JURNAL MANAJEMEN RISIKO | ISSN (e): 2746-3982
Volume 06 Issue 01, 2025, pp 19 - 28
https://ejournal.uki.ac.id/index.php/mr/index

Analisis Risiko Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berkapasitas 6.480 KWP di Universitas Pamulang

Mardiansyah[1], Rahmad Waris Wahdianto[2], Hery Setia Wardana[3], Lukiswara Meganesia[4], Ivana Maretha Siregar[5], Heri Kusnadi[6]
Universitas Pamulang[1,6], Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2,3,4,5]
dosen10094@unpam.ac.id[1], rahmatwaris0@gmail.com[2], herysetiawardana.92@gmail.com[3], lukiswarara@gmail.com[4], ivanasrg1@gmail.com[5], dosen00931@unpam.ac.id[6]

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengelola berbagai potensi risiko yang muncul dalam proyek pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 6.480 kWp di Universitas Pamulang sebagai upaya konkret mendukung transisi menuju energi terbarukan di lingkungan akademik. Pendekatan manajemen risiko diterapkan secara komprehensif, dimulai dari identifikasi sumber risiko yang bersifat teknis, administratif, maupun eksternal, hingga tahap evaluasi tingkat kemungkinan dan dampak masing-masing risiko. Proses mitigasi kemudian dirancang berdasarkan hasil penilaian untuk memastikan kelancaran pelaksanaan proyek pada setiap fasenya, mulai dari studi awal, pengadaan teknologi, proses instalasi, hingga operasional dan pemeliharaan berkelanjutan. Selain aspek teknis, kajian ini juga memperhatikan analisis emisi sebagai indikator keberlanjutan lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penerapan strategi pengendalian risiko yang tepat, mayoritas risiko berhasil ditekan ke tingkat yang dapat diterima dan dikendalikan. Di sisi lain, penggunaan PLTS secara signifikan menurunkan potensi emisi karbon dan metana dibandingkan sistem kelistrikan berbasis fosil, meskipun menghasilkan limbah baterai yang perlu dikelola secara khusus. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan risiko terpadu tidak hanya meningkatkan efektivitas proyek dari sisi operasional, tetapi juga memperkuat kontribusi kampus terhadap pengembangan energi bersih yang berkelanjutan.

Kata kunci: Manajemen Risiko, PLTS, Energi Terbarukan, Mitigasi Risiko

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di sektor pendidikan semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah mahasiswa, aktivitas penelitian, dan pengembangan infrastruktur kampus. Universitas sebagai institusi pendidikan tinggi tidak hanya dituntut untuk menjadi pusat keilmuan, tetapi juga diharapkan dapat menjadi pelopor dalam penerapan teknologi ramah lingkungan. Energi terbarukan adalah jenis energi yang berasal dari mekanisme alami yang terus berlangsung dan tidak habis oleh pemakaian manusia. Sumber energi ini memiliki keunggulan besar karena tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mampu menyediakan pasokan energi secara berkelanjutan dalam jangka panjang (Rudawin et al., 2020).

Universitas Pamulang, sebagai salah satu perguruan tinggi swasta terbesar di Indonesia, berupaya menjawab tantangan keberlanjutan dengan merencanakan implementasi sistem solar panel berkapasitas 6.480 kWp. Skala proyek ini menunjukkan komitmen institusi dalam mendorong efisiensi energi sekaligus memberikan contoh nyata penerapan teknologi hijau di lingkungan akademik. Salah satu tantangan utama dalam teknologi fotovoltaik terletak pada fluktuasi output daya yang dihasilkan, yang sangat bergantung pada tingkat pencahayaan matahari yang diterima oleh panel. Ketika intensitas sinar matahari berubah-ubah, misalnya akibat kondisi cuaca atau posisi matahari, maka energi listrik yang dihasilkan juga menjadi tidak stabil (Sartono et al., 2021).

