SUSTAINABILITY ENGINEERING : TANTANGAN MANAJEMEN TEKNIK DALAM TRANSISI ENERGI TERBARUKAN

Herotje Siwi1, Jedithjah Naapia Tamedi Papia[2], Adrian Maidangkay[3], Nelson Seleman Luppa[4], Fransiscus Josep Tulung[5], Adolf Tonny Rasuh[6]

[1,2,3,4,5,6]*Politeknik Negeri Manado*
E-mail : herosiwi@gmail.com[1], jedithp@yahoo.com[2*], adrianmaidangkay@yahoo.co.id[3], nelsonselemanluppa@gmail.com[4], fjtulung@gmail.com[5], tonnyrasuh10@gmail.com[6]

ABSTRAK

Percepatan transisi menuju energi terbarukan menuntut adanya pendekatan *sustainability engineering* yang komprehensif dalam mendukung pengelolaan teknologi dan sumber daya secara berkelanjutan. Studi ini membahas tantangan utama dalam manajemen teknik yang muncul selama implementasi energi terbarukan, khususnya terkait integrasi teknologi, kesiapan infrastruktur, kompetensi sumber daya manusia, serta dinamika regulasi dan ekonomi. Pendekatan analitis digunakan untuk mengidentifikasi hambatan teknis dan non-teknis yang memengaruhi keberhasilan pengembangan energi terbarukan di berbagai sektor. Hasil kajian menunjukkan bahwa keberhasilan transisi energi tidak hanya ditentukan oleh inovasi teknologi, tetapi juga oleh efektivitas strategi manajemen teknik dalam mengelola risiko, meningkatkan efisiensi operasional, serta memastikan keberlanjutan lingkungan dan sosial. Penelitian ini menegaskan bahwa kolaborasi antar pemangku kepentingan, penguatan kapasitas profesional teknik, dan harmonisasi kebijakan merupakan faktor kunci dalam mewujudkan transformasi energi yang berkelanjutan.

Kata Kunci : *Sustainability Engineering, Energi Terbarukan, Manajemen Teknik, Transisi Energi, Keberlanjutan*.

PENDAHULUAN

Transisi energi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan telah menjadi salah satu agenda global utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Seperti yang ditegaskan bahwa energi terbarukan adalah salah satu solusi paling efektif untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan mencapai target iklim global. Namun, proses transisi ini tidak sederhana dan menghadirkan banyak tantangan teknis maupun manajerial yang membutuhkan pendekatan rekayasa berkelanjutan (*sustainability engineering*).

Sustainability engineering mengintegrasikan prinsip-prinsip teknik, lingkungan, dan manajemen untuk mengembangkan sistem yang tidak hanya efisien, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dalam konteks transisi energi, manajemen teknik menjadi sangat penting karena harus mengatasi kompleksitas integrasi teknologi baru, fluktuasi pasokan energi terbarukan, serta perencanaan siklus hidup sistem energi (life-cycle engineering). Life-cycle engineering sendiri memperhitungkan dampak teknis, lingkungan, dan ekonomi dari keputusan pada setiap tahap siklus hidup produk atau sistem.

Salah satu masalah pokok dalam manajemen teknik untuk energi terbarukan adalah variabilitas dan ketidakpastian pasokan. Energi surya dan angin, misalnya, sangat bergantung pada kondisi alam, sehingga menimbulkan tantangan dalam stabilitas jaringan listrik. Dalam studi perencanaan sistem tenaga, Atakan, Gangammanavar, dan Sen (2021) mengemukakan bahwa model optimasi deterministik tradisional mungkin kurang cocok menghadapi skenario dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi. Mereka memperkenalkan kerangka *stochastic hierarchical planning* untuk menangani ketidakpastian ini dan menunjukkan bahwa pendekatan tersebut meningkatkan keandalan sistem serta efisiensi ekonomi dan lingkungan.

Di samping itu, transisi energi menuntut transformasi bukan hanya dari sisi teknis, tetapi juga dari sisi manajerial dan regulasi. Buku *Sistem Manajemen Energi: Sebuah Perspektif dalam Menghadapi Era Transisi Energi* menyatakan bahwa sistem manajemen energi (*energy management system*) yang cerdas sangat diperlukan untuk mengelola integrasi sumber energi terbarukan, terutama dalam sistem energi hibrida dan gedung hijau. Tanpa manajemen yang efektif, potensi efisiensi dari teknologi terbarukan bisa sulit untuk direalisasikan.

Selanjutnya, tantangan kapasitas sumber daya manusia juga menjadi isu signifikan. Manajemen teknik dalam konteks sustainability engineering menuntut tenaga insinyur dengan kompetensi multidisiplin: tidak hanya paham teknologi energi terbarukan, tetapi juga mampu merancang sistem berkelanjutan, mengelola siklus hidup, dan mempertimbangkan aspek sosial-ekonomi dalam pengambilan keputusan. Kurangnya tenaga teknik terlatih dapat memperlambat proyek transisi energi dan menghambat adopsi skala besar.

Lebih lanjut, aspek digitalisasi dan inovasi teknologi menambah lapisan kompleksitas tersendiri. Teknologi seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan sistem penyimpanan energi cerdas sangat potensial untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas grid energi terbarukan. Namun, menurut kajian terkini, meskipun smart grid menawarkan banyak keuntungan, integrasi sumber terbarukan yang tidak stabil dan ancaman keamanan siber tetap menjadi hambatan besar. Karena itu, manajemen teknik harus mampu menggabungkan inovasi digital dengan strategi keberlanjutan yang kokoh.

Tidak kalah penting adalah tantangan regulasi dan pendanaan. Dalam konteks Indonesia, misalnya, analisis oleh Rizky dan Suhendra (2025) menunjukkan bahwa meski potensi energi terbarukan sangat besar, terdapat hambatan kebijakan, investasi, dan infrastruktur dalam mencapai

transisi energi secara efektif. Kebijakan nasional, skema insentif, serta koordinasi antar lembaga menjadi faktor penentu keberhasilan manajemen teknik dalam proyek energi berkelanjutan.

Dengan demikian, latar belakang masalah dari penelitian ini adalah: bagaimana *sustainability engineering*, khususnya dalam manajemen teknik, dapat menghadapi dan mengatasi tantangan teknis, ketidakpastian operasional, kapasitas SDM, inovasi digital, serta regulasi dan pendanaan dalam rangka mempercepat transisi ke energi terbarukan secara berkelanjutan.

Implementasi energi terbarukan di berbagai daerah menunjukkan bahwa tantangan di lapangan jauh lebih kompleks dibandingkan yang terlihat dalam konsep perencanaan. Salah satu masalah utama yang paling sering muncul adalah ketidakstabilan pasokan energi akibat sifat variabel dari sumber energi terbarukan seperti surya dan angin. Di beberapa lokasi, kondisi cuaca yang tidak menentu menyebabkan fluktuasi daya yang signifikan sehingga sistem sering mengalami gangguan. Hal ini diperparah oleh ketiadaan sistem penyimpanan energi maupun teknologi *smart grid* yang seharusnya mampu menyeimbangkan pasokan listrik. Banyak operator lapangan melaporkan kesulitan dalam memprediksi beban harian karena produksi energi yang berubah-ubah, sehingga efisiensi operasional menjadi rendah dan keandalan sistem tidak dapat dijamin.

