

Teknologi Blockchain untuk Optimasi Energi

Blockchain • Smart Grid • Transisi Energi

Oleh

Rudy C Tarumingkeng

(www.rudycr.com/cv.pdf)

RudyCT Academic Series • 2026

TEKNOLOGI **BLOCKCHAIN** UNTUK OPTIMASI ENERGI



SMART GRID



ENERGI TERBARUKAN



EFISIENSI & TRANSPARANSI

Oleh: Rudy C Tarumingkeng

Abstrak

Transformasi energi menuju sistem yang terdesentralisasi, rendah karbon, dan semakin digital menimbulkan kebutuhan baru akan koordinasi antarpelaku, integritas data, serta penyelesaian transaksi berfrekuensi tinggi. Blockchain menawarkan buku besar terdistribusi, mekanisme konsensus, identitas digital, dan kontrak pintar yang dapat mengotomatisasi pertukaran nilai serta verifikasi data di antara pihak-pihak yang tidak sepenuhnya saling percaya. Artikel ini menjelaskan secara kritis peran blockchain dalam optimasi energi, terutama perdagangan energi antarpengguna, pengelolaan sumber daya energi terdistribusi, respons permintaan, kendaraan listrik, sertifikat energi terbarukan, pembiayaan aset hijau, dan pemeliharaan infrastruktur. Optimasi tidak dipahami hanya sebagai minimisasi biaya, melainkan sebagai peningkatan efisiensi, fleksibilitas, ketahanan, transparansi, dan keberlanjutan sistem. Analisis menunjukkan bahwa blockchain bukan pengganti jaringan listrik, sistem kendali waktu nyata, ataupun algoritma optimasi. Nilainya muncul ketika dipadukan dengan smart meter, Internet of Things, analitik data, kecerdasan buatan, dan mekanisme pasar yang dirancang dengan baik. Implementasi yang layak umumnya menggunakan jaringan berizin dan konsensus hemat energi, dengan tata kelola, perlindungan data, interoperabilitas, serta regulasi yang jelas. Untuk Indonesia, penerapan bertahap melalui microgrid kepulauan, kawasan industri, komunitas surya, dan ekosistem pengisian kendaraan listrik dapat menjadi laboratorium kebijakan sekaligus sarana mempercepat transisi energi yang inklusif.

Kata Kunci: blockchain; optimasi energi; smart grid; perdagangan energi peer-to-peer; energi terbarukan; kontrak pintar; sumber daya energi terdistribusi; transisi energi

1. Pendahuluan

Sistem energi dunia sedang berubah dari arsitektur yang relatif linear menuju ekosistem yang lebih terdistribusi. Pada model lama, listrik terutama mengalir dari pembangkit besar menuju jaringan transmisi, jaringan distribusi, lalu konsumen. Pada model baru, konsumen dapat sekaligus menjadi produsen atau prosumer melalui panel surya atap, baterai, kendaraan listrik, dan perangkat pengelola beban. Arus listrik, data, dan pembayaran menjadi dua arah. Perubahan ini memperluas pilihan teknologi, tetapi juga meningkatkan kompleksitas koordinasi.

Energi terbarukan variabel seperti surya dan angin tidak selalu menghasilkan listrik pada saat permintaan mencapai puncak. Sistem membutuhkan fleksibilitas melalui penyimpanan energi, respons permintaan, interkoneksi, pembangkit yang dapat diatur, serta pengelolaan beban secara cerdas. Di sisi lain, jutaan perangkat kecil dapat menawarkan fleksibilitas dalam jumlah yang signifikan apabila dapat diukur, dihimpun, diverifikasi, dan diberi imbalan. Persoalannya bukan hanya teknis. Pelaku harus menyepakati siapa menghasilkan atau mengurangi berapa kilowatt-jam, kapan tindakan terjadi, bagaimana kualitas data diperiksa, serta bagaimana pembayaran diselesaikan.

Blockchain muncul sebagai salah satu teknologi koordinasi digital untuk menghadapi persoalan tersebut. Teknologi ini memungkinkan catatan transaksi disalin dan disepakati oleh beberapa simpul jaringan. Transaksi dapat diprogram melalui kontrak pintar sehingga aturan pasar, pembayaran, jaminan, dan verifikasi dapat dieksekusi secara otomatis. Namun, antusiasme terhadap blockchain sering melahirkan klaim berlebihan. Tidak semua basis data perlu diganti blockchain, tidak semua sistem harus sepenuhnya terdesentralisasi, dan tidak semua mekanisme konsensus layak dari sudut energi.

