

BAB 2.

TINJAUAN PUSTAKA

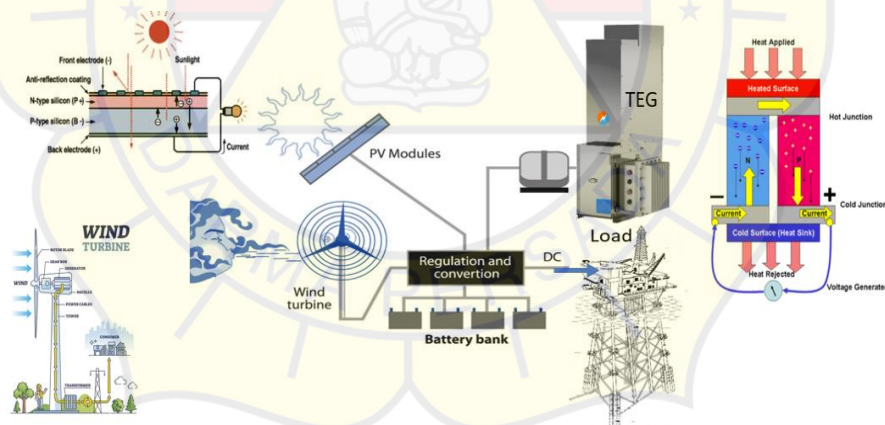
Dalam penulisan tesis ini peneliti menggali informasi dari beberapa jurnal-jurnal ilmiah sebelumnya sebagai bahan perbandingan, baik mengenai kekurangan atau kelebihan yang sudah ada. Selain itu, peneliti juga menggali informasi dari data-data project sebelumnya dalam rangka mendapatkan suatu informasi yang ada sebelumnya tentang teori yang berkaitan dengan judul yang digunakan untuk memperoleh landasan teori ilmiah.

Beberapa penelitian telah mengeksplorasi integrasi energi terbarukan dalam operasi minyak dan gas lepas pantai, dengan meneliti berbagai kemajuan teknologi dan implikasinya. Misalnya Shadman, Milad et al. [23] pada tahun 2023 meneliti tentang “*Offshore Renewable Energy*” potensi secara umum. Sedangkan Solomin, Evgeny et al [5]. melakukan penelitian lebih detail terkait “Off-shore PV and wind-based energy generation” yang menjadi pembangkit ramah lingkungan pada anjungan lepas pantai. Dan berikut adalah beberapa penelitian terkait energy terbarukan pada anjungan lepas pantai dan dampak lingkungannya, yang relevan dengan penelitian ini antara lain, Alina Cherepovitsyna et al., Patrizia Serra et al., Cherepovitsyn, Alexey et al. ,Li, Tao et al., dan Belucio Matheus et al. [16,17,24–26]. Disisi lain teknologi Thermoelectric menjadi sumber energy yang biasa digunakan pada anjungan minyak dan gas lepas pantai yang belum banyak di angkat pada jurnal-jurnal penelitian, sedikit penelitian mengenai thermoelectric sebagai pembangkit, hanya sebatas pada uji laboratorium atau sebatas pembangkit non-komersial, Jouhara, Hussam et al.[9] merupakan salah satu dari sedikit peneliti yang membahas tentang thermoelectric sebagai pembangkit energy listrik dan aplikasinya “*Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications*”.

Pada penelitian kali ini, Dimana pembangkit listrik tenaga surya (PV) akan di Hybrid dengan Thermoelectric generator (TEG) sebagai solusi dari system pembangkit pada anjungan minyak dan gas lepas pantai yang ramah lingkungan. Belum ada yang secara detail meneliti tentang hal ini, tetapi ada beberapa jurnal tentang teknologi hybrid dan teknologi

penyimpanan energy yang dapat menjadi acuan teori dalam penyusunan Tesis ini diantaranya jurnal-jurnal dari, Yimen N et al., Igogo, Tsisilile et al, Wang J et al, dan Lee, Jeong et al. [21,27–30]. Walaupun dari sisi tekno ekonomi dan hazardous area “*Protection against explosions*” tidak dibahas secara detail pada tesis ini, namun perhitungan singkat terkait duah hal tersebut tetap dilakukan sebagai langkah awal bila kedepannya ada penelilain yang akan mendetailkan tentang hal ini secara lebih mendalam, maka tesis ini dapat dijadikan acuan. Jurnal dari Chudy-Laskowska K et al., Yimen N et al., Faturachman D et al. [2,21,22] menjadi landasan teori terkait tekno ekonomi untuk renewable energy sedangkan jurnal dari Brkić D, Stajić Z et al., membahas tentang *Protection against explosions* [31].