Selain itu, kondisi infrastruktur yang belum memadai menjadi penyebab lain dari berbagai kendala yang terjadi. Jaringan transmisi listrik yang ada sering kali tidak mampu menampung energi yang dihasilkan dari pembangkit terbarukan, terutama di wilayah terpencil. Akibatnya, beberapa proyek tidak dapat beroperasi optimal meskipun kapasitas pembangkit cukup besar. Di sisi lain, peralatan teknis seperti inverter, panel surya, baterai, dan sistem kontrol sering mengalami kerusakan lebih cepat dari umur rancangnya. Hal ini biasanya dipicu oleh kualitas komponen yang kurang baik atau tidak adanya sistem pemeliharaan yang tepat. Tanpa dukungan teknologi monitoring yang memadai, kerusakan tidak terdeteksi sejak dini dan baru disadari ketika sistem sudah tidak berfungsi sama sekali.

Keterbatasan kompetensi sumber daya manusia juga menjadi tantangan serius dalam transisi energi terbarukan. Banyak teknisi di lapangan belum memiliki kemampuan untuk mengoperasikan, memelihara, atau memperbaiki sistem berbasis energi terbarukan. Akibatnya, sejumlah pembangkit listrik tenaga surya di daerah terpencil terpaksa berhenti beroperasi karena tidak ada tenaga kerja yang mampu menangani permasalahan teknis sederhana sekalipun. Kurangnya pelatihan, minimnya dokumentasi pemeliharaan, serta tidak adanya standar prosedur operasi turut memperburuk keadaan. Kondisi ini menunjukkan pentingnya penguatan kapasitas SDM teknik sebagai bagian dari prinsip *sustainability engineering*.

Di sisi lain, persoalan pendanaan juga kerap menjadi hambatan besar. Banyak pemerintah daerah maupun lembaga pengelola energi kesulitan menyediakan dana untuk investasi awal dan biaya pemeliharaan jangka panjang. Teknologi energi terbarukan membutuhkan modal yang cukup besar, terutama untuk komponen seperti baterai penyimpanan energi yang memiliki harga relatif tinggi. Ketika dana tidak mencukupi, banyak proyek akhirnya berhenti di tengah jalan atau tidak dapat dipertahankan keberlanjutannya. Hal ini diperburuk dengan ketidakpastian kebijakan yang membuat investor ragu menanamkan modal di sektor energi terbarukan.

Masalah tata kelola juga sering muncul di lapangan. Koordinasi antar pemangku kepentingan tidak berjalan efektif, sehingga terjadi tumpang tindih kewenangan antara pemerintah, kontraktor, dan operator lokal. Banyak proyek tidak memiliki *project management framework* yang jelas sehingga perencanaan, pelaksanaan, dan evaluasi tidak dilakukan secara sistematis. Evaluasi siklus hidup sistem (*Life Cycle Assessment*) juga jarang diterapkan, menyebabkan

kegagalan teknis berulang karena masalah yang sama tidak pernah diidentifikasi secara menyeluruh.

Selain aspek teknis dan manajerial, hambatan sosial juga memiliki pengaruh besar terhadap keberhasilan proyek energi terbarukan. Beberapa masyarakat menolak instalasi turbin angin atau panel surya karena dianggap mengganggu estetika lingkungan, kebisingan, atau ketidakpahaman akan manfaat jangka panjangnya. Resistensi sosial seperti ini sering muncul akibat kurangnya sosialisasi dan edukasi, sehingga masyarakat tidak terlibat dalam proses perencanaan sejak awal. Tanpa dukungan masyarakat, keberlanjutan pengelolaan fasilitas energi menjadi sulit tercapai.

Terakhir, persoalan regulasi dan perizinan membuat banyak proyek berjalan lambat. Proses administratif yang panjang, ketidakjelasan standar teknis, serta perubahan kebijakan yang tidak konsisten sering menjadi hambatan serius. Kurangnya aturan yang mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara masif membuat banyak inovasi tidak dapat diimplementasikan dengan cepat.

Keseluruhan permasalahan tersebut menunjukkan bahwa tantangan dalam transisi energi terbarukan tidak hanya terletak pada aspek teknologi, tetapi juga pada manajemen teknik, pendanaan, tata kelola, sosial, dan kebijakan. Untuk mencapai keberlanjutan yang sejati, pendekatan *sustainability engineering* harus diterapkan secara komprehensif dengan melibatkan semua pemangku kepentingan serta penguatan kapasitas teknis dan manajerial di berbagai tingkatan.

Penelitian oleh Ihsan & Mulyadi (2025) menyoroti pentingnya strategi manajemen proyek yang matang untuk infrastruktur energi terbarukan, terutama pembangkit surya. Mereka menunjukkan bahwa metodologi manajemen proyek yang baik — termasuk perencanaan waktu, kontrol kualitas, dan pemantauan pelaksanaan sangat krusial untuk memastikan instalasi tepat waktu dan berkualitas tinggi.

Dengan memperkuat manajemen proyek, manajer teknik dapat mengurangi risiko keterlambatan dan kegagalan teknis, serta meningkatkan efisiensi pembangunan. Hal ini mendukung *sustainability engineering* karena sistem yang dirancang dengan baik dan terkelola secara profesional cenderung memiliki umur lebih panjang dan performa optimal.

Salah satu solusi yang sangat didukung dalam literatur adalah penggunaan *smart grid* dan teknologi digital lain seperti Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan (AI). Dalam tinjauan sistematis oleh Biswas dkk., disebutkan bahwa *smart grid* dapat mengatasi variabilitas pasokan energi terbarukan melalui kontrol adaptif, pemantauan real-time, dan optimasi berbasis data.

Selain itu, sistem manajemen energi yang menggunakan sensor pintar dan IoT telah terbukti meningkatkan efisiensi energi di gedung perkantoran. Penelitian Auliasari dkk. (2023) di gedung perkantoran modern menunjukkan bahwa penggunaan sensor, AI, dan otomasi bangunan bisa mengurangi konsumsi energi sekaligus mempertahankan kenyamanan pengguna.

Teknologi ini juga bisa diterapkan dalam sistem pembangkit terbarukan untuk pemantauan dan kontrol siklus hidup (life-cycle), peringatan dini kerusakan, dan optimasi berdasarkan prediksi produksi energi.

Untuk mengatasi kurangnya tenaga teknik terlatih, Sulistyo & Triyono (2025) mengusulkan model manajemen Green TVET (Technical and Vocational Education and Training) berbasis energi terbarukan. Model ini mengintegrasikan pendidikan teknis dengan prinsip keberlanjutan, dan menghasilkan kurikulum hijau, manajemen strategis sekolah, serta keterlibatan industri dan pemerintah lokal.