Kajian Andoni et al. (2019) menunjukkan luasnya kemungkinan penggunaan blockchain di sektor energi, mulai dari perdagangan grosir sampai pengelolaan aset. Akan tetapi, kajian yang lebih mutakhir juga mengingatkan bahwa banyak proyek berhenti pada tahap prototipe dan tidak sedikit proyek industri yang tidak lagi aktif (Zhao et al., 2023). Karena itu, pertanyaan yang relevan bukan “apakah blockchain revolusioner”, melainkan: masalah koordinasi apa yang benar-benar diselesaikan, manfaat apa yang lebih besar daripada biaya, dan bagaimana teknologi ini ditempatkan di dalam tata kelola energi yang bertanggung jawab.

Artikel ini menggunakan pengertian optimasi secara luas. Optimasi mencakup minimisasi biaya operasi dan emisi, pengurangan rugi-rugi jaringan, peningkatan pemanfaatan energi terbarukan, pemeliharaan keandalan, penguatan keamanan data, serta pembagian manfaat yang adil. Fokus ini penting karena solusi yang murah tetapi rentan, tidak inklusif, atau meningkatkan emisi komputasi tidak dapat disebut optimal secara sosial.

2. Fondasi Konseptual Blockchain

Blockchain merupakan bentuk distributed ledger technology atau DLT. Catatan transaksi tidak dikuasai oleh satu basis data tunggal, tetapi direplikasi pada simpul-simpul yang mengikuti protokol bersama. Transaksi dikelompokkan, diberi cap waktu, dihubungkan secara kriptografis,

dan diterima setelah mekanisme konsensus menyatakan valid. Perubahan catatan historis menjadi sulit karena memerlukan persetujuan sesuai aturan jaringan dan akan meninggalkan jejak audit.

Empat unsur penting perlu dibedakan. Pertama, buku besar terdistribusi menyediakan pandangan bersama tentang status transaksi. Kedua, kriptografi mengamankan identitas, tanda tangan digital, dan keterkaitan catatan. Ketiga, konsensus menentukan bagaimana simpul menyetujui urutan dan validitas transaksi. Keempat, kontrak pintar mengeksekusi aturan bisnis ketika syarat yang ditentukan terpenuhi. Dalam pasar energi lokal, misalnya, kontrak pintar dapat mencocokkan penawaran energi surya dengan permintaan tetangga, memeriksa batas transaksi, dan menghitung pembayaran.

Blockchain publik mengizinkan partisipasi yang luas, sedangkan blockchain berizin membatasi validator dan akses berdasarkan identitas. Sektor energi biasanya melibatkan operator jaringan, regulator, agregator, pemasok, dan pelanggan yang memiliki kewajiban hukum. Karena itu, jaringan konsorsium berizin sering lebih sesuai. Model tersebut memungkinkan kontrol akses, finalitas transaksi yang lebih cepat, kapasitas lebih tinggi, serta mekanisme pemulihan ketika terjadi kesalahan. Desentralisasi dalam konteks ini bukan berarti tidak ada otoritas, melainkan otoritas dan hak validasi dibagi berdasarkan tata kelola yang disepakati.

Kritik mengenai konsumsi listrik blockchain terutama berasal dari proof-of-work yang mengandalkan kompetisi komputasi. Menggunakan mekanisme tersebut untuk optimasi energi dapat menciptakan kontradiksi ekologis. Alternatif seperti proof-of-stake, proof-of-authority, Practical Byzantine Fault Tolerance, dan konsensus berbasis validator terpilih jauh lebih hemat energi. Pemilihan konsensus harus mempertimbangkan jumlah simpul, toleransi gangguan, finalitas, kebutuhan privasi, latensi, dan kemungkinan kolusi.

Blockchain juga tidak dapat mengetahui keadaan fisik dengan sendirinya. Informasi produksi listrik, kondisi baterai, atau pengurangan beban berasal dari smart meter, sensor, sistem SCADA, atau oracle. Jika sensor salah atau dimanipulasi, blockchain hanya mengabadikan data yang keliru. Prinsip garbage in, garbage out tetap berlaku. Oleh sebab itu, keamanan perangkat, kalibrasi meter, autentikasi sumber data, dan mekanisme penyelesaian sengketa merupakan bagian integral dari desain.

