lampu LED low-power dengan daya 20–30 Watt yang disertai dengan panel surya mini sebagai cadangan daya langsung.

Alasan: Memanfaatkan cahaya matahari sebagai alternatif, sehingga sistem tetap berfungsi meski tidak ada angin.

5. Struktur:

Tiang menggunakan baja galvanis ringan dengan desain knockdown untuk memudahkan instalasi dan perbaikan.

Alasan: Desain knockdown mempermudah pengangkutan dan pemasangan di daerah terpencil.

1.4.2.3 Solusi 3

1. Turbin Angin:

Menggunakan turbin angin vertikal (VAWT) berbahan Polivinil Klorida (PVC) untuk ketahanan terhadap korosi dan efisiensi tinggi pada kecepatan angin rendah ($\geq 2,5$ m/s).

Alasan: Turbin VAWT dirancang untuk menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan mekanisme pelacakan arah angin. Kecepatan angin yang stabil di wilayah pesisir memastikan sistem tetap berfungsi sepanjang tahun tanpa perlu dukungan sumber energi lain.

2. Penyimpanan Energi:

Menggunakan baterai LiFePO₄ berkapasitas cadangan 2–3 hari.

Alasan: Baterai ini memiliki siklus hidup panjang dan toleransi yang baik terhadap suhu ekstrem, memastikan penyimpanan energi cukup saat kecepatan angin menurun. Dengan kapasitas cadangan, lampu tetap dapat menyala selama beberapa malam tanpa angin.

3. Controller:

Menggunakan MPPT (Maximum Power Point Tracking) untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan turbin angin.

Alasan: MPPT meningkatkan efisiensi pengisian daya baterai hingga 30% dibandingkan metode lain dan melindungi sistem dari kerusakan akibat pengisian daya berlebih atau pengosongan daya yang terlalu dalam.

4. Penerangan:

Menggunakan lampu LED hemat energi (40–60 Watt) dengan efisiensi ≥ 130 lumen/Watt dan masa pakai ≥ 50.000 jam.

Alasan: Lampu LED hemat energi dirancang untuk menghasilkan pencahayaan terang dengan daya rendah, dilengkapi sensor cahaya otomatis untuk menyalakan/mematikan lampu berdasarkan kondisi terang/gelap.

5. Struktur:

Menggunakan tiang baja galvanis tahan karat dengan tinggi 6–9 meter dan kotak kontrol tahan cuaca berbahan aluminium dengan tingkat perlindungan IP65.

Alasan: Struktur ini dirancang untuk bertahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem, seperti angin kencang hingga 120 km/jam dan udara asin di wilayah pesisir.

1.4.3 Analisis Usulan Solusi

Penerapan PJU berbasis energi angin di wilayah pesisir dipengaruhi oleh lima aspek utama. Aspek teknis mencakup keandalan turbin angin vertikal yang dapat menangkap angin dari berbagai arah, penyimpanan energi menggunakan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) untuk mendukung daya saat angin lemah, serta penggunaan komponen tahan lingkungan seperti lampu LED hemat energi. Aspek ekonomi menyoroti biaya investasi awal yang tinggi, namun efisiensi biaya operasional jangka panjang membuatnya lebih hemat dibandingkan genset berbahan bakar fosil, dengan dukungan pendanaan dari pemerintah. Dari aspek lingkungan, sistem ini ramah lingkungan karena memanfaatkan energi terbarukan dan memiliki dampak minimal jika dikelola dengan baik. Aspek keandalan mencakup fleksibilitas sistem yang mandiri dari jaringan PLN, didukung baterai besar untuk cadangan energi. Terakhir, aspek sosial menunjukkan manfaat penerangan bagi keamanan dan aktivitas ekonomi masyarakat, serta penerimaan masyarakat yang positif terhadap solusi ramah lingkungan ini.

1.4.4 Solusi yang dipilih

Solusi berbasis 100% energi angin dipilih karena berbagai keunggulan yang sesuai dengan kebutuhan wilayah pesisir. Kecepatan angin yang stabil sepanjang tahun ($\geq 2,5$ m/s) membuat energi angin menjadi sumber daya yang efisien tanpa memerlukan tambahan panel surya. Dari segi ekonomi, sistem ini membutuhkan biaya awal yang lebih rendah dibandingkan sistem hybrid, karena hanya melibatkan satu sumber energi, yaitu turbin angin. Selain itu, sistem ini dirancang untuk mendukung elektrifikasi di daerah terpencil dengan pendekatan sederhana dan mandiri, tanpa ketergantungan pada jaringan PLN atau infrastruktur tambahan lainnya. Dengan sepenuhnya memanfaatkan energi terbarukan, sistem ini juga mendukung keberlanjutan energi yang bersih dan ramah lingkungan.

1.5 Perencanaan Pasar

1.5.1 Perkiraan Biaya

Tabel 1.1 Perkiraan Biaya PJU Berbasis Tenaga Angin

Alat	Harga Satuan	Jumlah	Total
Turbin dan Generator	2.000.000	1 set	2.000.000
Kontroller Daya (MPPT)	1.500.000	1 unit	1.500.000
Baterai Lifepo4, 12v 100Ah	1.900.000	1 unit	1.900.000
Lampu LED 50 Watt	500.000	1 unit	500.000
Biaya Lainnya	1.800.000	-	1.800.000
Total Keseluruhan			7.700.000

a. Biaya Investasi Awal (Capital Expenditure - CAPEX)

Dari tabel yang tersedia, total biaya untuk pemasangan satu unit PJU berbasis energi angin adalah Rp 7.700.000. Berikut adalah rincian komponennya:

Komponen Utama: Turbin angin, generator, baterai LiFePO₄, kontroler daya, dan lampu LED.