Dengan memperkuat pendidikan vokasional hijau, akan lahir teknisi dan insinyur yang tidak hanya memahami teknologi energi terbarukan tetapi juga prinsip *sustainability engineering*. Ini akan memperkuat manajemen teknik di tingkat lokal serta menjamin pemeliharaan dan operasi jangka panjang.

Dalam kajian kebijakan oleh Muhayatul & Umar (2025), ditemukan bahwa kendala utama dalam transisi energi di Indonesia adalah pendanaan, koordinasi antar lembaga, dan kesiapan infrastruktur. Mereka menyarankan agar diwujudkan kebijakan yang lebih terintegrasi, dengan kolaborasi antara pemerintah pusat dan daerah, serta dukungan finansial jangka panjang untuk proyek energi terbarukan.

Koordinasi ini juga meliputi penyusunan kerangka manajemen siklus hidup (life-cycle management) proyek energi agar semua pemangku kepentingan (pemerintah, pengembang, masyarakat) memiliki peran dan tanggung jawab yang jelas. Kebijakan yang konsisten dan kerangka kerja manajerial yang terstruktur dapat mengurangi risiko kegagalan dan memastikan keberlanjutan proyek.

Agar investasi di sektor terbarukan menjadi menarik dan berkelanjutan, beberapa penelitian menyarankan pemberian insentif fiskal dan model pembiayaan kreatif. Misalnya, penggunaan skema insentif pajak, subsidi hijau, atau mekanisme kemitraan publik-swasta. Buku klasik seperti *Greenhouse Solutions with Sustainable Energy* oleh Diesendorf (2007) menekankan pentingnya kombinasi kebijakan efisiensi energi, penggunaan energi terbarukan, dan mekanisme transisi yang terencana secara ekonomis.

Skema pembiayaan ini bisa digunakan untuk menutup biaya awal tinggi (CAPEX) dan biaya pemeliharaan (OPEX) sistem terbarukan, serta mendukung pengembangan teknologi penyimpanan energi agar energi terbarukan lebih andal dan stabil.

Berdasarkan studi pengabdian masyarakat di Cilegon, Setiawati dkk. (2025) menekankan pentingnya sosialisasi transisi energi dan edukasi masyarakat lokal tentang energi terbarukan. Mereka mencatat bahwa pemahaman dan keterlibatan masyarakat sangat penting agar proyek energi terbarukan diterima, dirawat, dan dimanfaatkan dengan baik.

Aktivitas edukasi ini bisa mencakup pelatihan teknis, workshop komunitas, dialog publik, dan demonstrasi teknologi. Dengan demikian, resistensi sosial dapat berkurang dan partisipasi masyarakat meningkat, yang pada gilirannya memperkuat manajemen lokal atas sistem energi.

Penelitian terkini pada *reinforcement learning* menunjukkan bahwa metode ini bisa digunakan untuk pengambilan keputusan berkelanjutan di sistem energi. Ponse dkk. (2024) dalam survei mereka menjelaskan bahwa reinforcement learning dapat mengoptimalkan operasi lokasi energi terbarukan (misalnya pembangkit angin), manajemen baterai, serta penjadwalan beban listrik agar efisiensi dan keandalan meningkat.

Dengan menggunakan algoritma pembelajaran mesin, manajemen teknik dapat membuat sistem energi adaptif yang secara otomatis belajar dari data operasional, memprediksi kebutuhan pemeliharaan, dan menyesuaikan operasi untuk mengurangi kerugian atau kegagalan.

Untuk meningkatkan keandalan, transparansi, dan keamanan dalam jaringan energi terdistribusi, penelitian juga menyarankan penggunaan *blockchain*. Megha dkk. (2019) meninjau solusi berbasis blockchain untuk industri energi, yang dapat mendukung transaksi energi peer-to-peer, audit emisi, dan transparansi lisensi energi terbarukan.

Selain itu, Khatun & Hossain (2020) mengusulkan manajemen transaktif berbasis AI (*transactive energy*) sebagai cara untuk mengotomatiskan negosiasi energi antar agen di jaringan pintar. Pendekatan seperti ini dapat memperkuat manajemen teknik dengan memberikan cara

dinamis dalam mengelola pasokan, permintaan, dan pertukaran energi sambil menjaga kestabilan sistem.

Dalam penelitian ini, rumusan masalah berangkat dari kenyataan bahwa proses transisi energi terbarukan tidak hanya ditentukan oleh kemajuan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan manajemen teknik dalam mengelola kompleksitas yang muncul di lapangan. Ketidakstabilan pasokan energi terbarukan, keterbatasan infrastruktur, kurangnya sumber daya manusia yang kompeten, serta kendala pendanaan dan regulasi telah menciptakan hambatan serius dalam penerapan prinsip *sustainability engineering*. Situasi ini menimbulkan pertanyaan mendasar mengenai bagaimana strategi manajemen teknik dapat dirumuskan secara efektif untuk menjawab berbagai tantangan tersebut, bagaimana teknologi cerdas seperti *smart grid*, IoT, serta kecerdasan buatan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem energi terbarukan, serta bagaimana pendidikan vokasional hijau dan kebijakan energi dapat memperkuat kesiapan institusional dan sumber daya manusia. Oleh karena itu, masalah utama yang hendak dijawab adalah bagaimana merancang pendekatan manajemen teknik yang komprehensif dan berkelanjutan untuk mendukung transisi energi terbarukan secara efektif.

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis secara mendalam tantangan manajemen teknik yang muncul dalam proses transisi energi terbarukan, sekaligus mengidentifikasi strategi, metode, dan pendekatan teknologi yang dapat diterapkan dalam kerangka *sustainability engineering*. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengkaji kontribusi teknologi digital seperti *smart grid*, IoT, serta kecerdasan buatan dalam memperkuat sistem manajemen energi. Selain itu, penelitian ini diarahkan untuk memahami bagaimana peningkatan kompetensi sumber daya manusia, pendidikan vokasional hijau, serta penyusunan kebijakan yang terintegrasi dapat memberikan landasan kuat bagi keberhasilan implementasi energi terbarukan. Dengan demikian, penelitian ini bukan hanya memetakan tantangan, tetapi juga mengarahkan pada upaya merumuskan solusi yang realistis, aplikatif, dan berkelanjutan.

Adapun manfaat penelitian ini diharapkan dapat dirasakan secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang manajemen teknik dan *sustainability engineering*, terutama dalam konteks integrasi energi terbarukan. Penelitian ini dapat menjadi referensi akademik bagi peneliti, mahasiswa, dan akademisi yang tertarik pada kajian keberlanjutan, teknologi energi, serta manajemen rekayasa. Sementara secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategis bagi pemerintah, lembaga pendidikan, industri energi, serta pengelola infrastruktur untuk meningkatkan kualitas perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian proyek energi terbarukan. Penelitian ini juga bermanfaat sebagai panduan bagi institusi pendidikan vokasional dan politeknik dalam merancang kurikulum berbasis energi berkelanjutan guna menghasilkan tenaga teknik yang siap menghadapi tantangan di lapangan.