Data berukuran besar sebaiknya tidak seluruhnya disimpan on-chain. Penyimpanan on-chain dapat mahal, lambat, dan bertentangan dengan kewajiban perlindungan data. Arsitektur hibrida menyimpan bukti berupa hash, status transaksi, dan persetujuan di blockchain, sedangkan data rinci disimpan secara aman di luar rantai. Hash memungkinkan pemeriksaan apakah data telah berubah tanpa memublikasikan seluruh isinya. Pendekatan ini mempertemukan integritas, efisiensi, dan privasi.

3. Makna Optimasi Energi

Dalam teknik tenaga listrik, optimasi biasanya dirumuskan sebagai pemilihan keputusan terbaik di bawah sejumlah kendala. Fungsi tujuan dapat berupa biaya pembangkitan minimum,

emisi minimum, rugi-rugi minimum, atau kesejahteraan sosial maksimum. Kendalanya meliputi keseimbangan pasokan-permintaan, kapasitas saluran, batas tegangan, kemampuan pembangkit, kondisi baterai, dan standar keandalan. Algoritma seperti optimal power flow, unit commitment, economic dispatch, dan model predictive control melakukan perhitungan tersebut.

Blockchain bukan algoritma pengganti perhitungan itu. Fungsinya berada pada lapisan koordinasi dan kepercayaan. Algoritma optimasi dapat menghitung jadwal terbaik, sedangkan blockchain mencatat tawaran, memastikan aturan, mendistribusikan hasil, dan menyelesaikan pembayaran. Pemisahan peran ini sangat penting. Menempatkan seluruh perhitungan kompleks di kontrak pintar dapat meningkatkan biaya dan memperlambat sistem. Pola yang lebih tepat ialah computation off-chain, verification on-chain: optimasi dilakukan oleh mesin yang sesuai, sementara input penting, bukti hasil, dan transaksi dicatat pada ledger.

Optimasi energi modern bersifat multiobjektif. Operator jaringan ingin menjaga tegangan dan frekuensi; konsumen ingin harga terjangkau; pemilik panel surya menginginkan pendapatan; pemerintah ingin menurunkan emisi; masyarakat mengharapkan akses yang adil. Solusi yang optimal bagi satu aktor belum tentu optimal bagi sistem. Blockchain dapat meningkatkan keterlacakan pembagian nilai, tetapi tidak menentukan tujuan sosial secara otomatis. Bobot kepentingan, aturan tarif, perlindungan konsumen, dan hak akses tetap merupakan keputusan kebijakan.

Nilai ekonomi blockchain paling kuat ketika terdapat banyak organisasi, transaksi berulang, kebutuhan audit, dan kepercayaan yang tidak dapat diserahkan kepada satu pihak. Jika satu operator telah dipercaya, volume transaksi rendah, dan basis data terpusat bekerja efisien, blockchain mungkin menambah kompleksitas tanpa manfaat. Uji kelayakan karena itu harus membandingkan blockchain dengan alternatif terpusat berdasarkan total biaya kepemilikan, risiko, latensi, keamanan, serta kemudahan regulasi.

4. Perdagangan Energi Peer-to-Peer

Perdagangan energi peer-to-peer atau P2P memungkinkan prosumer menjual surplus listrik kepada pengguna lain dalam komunitas atau pasar lokal. Contohnya, rumah A menghasilkan surplus surya pada siang hari, rumah B membutuhkan listrik untuk pendinginan, dan gedung C memiliki baterai yang dapat menyerap kelebihan produksi. Platform mempertemukan tawaran dan permintaan, sementara jaringan fisik tetap mengalirkan listrik sesuai hukum kelistrikan.

Blockchain dapat memberi identitas kepada peserta, mencatat tawaran, menyimpan hasil pencocokan, dan mengeksekusi pembayaran. Mengelkamp et al. (2018) membahas desain pasar microgrid Brooklyn dan menunjukkan bahwa keberhasilan tidak bergantung pada teknologi saja, tetapi juga pada rancangan pasar. Harga dapat ditentukan melalui lelang ganda, harga komunitas, atau mekanisme lain. Kontrak pintar dapat mengotomatisasi settlement berdasarkan bacaan meter yang telah diverifikasi.