Selain aspek teknis internal, perhatian khusus juga perlu diberikan pada variabel eksternal yang dapat berdampak langsung terhadap efektivitas operasional sistem PLTS, seperti perubahan kondisi atmosfer dan kemungkinan terjadinya malfungsi teknis (Heriyani et al., 2021). Dalam tahap perencanaan dan pelaksanaan, proyek solar panel dihadapkan pada

berbagai potensi risiko, baik dari aspek teknis, ekonomi, lingkungan, maupun sosial. Risiko teknis seperti ketidaksesuaian kapasitas panel dengan beban listrik aktual, cuaca yang tidak menentu, hingga kegagalan sistem inverter harus diidentifikasi sejak dini. Sementara itu, dari sisi ekonomi, fluktuasi harga komponen, biaya pemeliharaan jangka panjang, dan ketidakpastian pengembalian investasi menjadi faktor yang dapat memengaruhi kelayakan proyek.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis risiko implementasi solar panel 6.480 kWp di Universitas Pamulang dengan pendekatan sistematis dan menyeluruh. Dengan mengidentifikasi dan mengevaluasi berbagai risiko yang mungkin terjadi, hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang aplikatif bagi manajemen universitas dalam mengelola dan meminimalisir potensi hambatan. Penelitian ini juga dapat menjadi rujukan bagi institusi pendidikan lain yang ingin mengadopsi teknologi energi terbarukan secara strategis dan berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

Panel surya merupakan teknologi penting dalam memanfaatkan energi terbarukan dari matahari. Teknologi ini bekerja dengan mengubah sinar matahari menjadi listrik melalui sel Photovoltaik (PV), yang menawarkan sumber energi bersih dan berkelanjutan (Lewis, 2015). Meski demikian, terdapat sejumlah faktor yang mempengaruhi efisiensi dan kinerja panel surya dalam operasionalnya.

Efisiensi panel surya dipengaruhi oleh suhu lingkungan, suhu permukaan panel, intensitas cahaya matahari, kondisi cuaca, dan tingkat iradiasi (Azmi et al., 2023). Selain itu, penumpukan debu dan polusi udara dapat menurunkan output energi sel surya secara signifikan, bahkan hingga 25–40% di beberapa wilayah (Rao et al., 2018). Meskipun panel surya menyimpan potensi besar dalam mendukung produksi energi berkelanjutan, upaya penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengatasi berbagai kendala teknis. Inovasi seperti sel surya bifasial, yang mampu menyerap cahaya dari kedua sisi, menunjukkan potensi dalam menurunkan biaya produksi dan meningkatkan efisiensi konversi energi (Vimala et al., 2023).

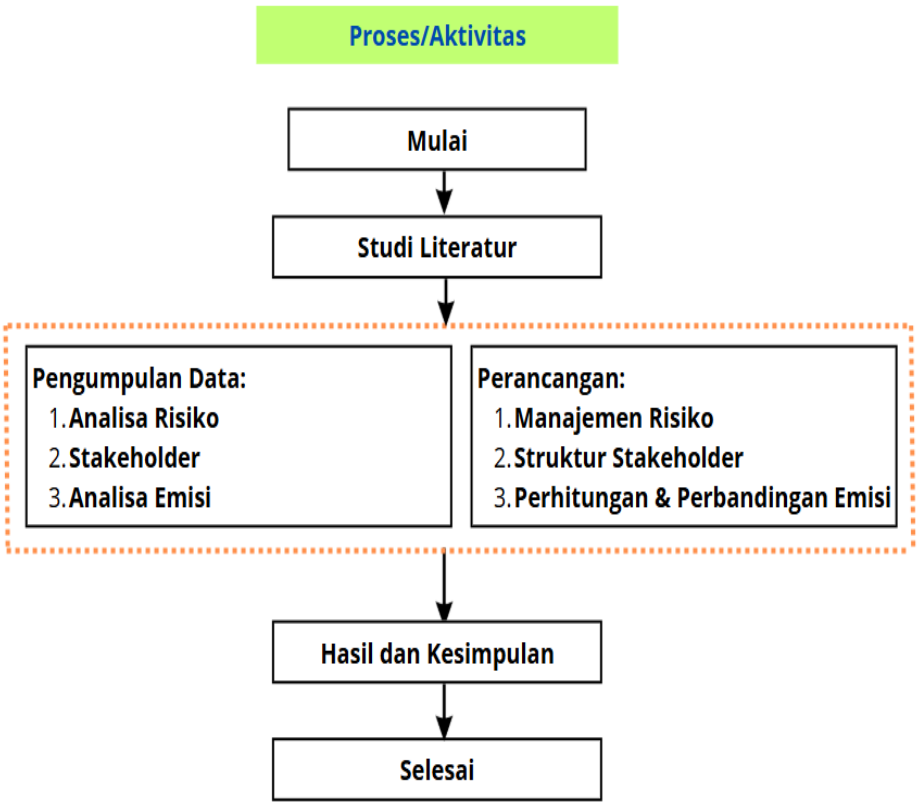
Manajemen risiko merupakan aspek krusial dalam proyek panel surya karena mencakup berbagai faktor yang dapat memengaruhi keberhasilan dan keberlanjutan proyek tersebut (Ali et al., 2023). Pendekatan analisis tekno-ekonomi dan revolusi hijau sangat mendukung peningkatan aspek ekologis dalam instalasi energi surya, di mana analisis arus kas berperan penting dalam memperbaiki output ekonomi. Namun demikian, risiko teknis dan finansial masih menjadi penghambat utama dalam pembiayaan proyek energi terbarukan, sehingga penerapan alat manajemen risiko menjadi sangat penting.