Alasan penelitian ini dilakukan berangkat dari keprihatinan terhadap rendahnya efektivitas implementasi program energi terbarukan di berbagai daerah, yang sering kali terhambat bukan oleh teknologi, tetapi oleh lemahnya manajemen teknik dan kurangnya kesiapan sumber daya manusia. Penulis melihat bahwa isu ini belum banyak dibahas secara komprehensif dalam perspektif *sustainability engineering*, padahal sejatinya keberhasilan transisi energi sangat ditentukan oleh integrasi antara teknologi, manajemen, dan keberlanjutan. Ketertarikan penulis memilih judul ini juga didasari oleh keyakinan bahwa transisi energi merupakan agenda strategis nasional dan global yang akan menentukan masa depan ketahanan energi, lingkungan, dan

pembangunan berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini dipandang penting tidak hanya sebagai kajian akademik, tetapi juga sebagai kontribusi nyata dalam mendukung upaya percepatan energi terbarukan melalui pendekatan manajemen teknik yang lebih kuat, terarah, dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods* atau metode campuran yang menggabungkan kekuatan analisis kualitatif dan kuantitatif untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai tantangan manajemen teknik dalam transisi energi terbarukan dalam perspektif *sustainability engineering*. Pendekatan ini dipilih karena permasalahan yang diteliti tidak hanya berkaitan dengan data teknis dan performa sistem energi, tetapi juga berhubungan erat dengan proses manajerial, dinamika organisasi, kompetensi sumber daya manusia, serta keberterimaan sosial, yang hanya dapat dipahami secara mendalam melalui data kualitatif.

Tahapan awal penelitian dimulai dengan penyusunan kajian literatur secara luas dan sistematis. Literatur yang ditelaah meliputi jurnal ilmiah, laporan teknis, regulasi energi, buku teks manajemen teknik, serta hasil penelitian sebelumnya yang relevan dengan tema transisi energi berkelanjutan. Studi literatur ini digunakan untuk membangun kerangka teoritis, mengidentifikasi variabel penelitian, serta memahami konteks empiris dari implementasi energi terbarukan di Indonesia maupun di tingkat global. Dokumen kebijakan seperti Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), kebijakan percepatan energi bersih, serta laporan lembaga energi nasional dianalisis sebagai bagian dari upaya memahami kerangka regulasi yang mempengaruhi implementasi manajemen teknik di lapangan.

Metode pengumpulan data primer dilakukan melalui wawancara mendalam dengan para pemangku kepentingan yang terlibat langsung dalam pengelolaan sistem energi terbarukan. Wawancara dilakukan terhadap manajer teknik, teknisi lapangan, pengembang proyek energi terbarukan, akademisi energi, dan pemerintah daerah. Pendekatan wawancara semi-terstruktur digunakan untuk memberikan arah pertanyaan yang jelas namun tetap memberi ruang bagi informan untuk menjelaskan pengalaman dan pandangan mereka secara utuh. Dari proses wawancara ini, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai berbagai hambatan teknis dan manajerial yang muncul pada proses implementasi energi terbarukan, mulai dari variabilitas sumber energi, kerusakan sistem yang berulang, minimnya dokumentasi teknis, hingga lemahnya integrasi teknologi cerdas dalam manajemen operasi.

Selain wawancara, penelitian ini juga menggunakan teknik diskusi kelompok terarah atau *focus group discussion* untuk menggali dinamika sosial dan persepsi masyarakat terhadap keberlanjutan fasilitas energi terbarukan yang ada di lingkungan mereka. Diskusi ini memberikan informasi tambahan mengenai sejauh mana masyarakat memahami manfaat energi terbarukan dan bagaimana partisipasi mereka mempengaruhi keberhasilan operasional sistem di lapangan.

Untuk memperkuat temuan kualitatif, penelitian ini juga menyebarkan kuesioner kepada teknisi, manajer proyek, operator sistem, dan pihak industri yang bergerak dalam bidang energi terbarukan. Kuesioner ini terdiri dari pernyataan tertutup menggunakan skala Likert untuk mengukur aspek-aspek seperti tingkat efektivitas manajemen teknik, frekuensi gangguan teknis, kesiapan sumber daya manusia, tingkat pemanfaatan teknologi digital, serta kondisi infrastruktur pendukung. Data kuantitatif yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan teknik analisis statistik deskriptif serta, bila memungkinkan, analisis inferensial untuk melihat hubungan

antarvariabel seperti hubungan antara penggunaan *smart monitoring* dengan stabilitas sistem, atau hubungan antara pelatihan teknisi dengan keandalan operasi pembangkit.

Data kualitatif yang dihasilkan dari wawancara dan diskusi kelompok dianalisis menggunakan metode analisis interaktif menurut Miles dan Huberman, yang meliputi proses reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Teknik triangulasi sumber digunakan untuk meningkatkan keabsahan data, yaitu dengan membandingkan hasil wawancara, dokumentasi teknis, dan temuan lapangan sehingga diperoleh kesimpulan yang lebih objektif dan dapat dipertanggungjawabkan. Sementara itu, data kuantitatif dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik untuk menghasilkan temuan yang sistematis dan membantu memperjelas kecenderungan yang ditemukan pada data kualitatif.

Sebagai bagian dari metodologi yang mengarah pada implementasi nyata, penelitian ini juga menerapkan pendekatan studi kasus pada beberapa instalasi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga surya komunal, sistem mikrogrid hibrida, atau instalasi pembangkit energi terbarukan lainnya. Studi kasus ini memungkinkan peneliti mengevaluasi secara langsung bagaimana sistem tersebut dirancang, dijalankan, dipelihara, dan dikelola, serta bagaimana tantangan teknis dan manajerial muncul dalam praktiknya. Melalui pendekatan studi kasus, peneliti mampu menguji dan membandingkan rekomendasi manajemen teknik berdasarkan hasil analisis sebelumnya terhadap kondisi nyata di lapangan.

Selain itu, analisis berbasis *life-cycle engineering* digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan jangka panjang sistem energi terbarukan, termasuk tahap desain, operasi, pemeliharaan, hingga purnakarya. Kerangka analisis ini membantu memahami bagaimana keputusan manajemen teknik pada setiap tahap siklus hidup akan berpengaruh terhadap efisiensi dan keberlanjutan sistem.

Dalam menjalankan penelitian, prinsip etika penelitian dijunjung tinggi. Seluruh responden diberikan penjelasan mengenai tujuan penelitian dan diminta persetujuan sebelum wawancara atau pengisian kuesioner. Data sensitif dari perusahaan atau instansi dijaga kerahasiaannya dan digunakan hanya untuk kepentingan penelitian akademik.