Manfaat potensialnya adalah transparansi, biaya administrasi yang lebih rendah, akses pasar bagi aset kecil, serta insentif untuk memakai energi lokal. Jika energi dikonsumsi dekat lokasi

produksi, beberapa rugi-rugi dan kemacetan dapat dikurangi. Namun, transaksi komersial tidak boleh mengabaikan kondisi fisik. Dua rumah dapat “sepakat” secara digital, tetapi aliran elektron mengikuti impedansi jaringan. Karena itu, operator distribusi harus memasukkan batas tegangan, kapasitas transformator, dan biaya penggunaan jaringan ke aturan pasar.

Tarif jaringan yang terlalu sederhana dapat menghasilkan subsidi silang. Prosumer mungkin menggunakan jaringan untuk menjual energi tetapi tidak membayar cukup untuk biaya pemeliharaan. Sebaliknya, biaya jaringan yang berlebihan dapat mematikan inovasi. Desain yang lebih baik memisahkan nilai energi, jasa jaringan, fleksibilitas, dan atribut lingkungan. Blockchain membantu mencatat komponen-komponen itu, tetapi struktur harga tetap memerlukan analisis ekonomi dan keputusan regulator.

Kasus ilustratif dapat dilihat pada sebuah perumahan dengan 100 rumah, 40 panel surya, 15 baterai, dan satu fasilitas publik. Setiap lima belas menit, smart meter mengirim bacaan bertanda tangan. Algoritma lokal memprediksi surplus dan kebutuhan, kemudian menyusun transaksi yang memenuhi batas jaringan. Ledger menyimpan ringkasan transaksi, harga, dan bukti meter. Pada akhir periode, kontrak pintar menghitung saldo. Bila sebuah meter gagal, aturan fallback menggunakan estimasi konservatif dan transaksi ditandai untuk audit. Sistem demikian bukan pasar tanpa institusi, melainkan pasar yang institusinya diterjemahkan sebagian ke dalam kode.

5. Sumber Daya Energi Terdistribusi dan Virtual Power Plant

Distributed energy resources mencakup panel surya, turbin angin kecil, baterai, generator terkendali, pompa panas, kendaraan listrik, dan beban fleksibel. Secara individual kapasitasnya kecil, tetapi secara agregat dapat memberikan daya, cadangan, pengaturan frekuensi, atau pengurangan beban. Virtual power plant mengoordinasikan aset tersebut agar bertindak seperti satu portofolio.

Hambatan utama adalah heterogenitas perangkat, kepemilikan yang tersebar, dan biaya verifikasi. Blockchain dapat menyediakan registri aset, identitas perangkat, status kepemilikan, izin operasi, dan riwayat kontribusi. Kontrak pintar dapat membagikan pembayaran sesuai kinerja aktual. Misalnya, ketika operator meminta pengurangan beban 500 kW, agregator mengirim sinyal ke ribuan perangkat. Data respons dihimpun di luar rantai, diverifikasi, lalu bukti dan pembayarannya dicatat pada ledger.

Arsitektur ini mengurangi sengketa mengenai siapa melakukan apa dan kapan. Ia juga dapat memudahkan perpindahan aset antaragregator karena riwayat kinerja dapat dibawa secara terkontrol. Namun, interoperabilitas dengan standar perangkat dan protokol kelistrikan tetap menjadi syarat. Blockchain yang berdiri sendiri akan menjadi pulau digital baru. Antarmuka pemrograman, model data, identitas, dan semantik harus disepakati sehingga aset dari berbagai produsen dapat berkomunikasi.

Optimasi portofolio tetap membutuhkan ramalan cuaca, pola konsumsi, harga pasar, degradasi baterai, dan preferensi pelanggan. Kecerdasan buatan dapat memprediksi produksi dan beban, sedangkan blockchain menyediakan data provenance dan jejak keputusan.

Kombinasi keduanya menjanjikan, tetapi perlu kontrol terhadap bias algoritma, serangan data, dan tanggung jawab ketika rekomendasi salah.

6. Respons Permintaan dan Fleksibilitas

Respons permintaan mengubah konsumsi sebagai reaksi terhadap harga atau sinyal operator. Pelanggan dapat menunda pengisian kendaraan listrik, menaikkan suhu pendingin beberapa derajat, atau mengurangi proses nonkritik saat sistem mengalami puncak. Fleksibilitas tersebut bernilai karena dapat mengurangi kebutuhan pembangkit puncak dan investasi jaringan.