Manajemen risiko dalam instalasi panel surya merupakan proses krusial yang mencakup berbagai aspek lingkungan, kesehatan, dan keselamatan. Salah satu teknologi yang tengah berkembang adalah pembangkit listrik tenaga surya, yang menjanjikan efisiensi tinggi dan biaya produksi rendah. Namun, teknologi ini menimbulkan kekhawatiran signifikan terkait dampak kesehatan dan lingkungan karena kandungan timbal yang berpotensi berbahaya di dalamnya (Torrence et al., 2022). Selain itu, integrasi sistem fotovoltaik (PV) ke dalam jaringan listrik pintar juga membawa tantangan baru (Rahim et al., 2023).

Penilaian risiko merupakan alat penting yang digunakan di berbagai sektor industri untuk mengevaluasi potensi bahaya dan risiko yang mungkin terjadi (Nasser et al., 2021). Sebuah kerangka klasifikasi risiko yang inovatif telah dikembangkan untuk mengidentifikasi faktor-faktor risiko utama dari berbagai perspektif (Wan et al., 2019). Praktik penilaian risiko terus berkembang untuk menghadapi skenario multi-bahaya dengan memanfaatkan teknologi canggih (Stalhandske et al., 2024). Pergeseran ini menuju pendekatan penilaian dan manajemen multi-risiko semakin nyata, di mana para peneliti menekankan pentingnya pendekatan yang mempertimbangkan tantangan keberlanjutan dalam mengatasi risiko-risiko tersebut (Ward et al., 2022).

METODE

Kajian mengenai analisis risiko dalam perancangan panel surya berkapasitas 6.480 KwP di Universitas Pamulang dilakukan menggunakan pendekatan analitis. Proses ini diawali dengan pengumpulan informasi melalui survei dan diskusi bersama pihak Universitas Pamulang guna merumuskan rencana aktivitas dalam proyek instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Setelah tahapan perencanaan tersusun, dilakukan identifikasi dan evaluasi risiko untuk setiap aktivitas yang direncanakan. Selain itu, disusun pula struktur pemangku kepentingan yang memiliki peran dalam seluruh proses pelaksanaan proyek. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tahapan penelitian ini, digunakan representasi visual berupa diagram alur seperti ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Analisa Risiko

Tahapan analisis risiko pada proyek implementasi PLTS berkekuatan 6.480 kWp di Universitas Pamulang dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi risiko yang mungkin muncul di setiap fase pelaksanaan proyek. Proses ini melibatkan perbandingan antara kemungkinan terjadinya risiko (*Probability* of occurrence) dan tingkat dampaknya (scale of damage) sebagai dasar dalam skala penilaian. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk merumuskan langkah-langkah mitigasi yang tepat, sehingga dapat meminimalkan potensi gangguan terhadap kelancaran proyek, baik dari sisi teknis, finansial, maupun operasional selama proses perencanaan hingga pasca-instalasi sistem PLTS.