Sebagai kesimpulan, meskipun literatur yang ada memberikan dasar yang kuat mengenai manfaat dan tantangan dari integrasi energi terbarukan ke dalam operasi minyak dan gas lepas pantai, seringkali kurang memberikan wawasan praktis tentang aplikasi di dunia nyata. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengusulkan desain konsep baru untuk operasi minyak dan gas lepas pantai yang berkelanjutan seperti terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Hybrid System

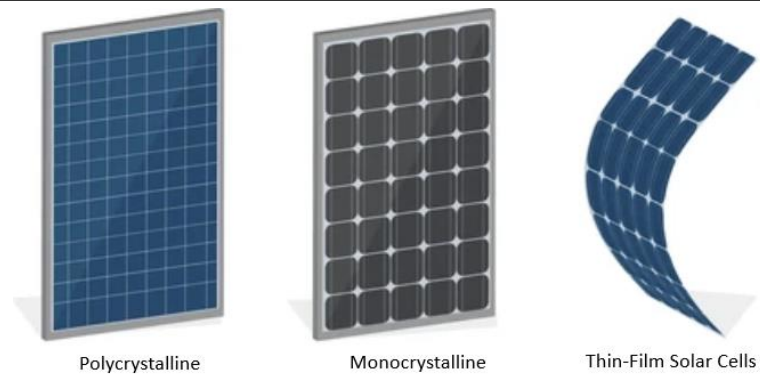
2.1 Panel Surya

Panel surya, atau sering disebut solar panel, adalah perangkat yang dirancang untuk mengonversi sinar matahari menjadi energi listrik. Teknologi ini bekerja melalui proses yang dikenal sebagai photovoltaic effect, di mana sel-sel surya di dalam panel menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Energi yang dihasilkan dari panel surya sangat

ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi karbon, sehingga berkontribusi dalam mengurangi polusi udara dan mendukung keberlanjutan energi.

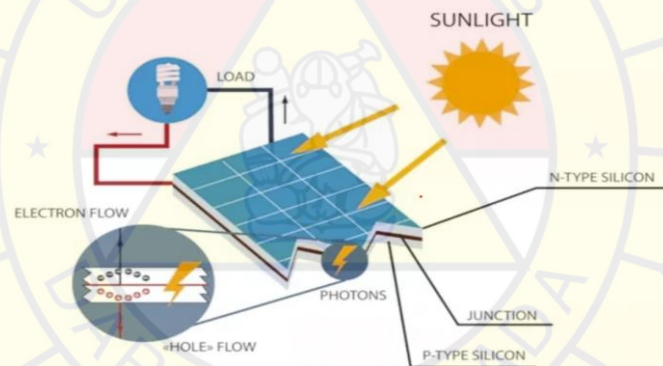
Ada beberapa jenis panel surya yang umum digunakan, yaitu [32–34]:

1. Monocrystalline Silicon (Mono-Si): Panel ini terbuat dari kristal silikon tunggal yang murni, membuatnya sangat efisien dalam mengonversi sinar matahari menjadi listrik, umumnya mencapai 15-20%. Karena itu, lebih banyak energi dapat dihasilkan dari area yang lebih kecil. Panel monokristalin juga memiliki daya tahan yang lebih lama, dengan umur operasional rata-rata mencapai 25-30 tahun, dan memiliki tampilan seragam berwarna hitam yang sering dianggap estetik. Panel ini cocok untuk area terbatas atau instalasi perumahan dan komersial yang membutuhkan efisiensi tinggi dan daya tahan jangka panjang. Jenis Monocrystalline Silicon ini yang paling banyak digunakan pada industri minyak dan gas khususnya area offshore karena jenis ini memiliki umur yang panjang.
2. Polycrystalline Silicon (Poly-Si): Dibuat dari banyak potongan silikon yang dilebur menjadi wafer, panel ini lebih ekonomis dibandingkan panel monokristalin karena proses pembuatannya lebih sederhana dan efisien. Meskipun efisiensinya sedikit lebih rendah, panel ini cukup efektif di berbagai kondisi iklim, termasuk suhu tinggi, dan menjadi pilihan populer untuk proyek skala besar dengan anggaran terbatas. Selain itu, proses produksinya menghasilkan lebih sedikit limbah dibandingkan monokristalin, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan.
3. Thin-Film Solar Cells: Panel ini menggunakan lapisan material fotovoltaik yang sangat tipis, seperti cadmium telluride (CdTe) atau amorphous silicon (a-Si), dan memiliki fleksibilitas lebih tinggi serta bobot yang lebih ringan. Meski efisiensinya lebih rendah daripada panel berbasis silikon, teknologi ini memiliki beberapa kelebihan, seperti fleksibilitas tinggi sehingga cocok untuk diterapkan pada permukaan yang tidak rata atau bangunan dengan desain unik. Thin-film solar cells juga lebih efektif dalam kondisi pencahayaan rendah atau berawan, serta mudah dipasang di lokasi yang menantang. Gambar 5. Menampilkan bentuk dari masing-masing jenis panel surya.