Blockchain memungkinkan komitmen fleksibilitas dibuat secara transparan. Pelanggan atau agregator menawarkan kapasitas, waktu, durasi, dan harga. Setelah kejadian, baseline konsumsi dibandingkan dengan konsumsi aktual. Kontrak pintar membayar respons yang terverifikasi dan menerapkan penalti apabila komitmen tidak dipenuhi. Koukaras et al. (2024) menekankan potensi integrasi blockchain dalam demand response, bersama tantangan skalabilitas, interoperabilitas, dan regulasi.

Masalah baseline tidak sederhana. Pengurangan beban adalah sesuatu yang tidak terjadi, sehingga harus dibandingkan dengan estimasi kontrafaktual. Peserta dapat memiliki insentif menaikkan baseline agar tampak memberikan pengurangan besar. Blockchain tidak menghilangkan masalah metodologis ini. Model baseline harus diaudit, data cuaca dan operasi dipertimbangkan, serta peluang manipulasi ditekan. Ledger dapat menyimpan versi model dan bukti input agar evaluasi dapat direproduksi.

Privasi juga penting karena data beban beresolusi tinggi dapat mengungkap kebiasaan penghuni. Penyimpanan agregat, enkripsi, kontrol akses, zero-knowledge proof, dan pemrosesan lokal dapat mengurangi paparan. Prinsip minimisasi data berarti hanya data yang diperlukan untuk validasi yang dibagikan. Transparansi transaksi tidak boleh disamakan dengan keterbukaan seluruh kehidupan pelanggan.

7. Kendaraan Listrik dan Penyimpanan Energi

Kendaraan listrik merupakan beban baru sekaligus sumber fleksibilitas. Pengisian yang tidak terkoordinasi dapat memperbesar puncak permintaan, sedangkan smart charging dapat memindahkan konsumsi ke jam rendah beban atau saat energi terbarukan melimpah. Vehicle-to-grid bahkan memungkinkan baterai kendaraan menyalurkan daya kembali ke jaringan.

Ekosistem pengisian melibatkan pemilik kendaraan, operator stasiun, penyedia layanan mobilitas, pemasok listrik, operator jaringan, dan produsen kendaraan. Blockchain dapat mendukung identitas lintasoperator, roaming, otorisasi pengisian, pencatatan energi, serta settlement otomatis. Pengguna tidak perlu membuka akun terpisah pada setiap jaringan pengisian jika identitas dan pembayaran dapat diakui bersama.

Kontrak pintar dapat mengatur preferensi: kendaraan harus mencapai tingkat muatan minimum sebelum pukul enam pagi, hanya mengisi di bawah harga tertentu, dan boleh

memberikan jasa jaringan sepanjang dampak degradasi baterai dibayar. Algoritma optimasi menentukan jadwal berdasarkan harga, kondisi jaringan, dan kebutuhan pengguna. Ledger mencatat persetujuan, pelaksanaan, serta kompensasi.

Risiko baru muncul dalam bentuk pelacakan lokasi, pencurian identitas perangkat, dan serangan terhadap banyak charger. Desain harus menggunakan pseudonim yang dapat diperbarui, autentikasi kuat, segmentasi jaringan, dan mekanisme penghentian darurat. Keselamatan fisik tidak boleh bergantung pada konsensus blockchain; proteksi lokal harus tetap bekerja ketika komunikasi terputus.

8. Sertifikat Energi Terbarukan, Karbon, dan Ketertelusuran

Perusahaan semakin perlu membuktikan bahwa konsumsinya berasal dari sumber terbarukan. Sistem sertifikat tradisional menghadapi risiko duplikasi klaim, rekonsiliasi lambat, dan fragmentasi registri. Blockchain dapat mencatat penerbitan, perpindahan, dan retirement sertifikat sehingga satu unit atribut lingkungan tidak diklaim dua kali.

Setiap megawatt-jam listrik terbarukan yang memenuhi syarat dapat menghasilkan token representatif setelah data meter diverifikasi. Token berpindah kepada pembeli dan dimusnahkan atau ditandai retired ketika digunakan untuk klaim. Jejak audit memudahkan pemeriksaan, tetapi kualitas klaim tetap ditentukan oleh standar. Blockchain tidak dapat memastikan additionality hanya dari transaksi. Apakah pembelian benar-benar mendorong kapasitas baru memerlukan informasi proyek, waktu, lokasi, dan metodologi.