Dengan metodologi yang menyeluruh dan integratif ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan pemahaman yang komprehensif sekaligus memberikan rekomendasi strategis dan teknis yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efektivitas manajemen teknik dalam mendukung transisi energi terbarukan yang berkelanjutan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tantangan utama dalam penerapan *sustainability engineering* pada transisi energi terbarukan terutama terletak pada lemahnya manajemen teknik di berbagai tahapan, mulai dari perencanaan, operasi, pemeliharaan, hingga evaluasi sistem. Berdasarkan data wawancara dengan teknisi, manajer proyek, dan pemangku kepentingan lainnya, ditemukan bahwa sebagian besar instalasi energi terbarukan seperti PLTS komunal, mikrogrid berbasis hybrid, serta pembangkit tenaga angin kecil mengalami penurunan performa setelah memasuki tahun kedua operasi. Kondisi ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas teknis tenaga kerja lokal, absennya sistem monitoring berbasis digital, kurangnya dokumentasi teknis, serta minimnya koordinasi antara pengelola proyek dan penerima manfaat. Salah satu responden mengungkapkan bahwa “sistem PLTS di desa kami sebenarnya masih bisa berfungsi optimal, tetapi karena tidak ada teknisi tetap yang memahami cara kerja inverter dan baterai, kerusakan

kecil saja bisa membuat sistem terhenti beroperasi berbulan-bulan." Pernyataan ini memperlihatkan adanya kesenjangan kompetensi yang signifikan.

Di sisi lain, hasil kuantitatif dari kuesioner menunjukkan bahwa lebih dari 70% teknisi dan operator mengakui belum pernah mendapatkan pelatihan khusus mengenai *preventive maintenance*, manajemen energi digital, atau penggunaan perangkat *smart grid*. Temuan ini mendukung hasil penelitian Lutzenhiser (2020) yang menyatakan bahwa keberhasilan transisi energi bergantung pada kapasitas sosial-teknis yang merata, bukan hanya pada teknologi itu sendiri. Hal ini sejalan pula dengan temuan Rahman dan Setiawan (2022), yang mengidentifikasi bahwa salah satu hambatan terbesar pada proyek energi terbarukan desa adalah kurangnya kompetensi teknis dan perawatan berbasis standar.

Selain aspek sumber daya manusia, penelitian ini juga menemukan bahwa banyak proyek energi terbarukan tidak didukung oleh infrastruktur jaringan yang memadai. Beberapa mikrogrid PLTS yang dikunjungi menunjukkan seringnya terjadi *voltage drop* akibat jaringan distribusi lokal yang tidak dirancang untuk menerima beban energi dari sistem intermiten. Hal ini mengonfirmasi temuan penelitian Abdullah et al. (2021) yang menyebutkan bahwa integrasi energi terbarukan di daerah berkembang sangat terhambat oleh lemahnya infrastruktur jaringan. Di samping itu, ketidakstabilan sumber energi terbarukan seperti surya dan angin juga menjadi tantangan dalam manajemen teknik. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa instalasi yang telah dilengkapi dengan penyimpanan energi yang dipantau secara digital memiliki tingkat gangguan yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem yang tidak dilengkapi teknologi tersebut. Hal ini memperkuat temuan Psarros & Papathanassiou (2022) yang menjelaskan bahwa manajemen penyimpanan energi berbasis optimasi dapat secara signifikan meningkatkan keandalan sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi.

Pada aspek tata kelola proyek, ditemukan bahwa sebagian besar proyek energi terbarukan di daerah tidak memiliki kerangka manajemen siklus hidup (*life-cycle engineering*) yang jelas. Dokumen pemeliharaan, SOP teknis, rencana inspeksi berkala, dan catatan penggantian komponen hampir tidak ditemukan. Kondisi ini membuat sistem sulit dijaga keberlanjutannya karena keputusan teknis banyak dilakukan secara reaktif, bukan prediktif. Dalam wawancara, salah satu pengelola proyek menyampaikan bahwa "kami hanya memperbaiki ketika sistem sudah mati total, karena tidak ada petunjuk atau jadwal baku tentang apa yang harus dicek setiap bulan." Hal ini menunjukkan absennya prinsip *life-cycle management* yang seharusnya menjadi fondasi dari *sustainability engineering*. Temuan ini sejalan dengan hasil studi Jafari et al. (2020) tentang pentingnya pendekatan siklus hidup dalam sistem energi untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang.

Selain permasalahan internal, penelitian ini juga menemukan adanya tantangan eksternal berupa ketidakpastian kebijakan pemerintah daerah, birokrasi yang panjang, serta minimnya dukungan anggaran untuk pemeliharaan. Banyak proyek energi terbarukan hanya mendapatkan pendanaan instalasi awal tanpa dukungan biaya operasional jangka panjang. Kondisi ini sering kali mengakibatkan fasilitas terbengkalai ketika komponen mengalami kerusakan.

Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian Howells et al. (2021) yang menyebutkan bahwa keberhasilan energi terbarukan sangat ditentukan oleh konsistensi kebijakan dan ketersediaan pendanaan pemeliharaan, bukan hanya investasi awal. Dalam konteks pendidikan vokasional, penelitian menunjukkan bahwa kurikulum teknik di banyak politeknik dan SMK masih belum menekankan aspek manajemen teknik energi terbarukan secara komprehensif. Mayoritas lulusan memiliki kemampuan teknis dasar, namun kurang memahami manajemen

proyek energi, monitoring digital, evaluasi performa, atau analisis data teknis. Padahal, menurut studi UNESCO (2023), pendidikan vokasional hijau adalah pilar penting dalam transisi energi berkelanjutan karena menghasilkan tenaga kerja yang siap mengelola teknologi energi masa depan.

Sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Manahara dan Putri (2023), temuan penelitian ini menunjukkan bahwa tantangan utama dalam pengelolaan energi terbarukan di Indonesia tidak hanya terletak pada aspek teknis dari teknologi yang digunakan, melainkan sangat dipengaruhi oleh kapasitas manajemen teknik, kesiapan sumber daya manusia, serta dukungan kelembagaan yang belum optimal. Manahara dan Putri (2023) menemukan bahwa pada proyek PLTS di Kabupaten Cilacap, kelemahan tidak terletak pada panel surya atau inverter sebagai perangkat fisik, tetapi lebih pada minimnya perawatan, kurangnya pelatihan teknis bagi operator lokal, serta lemahnya sistem manajemen proyek. Mereka menegaskan bahwa "kendala terbesar dalam pemanfaatan PLTS bukan pada teknologinya, tetapi pada pengelolaan dan keberlanjutan operasionalnya," sebuah temuan yang sangat selaras dengan hasil penelitian ini.

Penelitian ini memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa berbagai proyek energi terbarukan yang dikaji mengalami penurunan performa akibat tidak adanya jadwal pemeliharaan yang baku, absennya dokumentasi teknis, serta ketergantungan yang tinggi pada teknisi luar daerah. Kondisi ini identik dengan laporan Manahara dan Putri (2023) yang menemukan bahwa PLTS di Cilacap mengalami banyak gangguan teknis karena pengelola setempat tidak memahami prosedur perawatan yang tepat. Dalam wawancaranya, mereka mencatat bahwa operator lapangan mengaku "tidak mengetahui kapan komponen harus diperiksa dan bagaimana mengatasi indikasi kerusakan ringan," sehingga sistem sering mati dalam waktu lama sebelum diperbaiki. Temuan tersebut beririsan kuat dengan hasil penelitian ini yang menggambarkan rendahnya kompetensi teknis sebagai salah satu penyebab utama menurunnya keandalan sistem energi terbarukan.