Gambar 5. Jenis Panel Surya

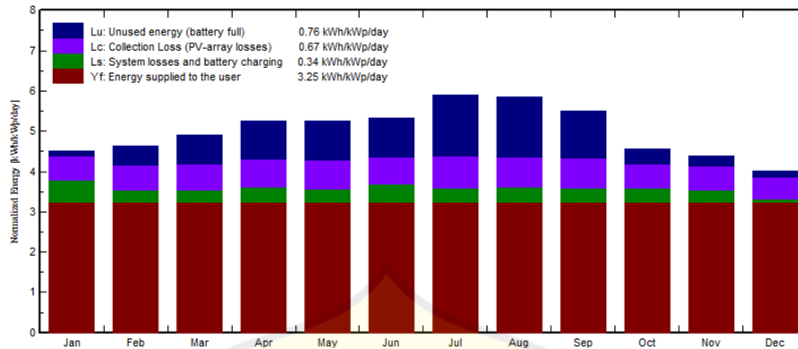
Proses fotovoltaik terjadi ketika foton, partikel cahaya matahari, menyentuh permukaan panel surya yang mengandung material semikonduktor seperti silikon. Foton ini memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron dalam material tersebut [35]. Ketika elektron-elektron ini bergerak bebas, mereka menghasilkan arus listrik. Secara keseluruhan, panel surya dan teknologi fotovoltaik adalah solusi inovatif yang memanfaatkan energi terbarukan dengan dampak lingkungan minimal. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini.



Gambar 6. Proses photovoltaic

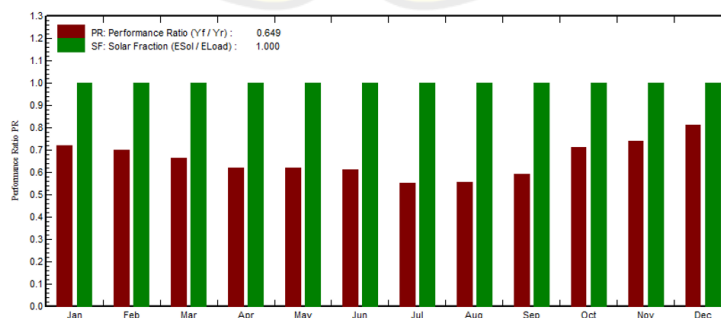
Kinerja sistem dinilai berdasarkan beberapa poin kunci, yaitu energi yang dihasilkan per unit daya terpasang, yang mengukur seberapa efisien sistem PV memanfaatkan kapasitas terpasangnya untuk menghasilkan listrik. Selain itu, energi yang dihasilkan berdasarkan rasio kinerja (PR) juga dievaluasi, di mana PR menggambarkan rasio antara energi yang dihasilkan secara aktual dan potensi energi idealnya, memberikan gambaran tentang seberapa efektif sistem bekerja dalam kondisi nyata. Kondisi SOC (State of Charge)[50] dari baterai sepanjang tahun juga menjadi metrik kunci, yang menunjukkan tingkat pengisian dan pengosongan baterai selama operasi, mencerminkan kemampuan sistem untuk menyimpan dan menyediakan energi dengan andal. Evaluasi terhadap ketiga metrik ini memberikan

pemahaman yang komprehensif mengenai kinerja keseluruhan sistem energi terbarukan. Poin-poin ini divisualisasikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8 di bawah ini.