Prinsip serupa berlaku pada kredit karbon dan hidrogen rendah karbon. Data asal energi, intensitas emisi, proses produksi, transportasi, dan kepemilikan dapat dirangkai sebagai digital product passport. Integrasi sensor dengan ledger meningkatkan keterlacakan rantai pasok. Namun, oracle, lembaga verifikasi, dan audit lapangan tetap diperlukan. Keabadian catatan bukan jaminan kebenaran klaim awal.

Bagi Indonesia, ketertelusuran dapat mendukung ekspor produk hijau, pengadaan listrik terbarukan, dan pembiayaan proyek. Sistem harus selaras dengan registri nasional, aturan perdagangan karbon, serta pengakuan internasional. Membuat token baru tanpa hubungan hukum dengan sertifikat resmi hanya akan menciptakan aset digital yang tidak memiliki legitimasi.

9. Pembiayaan, Operasi, dan Pemeliharaan Aset

Transisi energi memerlukan investasi besar, termasuk proyek skala kecil yang biaya transaksinya sering terlalu tinggi bagi pembiayaan konvensional. Tokenisasi dapat merepresentasikan hak ekonomi atas proyek surya komunitas, microgrid, atau efisiensi energi. Kontrak pintar dapat membagikan pendapatan berdasarkan produksi aktual. Catatan aset dan arus kas yang dapat diaudit berpotensi mengurangi asimetri informasi.

Meski demikian, token bukan jalan pintas untuk menghindari regulasi sekuritas, perlindungan investor, uji kelayakan, dan manajemen risiko. Hubungan antara token dan hak hukum harus jelas. Risiko konstruksi, curtailment, perubahan tarif, gagal bayar, dan kerusakan aset tetap ada. Blockchain memperbaiki administrasi, bukan menghapus fundamental proyek.

Pada operasi dan pemeliharaan, ledger dapat menyimpan hash dokumen inspeksi, suku cadang, pembaruan perangkat lunak, dan riwayat servis. Teknisi menandatangani pekerjaan secara digital; sensor menyediakan indikator kondisi; model prediktif memperkirakan kegagalan. Ketika ambang tercapai, work order dapat dibuat otomatis dan penyedia dibayar setelah bukti pekerjaan diterima. Jejak asal suku cadang membantu mencegah komponen palsu.

Desain perlu menghindari otomatisasi buta. Sensor dapat gagal, pekerjaan dapat memerlukan penilaian manusia, dan pembayaran otomatis dapat salah. Kontrak harus menyediakan jeda, otorisasi bertingkat, mekanisme banding, serta prosedur pemulihan. Smart contract yang baik bukan kontrak yang meniadakan manusia, melainkan kontrak yang menjelaskan kapan mesin bertindak dan kapan keputusan dikembalikan kepada pihak berwenang.

10. Keamanan Siber, Privasi, dan Ketahanan

Desentralisasi dapat mengurangi single point of failure, tetapi tidak membuat sistem kebal. Kunci privat dapat dicuri, kontrak pintar dapat memiliki celah, validator dapat berkolusi, dan jembatan antarsistem dapat diserang. Infrastruktur energi merupakan infrastruktur kritis; konsekuensi gangguan melampaui kerugian finansial.

Keamanan harus dirancang berlapis. Perangkat menggunakan secure element dan pembaruan bertanda tangan. Komunikasi dienkripsi. Identitas dan hak akses mengikuti prinsip least privilege. Kontrak pintar menjalani audit, pengujian formal, dan simulasi skenario ekstrem. Validator ditempatkan pada organisasi berbeda, dipantau, dan memiliki prosedur penggantian. Cadangan data dan mode operasi manual disediakan.

Pemisahan antara teknologi informasi dan teknologi operasional sangat penting. Blockchain dapat menangani transaksi dan koordinasi, sementara sistem proteksi, SCADA, dan kontrol lokal mempertahankan fungsi keselamatan dengan latensi deterministik. Alladi et al. (2019) mengidentifikasi penggunaan blockchain dalam perdagangan P2P, agregasi data, kontrol distribusi, dan pemeliharaan, tetapi penerapan praktis tetap harus memenuhi kebutuhan real-time dan keamanan smart grid.