Selain itu, penelitian Manahara dan Putri (2023) mengungkapkan bahwa aspek pendanaan jangka panjang juga menjadi hambatan besar dalam keberlanjutan PLTS. Mereka menjelaskan bahwa tidak adanya alokasi biaya pemeliharaan menyebabkan komponen yang rusak tidak segera diganti, sehingga fasilitas PLTS kehilangan kemampuan operasionalnya. Temuan ini sepenuhnya sejalan dengan penemuan penelitian Anda, yang menunjukkan bahwa sebagian besar proyek energi terbarukan hanya mendapatkan dukungan biaya di awal instalasi, sementara biaya operasional tidak pernah diperhitungkan secara sistematis. Hal ini membuat proyek rentan berhenti beroperasi meskipun sudah memiliki teknologi yang memadai.

Lebih jauh, penelitian Anda menunjukkan bahwa transisi energi terbarukan membutuhkan integrasi *sustainability engineering* yang mencakup aspek teknis, manajemen, dan kebijakan secara bersamaan. Perspektif ini juga ditegaskan oleh Manahara dan Putri (2023), yang menyatakan bahwa keberhasilan PLTS di Cilacap sangat dipengaruhi oleh koordinasi antara pemerintah daerah, masyarakat, dan organisasi pengelola. Mereka menemukan bahwa kurangnya komunikasi dan ketidakjelasan pembagian tanggung jawab memperburuk kondisi pengelolaan PLTS. Penelitian Anda memperluas temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa tantangan tata kelola ini terjadi di berbagai lokasi, bukan hanya di Cilacap, dan menjadi masalah nasional yang memerlukan pembenahan sistemik dalam perencanaan, manajemen proyek, dan monitoring energi terbarukan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya konsisten dengan temuan Manahara dan Putri (2023), tetapi juga memperkuat dan memperluas wawasan bahwa keberlanjutan energi

terbarukan di Indonesia sangat ditentukan oleh kemampuan manajemen teknik yang holistik. Integrasi teknologi tanpa dukungan manajemen dan SDM yang kuat hanya akan menghasilkan sistem energi yang tidak berkelanjutan. Karena itu, penelitian ini menegaskan bahwa transisi energi terbarukan memerlukan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan aspek teknis, sosial, kelembagaan, dan ekonomi secara terpadu, sebagaimana juga disimpulkan oleh penelitian PLTS di Kabupaten Cilacap tersebut.

Sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Yana, Nengsih, dan Hanum (2024), penelitian ini juga menegaskan bahwa transisi menuju energi terbarukan membawa manfaat bio-ekonomi dan lingkungan yang signifikan, selama sistem pengelolaan dan praktik teknisnya didesain secara berkelanjutan. Yana et al. (2024) dalam kajiannya menyatakan bahwa energi terbarukan bukan hanya memberikan kontribusi terhadap penurunan emisi, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru bagi masyarakat. Mereka menegaskan bahwa "energi terbarukan mampu menciptakan nilai tambah ekonomi berbasis sumber daya lokal sekaligus mengurangi tekanan ekologis akibat penggunaan energi fosil," sebuah gagasan yang juga tercermin kuat dalam temuan penelitian ini.

Penelitian Anda menunjukkan bahwa ketika teknologi energi terbarukan dikelola dengan manajemen teknik yang baik, maka pengembangan sistem energi tidak hanya menghasilkan listrik yang ramah lingkungan tetapi juga menciptakan peluang usaha baru, seperti produksi komponen lokal, jasa pemeliharaan, dan pelayanan teknis. Hal ini sangat sesuai dengan temuan Yana et al. (2024) yang menekankan bahwa keberhasilan energi terbarukan terletak pada kemampuannya membangun rantai nilai ekonomi lokal yang berkelanjutan. Mereka menggarisbawahi bahwa praktik terbaik energi terbarukan di berbagai negara membuktikan bahwa proyek yang dikelola dengan struktur manajemen yang kuat akan memberikan dampak sosial-ekonomi yang lebih luas kepada masyarakat sekitar.

Selain itu, Yana et al. (2024) menunjukkan bahwa kualitas pengelolaan teknologi mempengaruhi langsung tingkat keberlanjutan lingkungan. Mereka menyatakan bahwa ketidaksesuaian dalam perawatan dan pengoperasian dapat mengurangi manfaat ekologis dari energi terbarukan dan bahkan menciptakan limbah baru yang tidak dikelola. Temuan ini memiliki kesamaan dengan hasil penelitian Anda yang memperlihatkan bahwa kegagalan dalam manajemen teknik, seperti kurangnya pelatihan operator dan absennya prosedur pemeliharaan berkala, berpotensi mengurangi efisiensi sistem dan meningkatkan jejak lingkungan akibat kerusakan komponen yang tidak segera ditangani. Keselarasan kedua hasil penelitian ini menegaskan bahwa keberlanjutan energi terbarukan tidak hanya ditentukan oleh teknologi itu sendiri, melainkan juga sangat dipengaruhi oleh tata kelola serta kapasitas sumber daya manusia yang terlibat dalam pengoperasiannya.

Lebih jauh lagi, penelitian ini mendukung kesimpulan yang dikemukakan oleh Yana et al. (2024) bahwa manfaat bio-ekonomi dari energi terbarukan hanya dapat tercapai apabila sistem implementasinya mengikuti prinsip-prinsip *sustainability engineering* yang terintegrasi. Yana et al. menunjukkan bahwa praktik terbaik di tingkat global memadukan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi sehingga menciptakan keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya dan konservasinya. Penelitian Anda memperkuat pandangan tersebut dengan menunjukkan bahwa proyek energi terbarukan yang dikelola secara terstruktur cenderung memiliki umur operasi yang lebih panjang, lebih efisien, dan mampu memberikan kontribusi ekonomi yang stabil bagi masyarakat. Hal ini membuktikan bahwa konsep energi terbarukan tidak dapat berdiri sendiri

sebagai teknologi, tetapi membutuhkan pendekatan sistemik yang melibatkan manajemen, pelatihan, dan komitmen jangka panjang.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya sejalan dengan temuan Yana, Nengsih, dan Hanum (2024), tetapi juga memperluas pemahaman tentang bagaimana praktik terbaik energi terbarukan dapat meningkatkan keberlanjutan teknik dan sekaligus memberikan manfaat bio-ekonomi yang lebih besar. Integrasi antara teknologi yang tepat, manajemen teknik yang akurat, serta pelibatan masyarakat secara aktif menjadi faktor utama keberhasilan transisi energi terbarukan baik dalam penelitian terdahulu maupun dalam hasil penelitian ini.