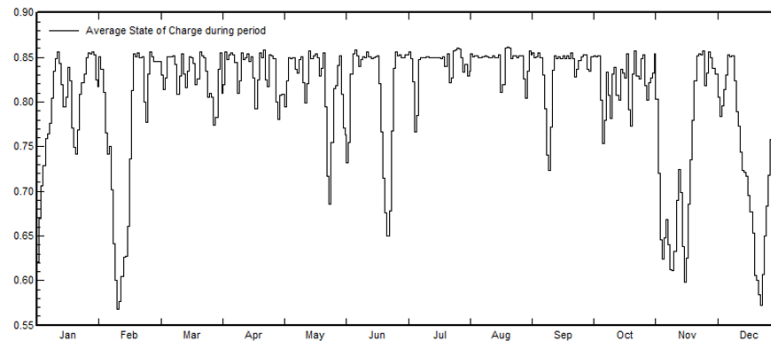


Gambar 7. Energy generated per unit of installed capacity by PVsyst

Pada Gambar 7 di atas, energi yang dihasilkan dalam satu hari ditunjukkan dalam bentuk diagram batang yang menampilkan energi yang dihasilkan dan kerugian selama 12 bulan. **Lu** (energi yang tidak terpakai) adalah energi yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik (PV) tetapi tidak dapat disimpan di dalam baterai karena kapasitasnya sudah penuh. Energi ini tidak dapat dimanfaatkan ketika permintaan listrik dari beban tidak mencukupi. **Lc** (*collection loss*) mencakup kerugian yang terjadi pada array PV, seperti kerugian termal, kerugian kabel, dan faktor lainnya. Selanjutnya, **Ls** (kerugian sistem dan pengisian baterai) mencakup kerugian dari inverter, di mana tidak semua energi yang dikirim ke baterai dapat disimpan karena adanya ketidakefisienan. Efisiensi pengisian baterai dipengaruhi oleh kualitas dan teknologi baterai. **Yf** (energi yang disuplai ke pengguna) adalah energi yang dikirimkan ke pengguna dalam satu hari, yang mencapai 3,25 kWh/kWp/hari. Selain itu, parameter **Lu** penting untuk diperhatikan karena menunjukkan bahwa PV dapat menyediakan energi ke baterai hingga mencapai kondisi penuh.



Gambar 8. Performance ratio by PVsyst



Gambar 9. Battery SOC (state of Charge) condition over the year by PVsyst

Mengenai penyimpanan baterai dalam sistem Hybrid ini, grafik pada Gambar 9 menunjukkan kondisi pengisian baterai selama setahun dalam satuan bulan. Kurva yang mengarah ke atas menunjukkan kondisi di mana baterai sedang diisi oleh panel fotovoltaik (PV). Sementara itu, kurva yang mengarah ke bawah menunjukkan kondisi di mana baterai digunakan oleh beban akibat penurunan produksi PV (kondisi malam atau tidak ada sinar matahari). Hal yang perlu dicatat adalah bahwa kondisi SOC (State of Charge) baterai tidak mencapai batas bawah yang ditentukan, yaitu 20%. Terlihat bahwa batas bawah pada kurva berada di atas 55%. Panel PV juga mampu mengisi baterai hingga tingkat SOC sebesar 85%. Secara sederhana, Rasio Kinerja (PR) pada Gambar 8 adalah perbandingan antara energi akhir yang dihasilkan oleh sistem PV (Final Yield) dan energi referensi yang tersedia berdasarkan radiasi matahari (*Reference Yield*). Nilai PR dinyatakan dalam persentase (%), dan biasanya berada dalam rentang 0% hingga 100%, meskipun umumnya berada antara 70% hingga 90% pada sistem PV yang berfungsi dengan baik.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (1)$$

$$PR = \frac{Y_f}{(Lu + Lc + Ls + Y_f)} \quad (2)$$

Rasio Kinerja (PR) menggambarkan seberapa efisien sebuah sistem PV beroperasi. PR sebesar 100% menunjukkan bahwa sistem bekerja tanpa kerugian, namun ini adalah kondisi ideal yang secara praktis tidak dapat dicapai karena berbagai kerugian yang terjadi pada sistem PV. PR antara 70% hingga 90% merupakan rentang umum untuk sistem PV yang berfungsi dengan baik, di mana kerugian yang dapat terjadi mencakup ketidakefisienan inverter, suhu tinggi, kerugian kabel, dan kerugian radiasi akibat kotoran. Sebuah sistem mungkin tidak berfungsi secara optimal jika PR kurang dari 70%. Hal ini dapat disebabkan oleh penempatan

panel yang tidak tepat, ketidakefisienan perangkat keras, bayangan, atau manajemen energi yang tidak efisien. Sementara itu, Solar Fraction adalah perbandingan antara energi yang disuplai oleh sistem PV dan total kebutuhan energi, yang biasanya dinyatakan dalam persentase (%).