Stakeholder

Penetapan pihak-pihak yang berkepentingan dalam proyek PLTS ini dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis, mulai dari identifikasi semua pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung, analisis terhadap tingkat kepentingan serta pengaruh masing-masing pihak, hingga menentukan prioritas berdasarkan peran dan dampaknya terhadap proyek. Komunikasi yang terbuka dan konsultasi yang berkelanjutan menjadi kunci utama dalam

mengelola hubungan antar stakeholder. Pemantauan secara berkala juga diperlukan untuk menyesuaikan strategi manajemen stakeholder seiring berjalannya proyek, sehingga kepentingan mereka dapat diakomodasi secara proporsional guna mendukung keberhasilan implementasi PLTS di lingkungan kampus.

Analisa Emisi

Penerapan PLTS di Universitas Pamulang memberikan kontribusi positif dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, namun tetap memiliki tantangan dari sisi limbah padat, khususnya dari penggunaan baterai dalam sistem Off-Grid. Meskipun PLTS tidak menghasilkan emisi gas buang seperti CO_2 atau CH_4, keberadaan baterai sebagai media penyimpanan energi menimbulkan potensi pencemaran lingkungan ketika masa pakainya habis. Umur pakai baterai yang umumnya mencapai satu dekade harus diantisipasi dengan strategi pengelolaan limbah yang berkelanjutan, mengingat proses daur ulang baterai masih terbatas secara teknologi dan infrastruktur. Oleh karena itu, analisis emisi tidak hanya mencakup gas buang, tetapi juga mempertimbangkan aspek limbah elektronik yang timbul dari sistem pendukung PLTS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Manajemen Risiko

Analisis manajemen risiko disusun untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengendalikan berbagai potensi risiko yang dapat muncul selama proses perencanaan hingga operasional proyek pembangkit listrik tenaga surya berskala besar ini. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap tahapan kegiatan, mulai dari studi awal, pengadaan komponen, pemasangan, hingga pemeliharaan, berjalan dengan aman, efisien, dan sesuai target. Risiko-risiko seperti keterlambatan logistik, kesalahan teknis, gangguan cuaca ekstrem, hingga isu keberlanjutan lingkungan dianalisis secara sistematis agar dapat diminimalkan dampaknya melalui tindakan mitigasi yang tepat. Dengan adanya tabel ini, Universitas Pamulang memiliki acuan strategis dalam menjamin keberhasilan proyek energi terbarukan secara menyeluruh. Pembahasan manajemen risiko dalam penelitian ini dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 1.

Tabel 1 Manajemen Risiko Implementasi PLTS di Universitas Pamulang

No	Aktivitas Kritis	Deskripsi Risiko	PIC	P	S	Nilai	Mitigasi	After		Nilai	Status
								P	S		
1	Studi Kelayakan & Rencana Awal	Estimasi kapasitas daya dan luasan atap	Tim Proyek	3	4	12	Audit teknis dan survei fisik	1	2	2	Diterima
2	Pengadaan PLTS	Keterlambatan atau spesifikasi panel tidak sesuai, inverter, baterai tidak sesuai	Tim Proyek	4	4	16	Pemilihan vendor terpercaya dan evaluasi pra-kontrak	2	2	4	Terkend-ali

3	Konstruksi Fisik & Instalasi	Kerusakan saat instalasi atau kerusakan atap kampus	Tim Teknik	3	5	15	SOP keselamat-an, pelatihan teknis, dan asuransi proyek	1	3	3	Diterima
4	Integrasi Sistem ke Jaringan Internal Kampus	Gangguan pada sistem kelistrikan kampus atau overload	Tim Teknik	4	4	16	Simulasi alur beban, smart inverter, backup system	2	3	6	Terkend-ali
5	SCADA System	Gagalnya sistem monitor online dan SCADA pasca-instalasi	Tim Teknik	3	3	9	Uji coba sistem secara bertahap	1	1	1	Aman
6	Uji Coba & Komisioni-ng	Output daya tidak sesuai rencana	Tim QA/ QC	3	4	12	Kalibrasi ulang komponen dan pengujian paralel	2	2	4	Terkend-ali
7	Operasion-al Harian	Operator PLTS kampus kurang kompeten	Tim Teknik	2	4	8	Pelatihan teknis berkala dan sertifikasi internal	1	2	2	Diterima
8	Pemelihar-aan Rutin	Terjadinya kerusakan karena kurangnya inspeksi atau perawatan	Tim Teknik	3	4	12	Jadwal PM berbasis sistem CMMS dan evaluasi kinerja	1	2	2	Aman