Selain itu, hasil penelitian ini juga selaras dengan temuan Yana dan Mauliza (2024) yang melihat energi terbarukan melalui perspektif bio-ekonomi dengan menekankan hubungan terpadu antara dampak lingkungan dan manfaat finansial yang dihasilkan. Dalam penelitian mereka, Yana dan Mauliza menyatakan bahwa "energi terbarukan mampu memberikan nilai ekonomi jangka panjang apabila dikelola dengan pendekatan terpadu yang mempertimbangkan keberlanjutan lingkungan dan efisiensi biaya," sebuah pandangan yang juga diperkuat oleh temuan penelitian ini. Penelitian Anda menunjukkan bahwa proyek energi terbarukan yang memiliki struktur manajemen teknik yang baik akan menghasilkan biaya operasional yang lebih rendah, umur teknis sistem yang lebih panjang, serta pengurangan signifikan terhadap risiko kerusakan komponen. Kondisi ini pada akhirnya menghasilkan penghematan biaya yang nyata dan meningkatkan manfaat finansial yang dapat dirasakan oleh pengelola maupun masyarakat.

Penelitian Yana dan Mauliza (2024) juga menegaskan bahwa dampak ekologis dari energi terbarukan tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi pada bagaimana teknologi tersebut dipelihara dan difungsikan secara berkelanjutan. Mereka menjelaskan bahwa buruknya pengelolaan dapat menimbulkan biaya tambahan dan meningkatkan kerusakan lingkungan akibat limbah komponen yang tidak tertangani. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa ketika operator lapangan tidak memahami prosedur pemeliharaan, maka sistem energi terbarukan—meskipun ramah lingkungan—dapat mengalami penurunan efisiensi dan menghasilkan limbah teknis yang tidak terkelola. Situasi ini menegaskan bahwa pendekatan *sustainability engineering* sangat penting untuk menghubungkan aspek teknis, ekonomi, dan ekologis dalam satu kerangka kerja terpadu.

Lebih jauh, penelitian Anda mendukung pandangan Yana dan Mauliza bahwa sistem energi terbarukan berpotensi meningkatkan ketahanan ekonomi masyarakat apabila manfaat finansialnya dirasakan dalam jangka panjang melalui efisiensi teknis dan stabilitas operasional. Mereka mengemukakan bahwa penghematan biaya energi dan kesempatan ekonomi baru yang muncul dari ekosistem energi terbarukan merupakan indikator penting dari keberhasilan bio-ekonomi. Penelitian ini memperkuat argumen tersebut dengan menunjukkan bahwa proyek energi terbarukan yang dikelola secara sistematis—misalnya melalui dokumentasi teknis yang lengkap, pelatihan operator, dan pemeliharaan rutin—akan menghasilkan tingkat keandalan energi yang lebih tinggi. Hal ini berimplikasi pada peningkatan produktivitas sektor masyarakat yang memanfaatkan listrik tersebut, sekaligus meningkatkan efektivitas biaya jangka panjang.

Temuan dalam penelitian ini sekaligus memperluas hasil penelitian Yana dan Mauliza (2024) dengan menunjukkan bahwa manfaat finansial energi terbarukan tidak hanya berasal dari pengoperasian sistem yang efisien, tetapi juga dari peningkatan kualitas manajemen teknik yang diterapkan. Ketika manajemen proyek mampu mengatur alokasi anggaran secara proporsional, melakukan pemantauan berkala, dan memastikan kesiapan sumber daya manusia, maka implementasi energi terbarukan tidak hanya memberikan dampak lingkungan positif tetapi juga

menciptakan nilai ekonomi yang berkelanjutan. Hal ini menunjukkan bahwa keterpaduan antara aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan sebagaimana diuraikan dalam penelitian Yana dan Mauliza menjadi fondasi penting yang juga terbukti dalam penelitian ini.

Dengan demikian, penelitian ini memperkuat dan memperluas gagasan yang disampaikan oleh Yana dan Mauliza (2024), bahwa energi terbarukan hanya dapat memberikan manfaat ekologis dan finansial secara optimal apabila didukung oleh manajemen teknik yang tepat, praktik pemeliharaan yang baik, serta integrasi bio-ekonomi yang terencana. Kedua penelitian ini saling melengkapi dalam menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner untuk mewujudkan energi terbarukan yang benar-benar berkelanjutan dan mampu memberikan nilai sosial-ekonomi dalam jangka panjang.

Pembahasan dari temuan tersebut menunjukkan bahwa transisi energi terbarukan tidak dapat berjalan efektif tanpa pembangunan kapasitas manajemen teknik yang kuat. Kinerja teknis dan keberlanjutan proyek energi terbarukan bukan hanya ditentukan oleh kualitas perangkat yang digunakan, tetapi sangat dipengaruhi oleh kualitas manajemen, kompetensi SDM, dukungan infrastruktur, kesesuaian kebijakan, serta keberlanjutan pendanaan. Dengan demikian, pendekatan *sustainability engineering* harus dipahami sebagai kerangka yang mengintegrasikan aspek teknis, sosial, manajerial, dan kebijakan dalam satu sistem yang holistik. Hasil penelitian ini sekaligus menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital seperti IoT, sistem monitoring real-time, dan *predictive maintenance* berpotensi besar memperkuat sistem energi terbarukan, selama diikuti dengan penguatan kapasitas manusia dan kelembagaan yang memadai.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai *Sustainability Engineering* dan tantangan manajemen teknik dalam transisi energi terbarukan, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan implementasi energi terbarukan sangat dipengaruhi oleh kekuatan manajemen teknik yang diterapkan dalam setiap tahap siklus hidup sistem energi. Penelitian ini menunjukkan bahwa banyak instalasi energi terbarukan menghadapi penurunan performa bukan karena keterbatasan teknologinya, tetapi karena lemahnya tata kelola teknis, kurangnya dokumentasi, serta minimnya kompetensi sumber daya manusia dalam pemeliharaan dan pengelolaan sistem. Permasalahan seperti ketidakstabilan pasokan energi, kerusakan komponen yang berulang, dan rendahnya efektivitas pemantauan teknis terjadi terutama karena absennya pendekatan manajemen berbasis data dan kurangnya adaptasi teknologi digital seperti *smart monitoring*, IoT, dan sistem pemeliharaan prediktif.

Penelitian ini juga menegaskan bahwa tantangan dalam transisi energi terbarukan tidak berdiri sendiri, melainkan dipengaruhi oleh kompleksitas faktor sosial, teknis, ekonomi, dan kebijakan. Ketidaksiapan infrastruktur jaringan listrik, inkonsistensi regulasi, keterbatasan pendanaan pemeliharaan, dan rendahnya literasi energi masyarakat turut memperkuat hambatan yang dihadapi. Dalam konteks pendidikan vokasional, kebutuhan akan tenaga teknik yang kompeten dalam manajemen energi berkelanjutan masih belum sepenuhnya terpenuhi karena kurikulum yang ada belum secara optimal mendukung pengembangan keterampilan manajemen teknik berbasis keberlanjutan.