$$SF = \frac{E_{User}}{E_{Load}} \quad (3)$$

Solar Fraction (SF) pada Gambar 8 menggambarkan persentase kebutuhan energi yang dipenuhi oleh sistem PV. Jika Solar Fraction adalah 100%, berarti sistem PV sepenuhnya memenuhi semua kebutuhan energi dari beban. Namun, jika Solar Fraction kurang dari 100%, hanya sebagian dari kebutuhan energi yang dipenuhi oleh PV, sementara sisanya harus dipenuhi oleh sumber energi lain seperti baterai atau generator. Dalam studi ini, perhitungan State of Charge (SOC) dilakukan menggunakan Metode Berbasis Tegangan, yang bergantung pada hubungan antara tegangan baterai dan SOC. Metode ini melibatkan tiga parameter utama, yaitu **V_{batt}**, tegangan baterai saat ini; **V_{min}**, tegangan minimum yang dianggap sebagai SOC 0%; dan **V_{max}**, tegangan maksimum yang dianggap sebagai SOC 100%.

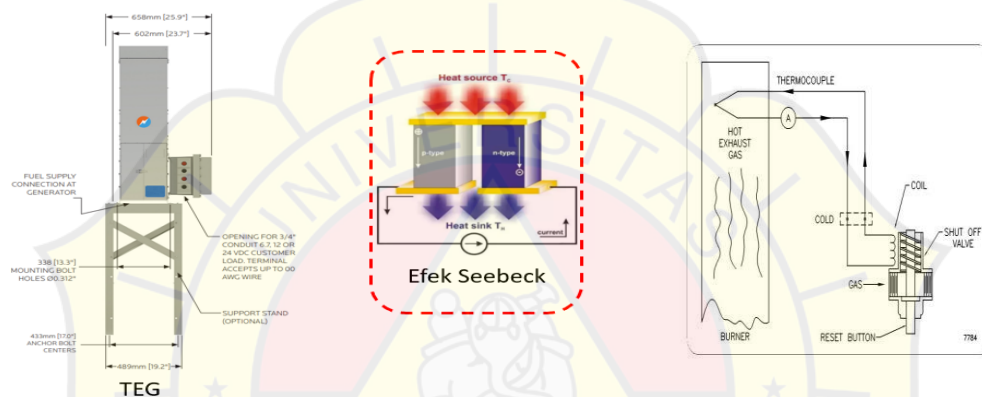
$$SOC = \frac{V_{batt} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\% \quad (4)$$

Setelah melakukan perhitungan dan analisis sistem, penting untuk memahami bagaimana metode yang diterapkan dalam menentukan ukuran komponen sistem Hybrid ini berkontribusi terhadap kinerja keseluruhan. Metode perhitungan yang digunakan, termasuk analisis ukuran Thermoelectric Generators (TEG), panel fotovoltaik (PV), dan baterai, memberikan dasar yang kuat untuk mengevaluasi hasil yang diperoleh.

2.2 Thermoelectric

Teknologi termoelektrik adalah metode konversi panas langsung menjadi energi listrik menggunakan generator termoelektrik (TEG). Proses ini didasarkan pada efek Seebeck, di mana perbedaan suhu pada material termoelektrik menghasilkan tegangan listrik. Generator termoelektrik memiliki keunggulan unik karena mampu memanfaatkan panas buangan dari berbagai sumber, seperti proses industri, mesin kendaraan, dan bahkan kolektor surya, untuk menghasilkan listrik. Hal ini menjadikan TEG sebagai teknologi yang berharga dalam meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan dengan memanfaatkan energi yang

seharusnya hilang sebagai panas. Efek Seebeck sendiri ditemukan oleh fisikawan Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821, di mana perbedaan suhu pada dua material konduktif atau semikonduktor yang disambungkan pada dua titik dapat menyebabkan aliran elektron dari sisi panas ke sisi dingin, sehingga menciptakan tegangan listrik [36]. Semakin besar gradien suhu yang ada, semakin tinggi pula tegangan yang dihasilkan, menjadikan material termoelektrik ideal untuk aplikasi yang membutuhkan sumber panas yang stabil. Sistem termoelektrik banyak digunakan pada aplikasi khusus seperti sensor jarak jauh dan pesawat luar angkasa, di mana keandalan dan minimnya perawatan sangat penting, untuk detailnya dapat dilihat pada gambar 10 ini.