9	Risiko Cuaca Ekstrem	Kerusakan akibat hujan angin, petir, atau panas ekstrem	Tim Teknik	4	5	20	Instalasi sistem proteksi petir dan modul tahan cuaca	2	3	6	Terkend -ali
10	*End-of-Life* Baterai	Limbah baterai bekas tidak tertangani	Tim Teknik	3	4	12	Kerjasama dengan lembaga daur ulang	2	2	4	Aman

Tabel 1 menggambarkan identifikasi dan evaluasi terhadap sepuluh aktivitas kritis dalam implementasi PLTS 6.480 kWp di Universitas Pamulang, mulai dari tahap studi kelayakan hingga pengelolaan limbah baterai. Setiap risiko dinilai berdasarkan dua parameter utama, yaitu *Probability* (P) atau tingkat kemungkinan terjadinya risiko dan *Severity* (S) yang mengukur dampak jika risiko tersebut terjadi, masing-masing dalam skala 1 hingga 5. Nilai risiko dihitung dengan mengalikan P dan S, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan prioritas mitigasi. Penanggung jawab utama dari setiap risiko ditentukan dalam kolom *Person In Charge* (PIC), yang umumnya melibatkan tim proyek atau tim teknis internal kampus. Setelah tindakan mitigasi diterapkan, terjadi penurunan nilai risiko yang signifikan, mencerminkan bahwa sebagian besar risiko kini berada pada kategori "Aman" dan "Terkendali", dengan beberapa berada dalam kondisi "Diterima" yang berarti masih dalam batas yang dapat diterima selama strategi pengendalian tetap dijalankan. Pendekatan ini menjadi langkah penting untuk memastikan proyek berjalan efisien, minim gangguan, serta selaras dengan prinsip keberlanjutan dan keselamatan operasional.

Tabel 2 sampai 4 akan menyajikan pemetaan tingkat risiko dalam format matriks berdasarkan kombinasi antara kemungkinan terjadinya suatu peristiwa dan tingkat dampak yang ditimbulkannya. Warna digunakan sebagai indikator visual untuk menandai tingkat urgensi penanganan: hijau mencerminkan risiko yang dapat diterima, kuning mengindikasikan masih dapat ditoleransi, jingga menunjukkan perlunya perhatian serius (isu penting), sedangkan merah merepresentasikan kondisi risiko kritis yang tidak dapat diterima tanpa tindakan mitigasi.

Tabel 2 Nilai *Assesment Risk Analysis*

		***Probability* (P)**				
		***Declinable* (1)**	***Low* (2)**	***Medium* (3)**	***High* (4)**	***Very High* (5)**
S e v e r i t y (	*Certain* (5)	*Tolerable* (5)	*Issue* (10)	*Unacceptable* (15)	*Unacceptable* (20)	*Unacceptable* (25)
	Probable (4)	*Acceptable* (4)	*Tolerable* (8)	*Issue* (12)	*Unacceptable* (16)	*Unacceptable* (20)
	Possible (3)	*Acceptable* (3)	*Tolerable* (6)	*Issue* (9)	*Issue* (12)	*Unacceptable* (15)
	Not Probable (2)	*Acceptable* (2)	*Acceptable* (4)	*Tolerable* (6)	*Tolerable* (8)	*Issue* (10)

S)	*Not Probable At All* (1)	*Acceptable* (1)	*Acceptable* (2)	*Acceptable* (3)	*Acceptable* (4)	*Tolerable* (5)

Tabel 3 *Assesment Before Measure*

		***Probability* (P)**				
		***Declinable* (1)**	***Low* (2)**	***Medium* (3)**	***High* (4)**	***Very High* (5)**
Severity (S)	*Certain* (5)				*Risk* 1, 6	*Risk* 3, 10
	Probable (4)			*Risk* 2	*Risk* 4	*Risk* 9
	Possible (3)				*Risk* 5	
	Not Probable (2)		*Risk* 8			
	Not Probable At All (1)					