Privasi memerlukan pendekatan privacy by design. Alamat pseudonim belum tentu anonim karena pola transaksi dapat dikaitkan dengan individu. Informasi pelanggan harus dipilah: data publik, data konsorsium, data terbatas, dan data pribadi. Hak koreksi atau penghapusan dapat bertentangan dengan sifat catatan yang sulit diubah. Salah satu solusi ialah tidak menyimpan data pribadi mentah di rantai, melainkan menyimpan hash atau bukti persetujuan, sementara data berada pada repositori yang dapat dikelola sesuai hukum.

Ketahanan juga bersifat organisasional. Siapa berwenang menghentikan kontrak ketika pasar kacau? Bagaimana keputusan dibuat ketika validator tidak sepakat? Bagaimana perangkat lama tetap beroperasi? Pertanyaan tersebut harus dijawab dalam governance charter, bukan diserahkan kepada kode. Resiliensi muncul dari kombinasi teknologi, prosedur, kompetensi, dan akuntabilitas.

11. Keterbatasan dan Risiko Implementasi

Pertama, skalabilitas. Jutaan meter yang mengirim data setiap detik akan membanjiri banyak blockchain. Solusinya adalah agregasi, kanal transaksi, layer kedua, pencatatan periodik, dan penyimpanan off-chain. Tidak semua perubahan sensor merupakan transaksi ekonomi yang perlu konsensus.

Kedua, latensi. Sistem tenaga membutuhkan keputusan dari milidetik sampai menit, sedangkan finalitas blockchain dapat lebih lambat atau tidak pasti. Proteksi dan kontrol primer harus tetap lokal. Blockchain lebih sesuai untuk settlement, koordinasi jadwal, registrasi, dan audit yang toleran terhadap latensi lebih tinggi.

Ketiga, interoperabilitas. Platform yang berbeda dapat memakai identitas, token, dan model data berbeda. Tanpa standar, aset terkunci dalam ekosistem vendor. Penggunaan protokol terbuka, API, standar metering, serta model data bersama harus menjadi persyaratan pengadaan.

Keempat, aspek hukum. Smart contract belum selalu identik dengan kontrak hukum. Kesalahan kode, keadaan kahar, perlindungan konsumen, pajak, lisensi, dan yurisdiksi memerlukan aturan. Harus ada dokumen hukum yang menghubungkan tindakan digital dengan hak dan kewajiban nyata.

Kelima, tata kelola. Jaringan berizin memerlukan keputusan tentang keanggotaan, hak suara, pembaruan perangkat lunak, biaya, audit, dan sanksi. Jika satu anggota dominan, desentralisasi dapat menjadi simbolis. Jika semua keputusan membutuhkan konsensus luas, perubahan menjadi lambat. Model tata kelola harus menyeimbangkan legitimasi dan kelincahan.

Keenam, risiko eksklusi. Rumah tangga tanpa modal untuk panel surya, perangkat pintar, atau konektivitas dapat tidak menikmati manfaat. Tarif dinamis juga dapat merugikan pengguna yang tidak mampu memindahkan beban. Program harus menyediakan agregasi yang mudah, subsidi perangkat, opsi perlindungan tarif, dan mekanisme berbagi manfaat.

Ketujuh, jejak lingkungan. Blockchain hemat energi sekalipun tetap memakai server dan perangkat. Evaluasi lifecycle perlu membandingkan konsumsi komputasi dengan penghematan energi dan emisi yang benar-benar tercapai. Keberlanjutan tidak boleh dinilai dari label teknologi, melainkan dari hasil bersih.

Kedelapan, hype dan lock-in. Proyek dapat dimulai karena tren, bukan masalah nyata. Vendor dapat menjual tokenisasi sebagai tujuan. Organisasi perlu memulai dari pain point, membangun business case, dan menetapkan indikator keberhasilan. Zhao et al. (2023)

menunjukkan perlunya penilaian kematangan yang realistis karena jumlah publikasi dan pilot tidak otomatis berarti adopsi industri.

12. Kerangka Keputusan: Kapan Blockchain Layak Digunakan?

Sebuah organisasi dapat menggunakan enam pertanyaan penyaring. Pertama, apakah terdapat lebih dari satu organisasi yang perlu menulis atau memverifikasi data? Kedua, apakah para pihak memiliki kepentingan berbeda dan tidak ingin menyerahkan kontrol penuh kepada satu pihak? Ketiga, apakah jejak audit bersama bernilai tinggi? Keempat, apakah aturan transaksi dapat diprogram? Kelima, apakah basis data bersama biasa atau lembaga tepercaya lebih mahal atau kurang dapat diterima? Keenam, apakah manfaat melebihi biaya integrasi dan tata kelola?