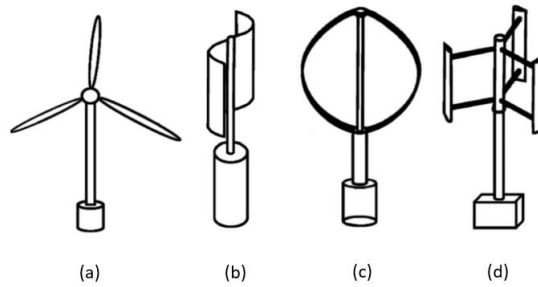


Gambar 10. Efek Seebeck pada TEG

2.3 Wind Turbine

Turbin angin adalah perangkat yang dirancang untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Proses ini dimulai ketika angin menggerakkan bilah-bilah turbin yang berfungsi seperti baling-baling besar dan dihubungkan ke poros utama; saat bilah berputar, energi gerakan ini diteruskan ke generator melalui sistem roda gigi yang meningkatkan kecepatan rotasi. Di dalam generator, rotasi poros menyebabkan kumparan tembaga bergerak melintasi medan magnet, menghasilkan arus listrik melalui proses induksi elektromagnetik [37,38]. Turbin angin digunakan dalam berbagai skala, mulai dari skala kecil untuk kebutuhan rumah tangga hingga ladang angin besar di darat dan laut yang menyuplai energi ke jaringan listrik nasional. Teknologi ini unggul karena mampu menghasilkan energi bersih tanpa emisi karbon, sehingga mendukung transisi ke energi terbarukan. Lokasi ideal untuk pemasangan turbin angin biasanya berada di area dengan angin yang konsisten dan cukup kuat, seperti wilayah pesisir, pegunungan, atau lautan lepas. Dengan perkembangan teknologi, turbin angin

menjadi semakin efisien dan merupakan bagian penting dalam memenuhi kebutuhan energi yang ramah lingkungan.



Gambar 11. (a) Schematic of Horizontal-Axis, (b) Savonius drag-based, (c) Darrieus curved-blade, (d) Giromill H-Rotor wind turbines

Dalam mempertimbangkan penggunaan turbin angin sebagai sumber energi, terdapat tiga parameter utama yang perlu diperhatikan: kecepatan angin cut-in, yaitu kecepatan minimum saat turbin mulai menghasilkan daya; kecepatan angin terukur (rated), yaitu kecepatan optimal di mana turbin menghasilkan daya maksimal secara efisien; dan kecepatan angin cut-out, yaitu batas maksimum kecepatan angin yang masih dapat ditoleransi turbin sebelum sistem otomatis menghentikannya untuk mencegah kerusakan. Untuk menentukan ukuran turbin angin yang sesuai, ketiga parameter ini harus dimasukkan ke dalam perhitungan estimasi produksi energi, dengan mempertimbangkan distribusi kecepatan angin setempat, kurva daya turbin, kapasitas baterai yang dibutuhkan, serta efisiensi pengisian daya, agar sistem dapat memberikan suplai listrik yang andal selama kondisi darurat.

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (5)$$

$$A = P / 0.5 \times \rho \times v^3 \times C_p \quad (6)$$

Dimana:

P: Rated output power (W)

ρ : Average air density (1.225 kg/m³)