Tabel 4 *Assesment After Measure*

		***Probability* (P)**				
		***Declinable* (1)**	***Low* (2)**	***Medium* (3)**	***High* (4)**	***Very High* (5)**
Severity (S)	*Certain* (5)			*Risk* 3		
	Probable (4)		*Risk* 1	*Risk* 6	*Risk* 11	
	Possible (3)	*Risk* 4				
	Not Probable (2)	*Risk* 7		*Risk* 10		
	Not Probable At All (1)	*Risk* 2, 8, 9				

Tabel 2 memperlihatkan pemetaan tingkat risiko dalam format matriks, yang disusun berdasarkan perbandingan antara peluang terjadinya risiko (probabilitas) dan dampak yang ditimbulkannya (tingkat keparahan). Penggunaan warna berfungsi sebagai indikator tingkat risiko: hijau menggambarkan risiko yang dapat diterima, kuning menunjukkan risiko yang masih bisa ditoleransi, jingga menandakan adanya permasalahan yang perlu diperhatikan, dan merah menunjukkan risiko dengan tingkat bahaya tinggi yang tidak bisa diterima.

Tabel 3 mengilustrasikan situasi awal sebelum diterapkannya strategi pengendalian risiko. Pada tahap ini, risiko nomor 3, 5, 10, dan 11 masuk dalam kategori bahaya serius yang tidak bisa dibiarkan (*unacceptable*). Sementara itu, risiko nomor 1, 2, 6, dan 9 berada dalam tingkat yang masih mengkhawatirkan (*issue*) sehingga memerlukan langkah pencegahan serta tindakan mitigasi agar tingkat risikonya dapat diturunkan ke level yang dapat ditoleransi atau diterima.

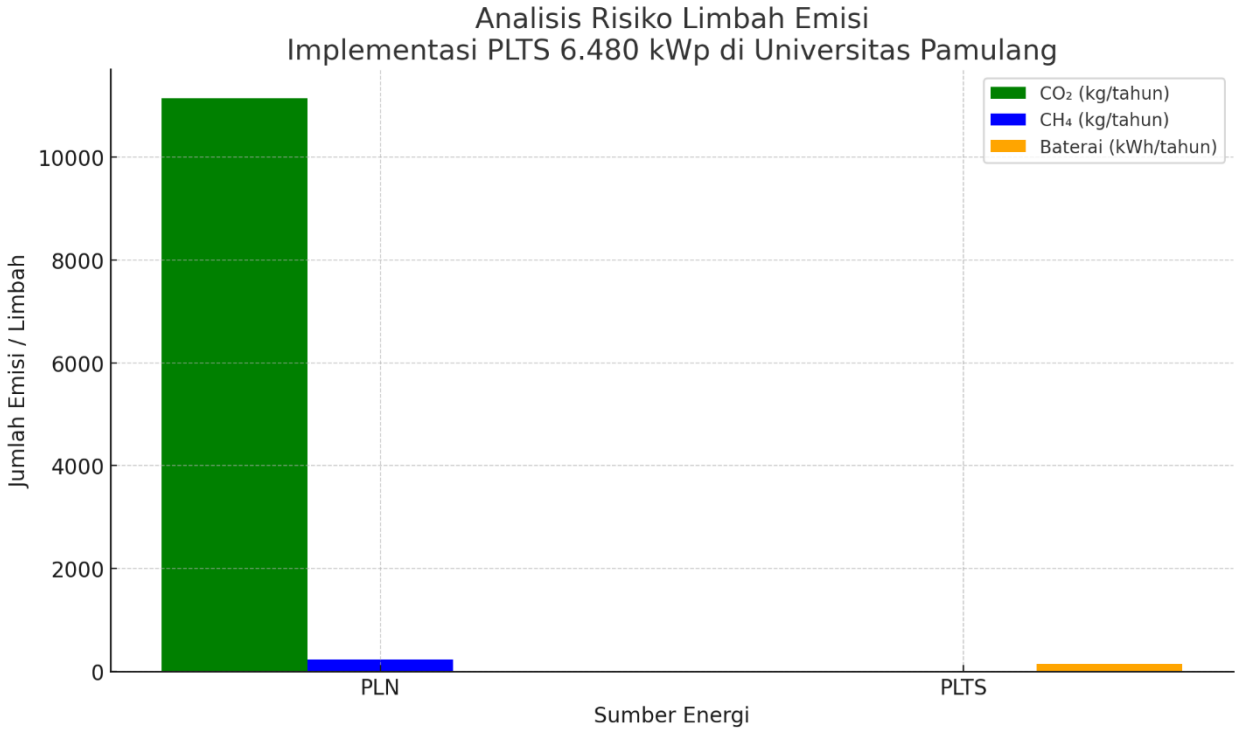
Tabel 4 mencerminkan situasi setelah langkah-langkah pengendalian risiko diterapkan. Risiko nomor 2, 4, 7, 8, dan 9 telah berhasil ditekan hingga masuk ke dalam kategori aman (*acceptable*). Sedangkan risiko nomor 1, 3, 6, dan 10 sudah menurun menjadi risiko sedang (*tolerable*). Namun, risiko nomor 11 tetap berada dalam tingkat menengah yang perlu perhatian (*issue*) karena berhubungan dengan kejadian alam ekstrem yang sifat dan waktunya sulit diprediksi serta diantisipasi.