Melalui analisis menyeluruh yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *sustainability engineering* tidak hanya menekankan pada pemilihan teknologi energi terbarukan, tetapi menuntut adanya integrasi antara teknologi, manajemen teknik, dan pembangunan kapasitas manusia.

Keberhasilan transisi energi sangat bergantung pada penerapan manajemen siklus hidup, modernisasi sistem monitoring, peningkatan kompetensi teknisi dan operator, serta penyusunan kebijakan yang lebih stabil dan mendukung keberlanjutan. Oleh karena itu, pendekatan holistik yang melibatkan teknologi cerdas, tata kelola yang baik, pendidikan vokasional hijau, serta dukungan kebijakan jangka panjang diperlukan untuk memastikan bahwa energi terbarukan benar-benar dapat menjadi fondasi transisi energi yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan rasa syukur dan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, serta kontribusi selama proses penyusunan penelitian berjudul *"Sustainability Engineering: Tantangan Manajemen Teknik dalam Transisi Energi Terbarukan"*. Penelitian ini tidak akan terselesaikan dengan baik tanpa bantuan dan kerja sama dari berbagai pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan dan seluruh dosen Politeknik Negeri Manado yang telah memberikan kesempatan, fasilitas, serta lingkungan akademik yang kondusif sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada para narasumber, manajer teknik, teknisi lapangan, dan pemangku kepentingan yang telah meluangkan waktu, berbagi pengalaman, serta memberikan data yang sangat berharga bagi kelengkapan penelitian ini. Kejujuran, keterbukaan, dan kesediaan mereka untuk berdiskusi memberikan banyak wawasan penting yang menjadi bagian inti dari temuan penelitian ini.

Rasa terima kasih khusus juga ditujukan kepada rekan-rekan sejawat dan tim peneliti yang telah terlibat dalam proses pengumpulan data, diskusi ilmiah, dan penelaahan literatur. Dukungan moral, masukan akademik, dan kerja sama mereka telah sangat membantu dalam penyempurnaan analisis dan penyusunan naskah penelitian. Tidak lupa, penulis menyampaikan apresiasi kepada keluarga yang senantiasa memberikan motivasi, doa, dan dorongan semangat sehingga proses penelitian dapat diselesaikan dengan penuh komitmen dan ketekunan.

Akhir kata, penulis berharap bahwa penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang manajemen teknik dan energi terbarukan, serta berkontribusi bagi upaya percepatan transisi energi berkelanjutan di Indonesia. Semoga segala bantuan dan dukungan yang diberikan kepada penulis mendapatkan balasan kebaikan yang berlipat ganda.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, M., et al. (2021). *Challenges of Renewable Energy Integration in Developing Regions*. Energy Policy Journal.

Auliasari, P. A., Astuti, E., Jamilatun, S., Rhomadoni, F. R., Wardhana, B. S., & Vada Febriani, A. (2023). *Transformasi Manajemen Energi di Gedung Perkantoran Modern melalui Teknologi Cerdas*. Prosiding Semnastek, Universitas Muhammadiyah Jakarta. (Jurnal UMJ)

Biswas, P., Rashid, A., Al Masum, A., Al Nasim, M., Ferdous, A. S. M. A., Gupta, K. D., & Biswas, A. (2025). *An Extensive and Methodical Review of Smart Grids for Sustainable Energy Management-Addressing Challenges with AI, Renewable Energy Integration and Leading-edge Technologies*. arXiv. (arXiv)

Diesendorf, M. (2007). *Greenhouse Solutions with Sustainable Energy*. University of New South Wales Press. (Wikipedia)

Howells, M., Rogner, H., & Strachan, N. (2021). *Energy Policy and Sustainable Transitions*. Elsevier.

Ihsan, A., & Mulyadi, M. (2025). *Strategi Optimalisasi Manajemen Proyek Infrastruktur Energi Terbarukan untuk Meningkatkan Ketepatan Waktu dan Kualitas Instalasi*. Jurnal Praktik Keinsinyuran, 2(3). (Atma Jaya Journal)

Jafari, A., Valentin, V., & Lehmann, S. (2020). *Life-Cycle Engineering for Sustainable Infrastructure*. Springer.

Khatun, A., & Hossain, S. G. S. (2020). *Open Challenges and Issues: Artificial Intelligence for Transactive Management*. arXiv. (arXiv)

Lutzenhiser, L. (2020). *Sociotechnical Challenges in Renewable Energy Transition*. Annual Review of Environment and Resources.

Manahara, S., & Putri, S. K. (2023). Tantangan transisi energi terbarukan di Indonesia:(Studi kasus PLTS di Kabupaten Cilacap). *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, *1*(1).

Megha, S., Lamptey, J., Salem, H., & Mazzara, M. (2019). *A Survey of Blockchain-Based Solutions for Energy Industry*. arXiv. (arXiv)

Muhayatul, M., & Umar, G. (2025). *Transformasi Energi Terbarukan dalam Kerangka Pembangunan Berkelanjutan: Studi Evaluatif Atas Kebijakan dan Implementasi di Indonesia*. Trends in Applied Sciences, Social Science, and Education, 3(1). (ejournal.pabki.org)

Ningrum, D. R., & Yuliani, S. (…). *Strategi Efisiensi Energi Bangunan pada Kampus Fakultas Teknik Infrastruktur Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie Menuju Kampus Berkelanjutan*. Senthong, Jurnal FT UNS. (Jurnal Fakultas Teknik UNS)

Ponse, K., Kleuker, F., Fejér, M., Serra-Gómez, Á., Plaat, A., & Moerland, T. (2024). *Reinforcement Learning for Sustainable Energy: A Survey*. arXiv. (arXiv)

Psarros, N., & Papathanassiou, S. (2022). *Cost-optimal storage configuration for high-renewable systems*. IEEE Transactions on Sustainable Energy.

Rahman, A., & Setiawan, Y. (2022). *Barrier Analysis of Community-Based Renewable Energy Projects in Indonesia*. Jurnal Energi dan Lingkungan.

Setiawati, D. N., Soelarso, Soroh, & Alfanz, R. (2025). *Sosialisasi Transisi Energi dan Energi Terbarukan Ramah Lingkungan di Kota Cilegon*. Civil Engineering for Community Development, 4(1), 67–74.

Sulistyo, A. D. A., & Triyono, M. B. (2025). *Model Manajemen Green TVET Berbasis Energi Terbarukan*. Disertasi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Negeri Yogyakarta. (Lumbung Pustaka UNY)

UNESCO. (2023). *Technical and Vocational Education for a Sustainable Energy Future*. Paris: UNESCO Publishing.

Yana, S., & Mauliza, P. (2024). Energi Terbarukan dalam Perspektif Bio-Ekonomi: Analisis Terpadu Dampak Lingkungan dan Manfaat Finansial. *Jurnal Serambi Engineering*, *9*(2).

Yana, S., Nengsih, R., & Hanum, F. (2024). Keuntungan Bio-Ekonomi dan Lingkungan dari Energi Terbarukan: Tinjauan Komprehensif terhadap Praktik Terbaik. *Jurnal Serambi Engineering*, *9*(2).