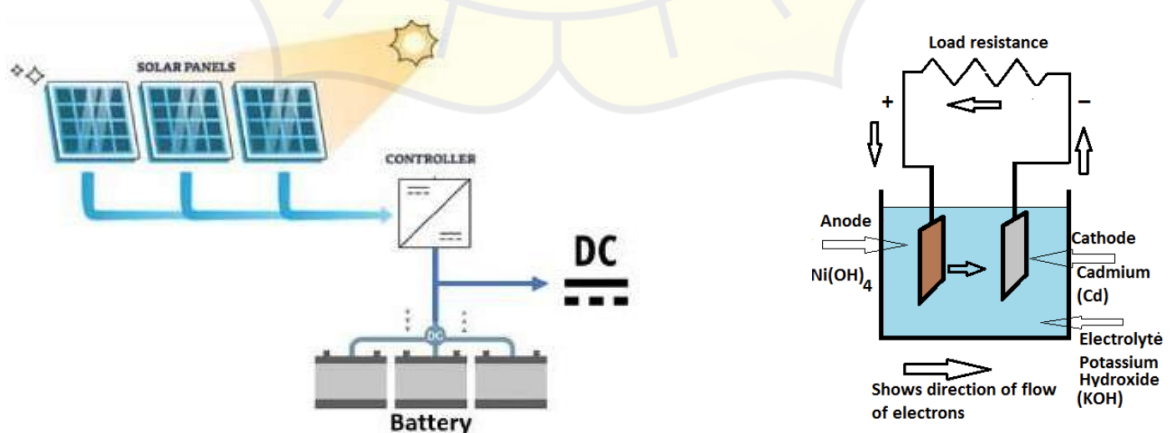
A: Rotor swept area (m²)

v: Wind speed (m/s)

C_p: Maximum power coefficient (ranging from 0.25 to 0.45, average is 0.4)

2.4 Penyimpanan Energy

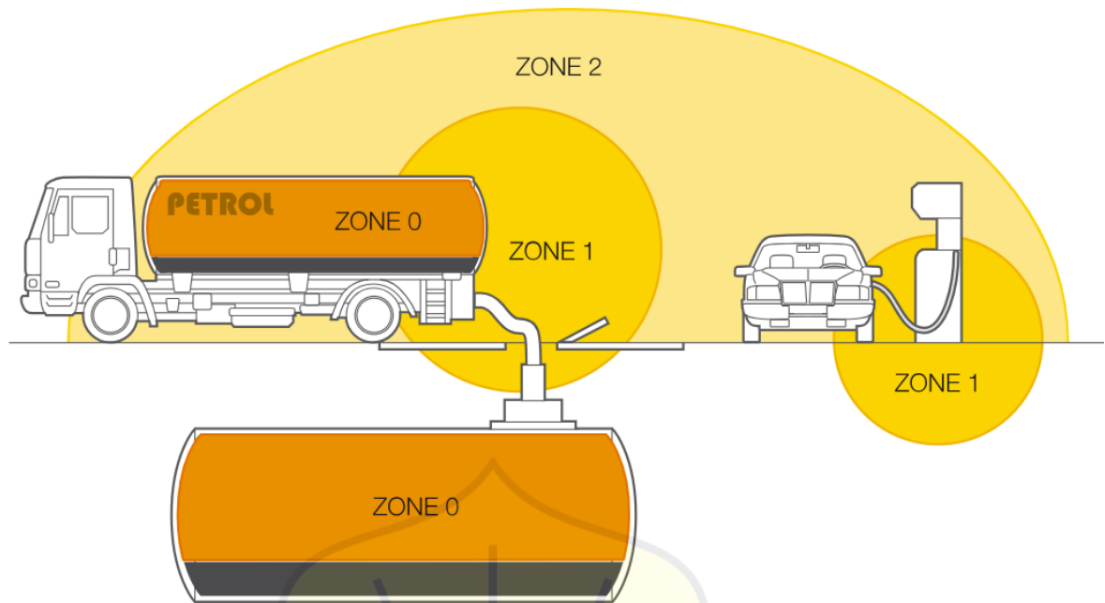
Dalam industri minyak dan gas lepas pantai, baterai Nickel-Cadmium (NiCad) sering digunakan karena kinerjanya yang andal dalam kondisi ekstrem dan kemampuannya untuk bertahan dalam lingkungan yang menantang [39]. Baterai NiCad memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan jenis baterai lainnya, seperti lithium-ion atau lead-acid, antara lain ketahanan terhadap suhu ekstrem, di mana baterai ini dapat beroperasi dengan baik dalam rentang suhu yang luas, baik tinggi maupun rendah, yang sangat penting mengingat kondisi lingkungan yang bisa sangat beragam. Selain itu, baterai NiCad memiliki umur siklus yang lebih lama, mampu menjalani banyak siklus pengisian dan pengosongan tanpa kehilangan kapasitas yang signifikan, menjadikannya pilihan yang ekonomis dalam jangka panjang. Kemampuan pengisian cepat juga menjadi salah satu keunggulan, memungkinkan penyimpanan energi yang segera tersedia setelah pengisian dan meningkatkan efisiensi operasional dalam situasi yang memerlukan respons cepat. Baterai ini dapat mempertahankan kinerjanya bahkan di bawah beban tinggi, di mana daya yang konsisten sangat penting, serta lebih toleran terhadap kondisi overcharging dan deep discharge, yang mengurangi risiko kerusakan dalam penggunaan yang tidak teratur. Selain itu, baterai NiCad lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras, seperti kelembapan tinggi dan kemungkinan terpapar zat-zat korosif, yang sering terjadi di lokasi lepas pantai. Meskipun ada perhatian mengenai dampak lingkungan dari penggunaan cadmium, yang merupakan bahan beracun, manfaat ketahanan dan kinerja baterai NiCad sering kali menjadikannya pilihan yang berharga dalam konteks industri minyak dan gas lepas pantai.