Biaya Lainnya: Meliputi biaya instalasi, transportasi, dan pengaturan awal sistem sebesar Rp 1.800.000.

b. Biaya Operasional dan Perawatan (Operational Expenditure - OPEX)

Perawatan rutin turbin dan baterai: Rp 300.000–500.000 per tahun.

Penggantian baterai (setiap 5–7 tahun): Rp 1.900.000/unit.

Total rata-rata OPEX tahunan: Rp 500.000–700.000

1.5.2 Analisis Finansial

1. Parameter yang Digunakan

Biaya Investasi Awal: Rp 7.700.000/unit.

Biaya Operasional Tahunan (OPEX): Rp 500.000/unit.

Umur Ekonomis Sistem: 10–15 tahun.

Penghematan Listrik PLN atau Genset Diesel: Rp 200.000–300.000/bulan/unit.
(Asumsi biaya listrik atau bahan bakar fosil untuk PJU konvensional sekitar Rp 3.000/kWh).

2. Perhitungan Payback Period (Periode Pengembalian Modal)

Total Investasi: Rp 7.700.000.

Penghematan Tahunan:

$Rp\ 250.000 \times 12\ \text{bulan} = Rp\ 3.000.000/\text{tahun}$ (rata-rata).

Periode Pengembalian Modal:

$Rp\ 7.700.000 \div Rp\ 3.000.000 = 2,57\ \text{tahun}$ (~3 tahun).

3. Return on Investment (ROI)

Penghematan Total Selama Umur Sistem (10 Tahun):

$Rp\ 3.000.000 \times 10\ \text{tahun} = Rp\ 30.000.000$.

ROI:

$((Rp\ 30.000.000 - Rp\ 7.700.000) \div Rp\ 7.700.000) \times 100\% = 289\%$.

4. Net Present Value (NPV)

Menggunakan diskon rate 10% dan umur sistem 10 tahun, hasil NPV menunjukkan nilai positif yang menegaskan bahwa proyek ini layak secara finansial.

1.5.3 Model Bisnis

1. Target Pasar

a. Pemerintah Daerah:

Sebagai bagian dari program elektrifikasi di wilayah pesisir dan daerah terpencil.

Fokus pada desa nelayan, jalan penghubung antar-desa, dan kawasan wisata pesisir.

b. Kawasan Wisata Pesisir:

Operator wisata atau hotel di kawasan pantai yang ingin meningkatkan penerangan dengan solusi ramah lingkungan.

c. Swasta/CSR:

Perusahaan yang menjalankan program tanggung jawab sosial (CSR) untuk meningkatkan infrastruktur daerah terpencil.

2. Pendekatan Model Bisnis

Model Jual Langsung:

Sistem dijual langsung kepada pelanggan dengan harga Rp 7.700.000 per unit, mencakup instalasi.

Model Leasing atau Penyewaan:

Perusahaan instalasi menawarkan penyewaan sistem PJU berbasis energi angin dengan biaya bulanan, misalnya Rp 600.000/bulan selama 5 tahun (termasuk perawatan).

Kemitraan Publik-Swasta:

Pemerintah dan pihak swasta bekerja sama untuk mengimplementasikan PJU berbasis energi angin, di mana biaya investasi awal sebagian ditanggung oleh swasta, dan pemerintah memberikan kompensasi berbasis layanan.

1.6 Kesimpulan dan Ringkasan

Kesimpulan Penelitian

Penerangan Jalan Umum (PJU) berbasis energi angin terbukti menjadi solusi yang efisien dan ramah lingkungan, terutama untuk daerah terpencil dan pesisir yang tidak terjangkau listrik PLN. Sistem ini mengandalkan turbin angin vertikal (VAWT) yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah ($\geq 2,5$ m/s), serta dilengkapi baterai cadangan untuk memastikan penerangan tetap berfungsi meskipun angin tidak bertiup. Dari sisi ekonomi, meskipun investasi awal cukup tinggi, yaitu sekitar Rp 28,5 juta per unit, biaya operasional yang rendah serta penghematan energi menjadikan sistem ini layak untuk diterapkan. Dengan payback period sekitar 5 tahun dan Return on Investment (ROI) mencapai 215% dalam 15 tahun, proyek ini memberikan nilai ekonomi yang signifikan. Selain itu, sistem ini mendukung keberlanjutan energi dengan sepenuhnya memanfaatkan sumber energi terbarukan yang bersih dan bebas emisi karbon, menjadikannya solusi yang berkontribusi terhadap pelestarian lingkungan sekaligus mendukung kebutuhan penerangan masyarakat di wilayah terpencil.

Ringkasan

Penelitian menunjukkan bahwa PJU berbasis energi angin memiliki potensi besar untuk mendukung elektrifikasi di daerah terpencil dan pesisir. Dengan model bisnis yang menggabungkan skema pembelian langsung, penyewaan, atau kerjasama publik-swasta, solusi ini dapat menjadi alternatif yang andal untuk sistem penerangan berbasis bahan bakar fosil. Sistem ini meningkatkan kualitas hidup masyarakat dengan menyediakan penerangan yang aman, hemat biaya, dan ramah lingkungan.