Analisa Kadar Emisi

Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 6.480 kWp di Universitas Pamulang merupakan langkah strategis dalam mendukung transisi energi bersih di lingkungan perguruan tinggi. Selain sebagai solusi penghematan energi jangka panjang, proyek ini juga menjadi bagian dari komitmen institusi terhadap pengurangan emisi karbon. Untuk memahami dampak lingkungan secara menyeluruh, perlu dilakukan analisis komparatif terhadap limbah dan emisi yang dihasilkan oleh sistem PLTS dibandingkan dengan sumber listrik konvensional seperti PLN, khususnya dari segi emisi gas rumah kaca dan residu baterai. Gambar 1 memperlihatkan grafik Analisis Risiko Limbah Emisi untuk proyek implementasi PLTS berkapasitas 6.480 kWp di Universitas Pamulang. Grafik ini membandingkan tiga jenis limbah atau emisi:

1. PLN menghasilkan emisi gas rumah kaca (CO_2 dan CH_4) yang signifikan.
2. PLTS tidak menghasilkan gas buang, namun menghasilkan limbah baterai yang perlu dikelola.

Grafik ini menunjukkan bahwa meskipun PLTS menghasilkan limbah padat (baterai), emisinya jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan sumber listrik konvensional.



Gambar 1 Grafik Analisis Risiko Limbah Emisi

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem PLTS memiliki keunggulan signifikan dalam mengurangi emisi gas karbon dan metana dibandingkan dengan listrik berbasis fosil. Meskipun

penggunaan PLTS menghasilkan limbah berupa baterai bekas, hal ini dapat dikendalikan melalui pengelolaan daur ulang yang tepat. Dengan demikian, penerapan PLTS di Universitas Pamulang tidak hanya memberikan manfaat energi secara teknis dan ekonomis, tetapi juga membawa dampak positif bagi keberlanjutan lingkungan kampus dan sekitarnya.

KESIMPULAN

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 6.480 kWp di Universitas Pamulang merupakan langkah strategis dalam mempercepat transisi menuju energi bersih di sektor pendidikan tinggi, sekaligus mencerminkan komitmen institusi terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Inisiatif ini tidak hanya berfokus pada penyediaan sumber listrik alternatif yang ramah lingkungan, tetapi juga mengedepankan pentingnya penerapan manajemen risiko secara menyeluruh di setiap tahapan proyek. Sejak perencanaan, pengadaan, instalasi, hingga fase operasional dan pemeliharaan, potensi risiko dari berbagai aspek, baik teknis, administratif, maupun eksternal telah diidentifikasi dan dianalisis secara sistematik. Proses evaluasi risiko dilakukan dengan mempertimbangkan peluang terjadinya serta dampaknya, sehingga strategi mitigasi dapat dirancang secara tepat sasaran dan efisien. Seluruh hasil analisis tersebut dituangkan dalam bentuk tabel (Tabel 1 hingga Tabel 4), yang menjadi acuan dalam pengambilan keputusan berbasis data. Hasilnya menunjukkan bahwa sebagian besar risiko telah berhasil ditekan hingga kategori aman dan terkendali, sementara potensi dampak lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca yang hasilnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan sumber listrik konvensional. Dengan sistem pengelolaan limbah baterai yang terencana, proyek ini berperan penting sebagai model penerapan energi terbarukan yang tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga relevan dengan misi keberlanjutan jangka panjang kampus.