Gambar 12. Battery Energy Storage menggunakan NiCad Battery

2.5 Hazardous Area

Hazardous area, atau area berbahaya, merujuk pada lokasi di mana terdapat potensi keberadaan bahan mudah terbakar atau eksplosif, seperti gas, uap, atau debu yang dijelaskan pada gambar 13. Di dalam industri, terutama dalam sektor minyak dan gas, petrokimia, dan proses industri lainnya, penting untuk mengidentifikasi dan mengelola risiko yang terkait dengan area ini untuk menjaga keselamatan dan mencegah insiden berbahaya. Ada beberapa standar internasional yang mengatur keselamatan di area berbahaya, di antaranya ATEX, IECEx, dan UL [31]. ATEX (ATmosphères EXplosibles) adalah regulasi Uni Eropa yang mengatur peralatan dan sistem perlindungan yang digunakan di lingkungan berbahaya. ATEX membagi area berbahaya menjadi dua kategori: Zone 0 (area dengan gas berbahaya terus menerus hadir), Zone 1 (area di mana gas berbahaya mungkin hadir dalam kondisi normal), dan Zone 2 (area di mana gas berbahaya hanya jarang muncul). Peralatan yang digunakan di area ini harus memenuhi persyaratan tertentu untuk menjamin bahwa mereka tidak akan menjadi sumber percikan api atau pemicu ledakan. IECEx (International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres) adalah sistem sertifikasi internasional yang dirancang untuk memastikan bahwa peralatan dan sistem perlindungan yang digunakan di area berbahaya memenuhi standar keselamatan internasional. IECEx menawarkan sertifikasi yang lebih luas dan diakui secara internasional, yang memungkinkan produk yang memenuhi standar untuk digunakan di berbagai negara tanpa perlu sertifikasi tambahan, mempermudah pergerakan barang dan jasa di pasar global. UL (Underwriters Laboratories) adalah organisasi yang menguji dan menyertifikasi produk untuk memastikan keselamatannya, termasuk di area berbahaya. Sertifikasi UL sering kali diakui di Amerika Utara, dan fokus pada keamanan produk, termasuk peralatan listrik dan komponen yang digunakan di lingkungan berbahaya. UL juga memberikan pedoman mengenai penggunaan dan instalasi peralatan di area berbahaya untuk meminimalkan risiko kecelakaan.



Gambar 13. Hazardous Area Classification (ATEX Zoning Example)

2.6 Perhitungan keekonomian

Selain meninjau aspek teknis, kami juga melakukan evaluasi dari sisi tekno-ekonomi untuk menilai bagaimana konsep desain baru ini memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Analisis ini mencakup penghitungan penghematan biaya operasional yang dihasilkan dari peningkatan efisiensi energi melalui system hybrid TEG+PV. Kami menilai potensi pengurangan konsumsi energi dan dampaknya terhadap biaya bahan bakar serta pemeliharaan peralatan. Persamaan berikut ini untuk menghitung Return of Investment (ROI) dan Break-Even Point (BEP).

$$ROI = \left[\frac{C_{save}}{C_{Inv}} \right] \times 100\% \quad (7)$$

$$ROI = \frac{\text{Nilai deviasi \& energy saving antara Hybrid \& 100\% THEG}}{\text{Nilai Investasi}} \times 100\%$$

$$\text{Payback time} = \frac{\text{Nilai Investasi awal}}{\text{Keuntungan per tahun}} \quad (8)$$