DAFTAR PUSTAKA

Abdoul Nasser, A. H., Mawugbe, E. A., Emmanuel Kouame, M., Ndalila, P. D., Li, Y., & Arthur Paterne, M. (2021). Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: A Descriptive Study on Gas Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(10), 1098. https://doi.org/10.3390/jmse9101098.

Abdul Rahim, F., Magalingam, P., Ahmad, N. A., Jamil, N., Che Cob, Z., & Salahudin, L. (2023). Cybersecurity Vulnerabilities in Smart Grids with Solar Photovoltaic: A Threat Modelling and Risk Assessment Approach. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, *14*(3). https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.03.018.

Ali, S., Irfan, M., Yan, Q., & Sun, H. (2023). Sustainable green revolution through the development of solar power projects in Pakistan: a techno-economic analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*, *30*(33), 80123–80143. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28117-4.

Azmi, M. S. F. M., Hussain, M. H., Rahim, S. R. A., Mid, E. C., Shaari, A. S., Hashim, N., Husny, N., & Ahmad, M. F. (2023). Hybrid Cooling System for Solar Photovoltaic Panel. *Journal of Physics: Conference Series*, *2550*(1), 012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2550/1/012004.

Lewis, N. S. (2015). Introduction: Solar Energy Conversion. *Chemical Reviews*, *115*(23), 12631–12632. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00654.

Rao, A., Santosh Kumar, S., & Neha, N. (2018). *Smart IoT based Solar Panel Cleaning System*. *5*, 2357–2361. https://doi.org/10.1109/rteict42901.2018.9012432.

Rifky, & Heriyani, O. (2021). Car cabin cooling system using solar energy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1088, 012055.DOI: https://doi.org/10.1088/1757- 899X/1088/1/012055.

Rudawin, L., Rajabiah, N., & Irawan, D. (2020). Analisa sistem kerja photovoltaic berdasarkan sudut kemiringan menggunakan monocrystalline dan policrystalline. 9(1), 129–137. Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin. DOI: http://dx.doi.org/10.24127/trb.v9i1.1221.

Sartono, N., Ridwan, E., & Ridlwan, H. (2021). Pengaruh Perbedaan Posisi Sudut Kemiringan Panel Surya 120 watt peak Terhadap Peningkatan Efisiensi. Seminar Nasional Teknik Mesin, 11(1), 246-253. https://prosiding-old.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/4098.

Stalhandske, Z., Steinmann, C. B., Meiler, S., Sauer, I. J., Vogt, T., Bresch, D. N., & Kropf, C. M. (2024). Global multi-hazard risk assessment in a changing climate. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-55775-2.

Torrence, C. E., Libby, C. S., Nie, W., & Stein, J. S. (2022). Environmental and health risks of perovskite solar modules: Case for better test standards and risk mitigation solutions. *IScience*, *26*(1), 105807. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105807.

Vimala, M., Perarasi, M., Ramadas, G., Sathyamurthy, R., & Manokar, A. M. (2023). A Review of Different Types of Solar Cell Materials Employed in Bifacial Solar Photovoltaic Panel. *Energies*, *16*(8), 3605. https://doi.org/10.3390/en16083605.

Wan, C., Yan, X., Zhang, D., & Yang, Z. (2019). Analysis of risk factors influencing the safety of maritime container supply chains. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, *11*(6), 476. https://doi.org/10.1504/ijstl.2019.103872.

Ward, P. J., Critto, A., Tatman, S., Van Loon, A. F., Duncan, M., Gill, J. C., Ciurean, R., Sillmann, J., Koks, E., Tiggeloven, T., Bulder, B., Torresan, S., Padrón-Fumero, N., Adesiyun, A., Dunne, A., Vuong Pham, H., Hananel, C., Reichstein, M., Palomino Antolín, I., … Ruiter, M. (2022). Invited perspectives: A research agenda towards disaster risk management pathways in multi-(hazard-)risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*(4), 1487–1497. https://doi.org/10.5194/nhess-22-1487-2022.