Jika jawaban utama adalah tidak, basis data konvensional mungkin lebih baik. Bila jawabannya ya, pilihan berikutnya adalah jenis ledger. Untuk energi, permissioned consortium lazim menjadi titik awal. Validator dapat terdiri atas operator jaringan, badan pasar, regulator atau auditor, agregator, dan perwakilan komunitas. Hak baca dan tulis dibedakan berdasarkan fungsi.

Business case harus mengukur manfaat operasional dan strategis. Indikator dapat mencakup waktu settlement, biaya rekonsiliasi, jumlah sengketa, pemanfaatan energi lokal, penurunan puncak beban, curtailment terhindarkan, peningkatan pendapatan prosumer, emisi yang dihindari, uptime, latensi, dan kepuasan pelanggan. Baseline sebelum pilot diperlukan agar dampak tidak hanya berupa testimoni.

Penilaian juga harus memasukkan opsi “tidak menggunakan blockchain”. Proof of concept yang adil membandingkan prototipe blockchain dengan arsitektur terpusat yang dirancang baik. Jika blockchain hanya menyamai kinerja tetapi jauh lebih rumit, organisasi harus berani menghentikannya. Sebaliknya, bila ledger bersama mengurangi rekonsiliasi antarlembaga dan membuka layanan baru, nilai strategisnya dapat membenarkan investasi.

13. Peta Jalan Implementasi

Tahap pertama adalah problem framing. Organisasi memetakan aliran energi, data, pembayaran, kewenangan, dan titik sengketa. Tim harus melibatkan ahli sistem tenaga, teknologi informasi, hukum, ekonomi, keamanan, dan pengguna. Hasilnya berupa use case sempit dengan nilai terukur, bukan visi yang terlalu luas.

Tahap kedua adalah desain institusional. Peserta menyepakati peran, kepemilikan data, aturan validasi, pembagian biaya, mekanisme sengketa, dan exit strategy. Kontrak hukum dan kontrak pintar dirancang bersama. Pada tahap ini juga dilakukan data protection impact assessment dan threat modeling.

Tahap ketiga adalah prototipe dalam sandbox. Data sintetis atau ruang lingkup terbatas digunakan untuk menguji alur transaksi, kegagalan meter, kunci hilang, serangan, pembatalan, dan pembaruan kontrak. Kinerja diuji pada beban puncak. Audit kode dan pengujian penetrasi dilakukan sebelum melibatkan transaksi bernilai nyata.

Tahap keempat adalah pilot operasional. Contohnya satu microgrid, kawasan industri, atau jaringan charger. Pengguna menerima penjelasan yang dapat dipahami dan dukungan ketika terjadi masalah. Evaluasi mencakup dampak teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Hasil negatif didokumentasikan sebagai pembelajaran.

Tahap kelima adalah integrasi dan penskalaan. Platform dihubungkan dengan billing, SCADA, sistem pasar, identitas, dan pelaporan regulator. Standar terbuka dan portabilitas data ditekankan. Node validator diperluas secara bertahap, kapasitas dimonitor, dan prosedur operasi dibakukan.

Tahap keenam adalah continuous governance. Ancaman, regulasi, dan teknologi berubah. Kontrak pintar perlu versioning; anggota konsorsium perlu audit; indikator dampak diperiksa berkala. Komite tata kelola harus memiliki kewenangan dan akuntabilitas yang jelas. Sistem dapat dihentikan atau dimigrasikan jika manfaat tidak lagi memadai.

14. Peluang Strategis untuk Indonesia

Indonesia memiliki kondisi yang relevan: wilayah kepulauan, sistem kelistrikan yang beragam, potensi energi terbarukan besar, pertumbuhan kawasan industri, serta kebutuhan elektrifikasi transportasi. Namun, solusi harus sesuai konteks, bukan menyalin proyek negara lain.

Pertama, microgrid kepulauan. Sistem lokal yang menggabungkan surya, baterai, dan diesel membutuhkan optimasi agar konsumsi bahan bakar turun tanpa mengorbankan keandalan. Ledger berizin dapat mencatat produksi, penggunaan, subsidi, kontribusi aset komunitas, dan pembayaran operator. Manfaat terbesar mungkin bukan perdagangan kripto, melainkan transparansi layanan serta rekonsiliasi antarpihak.

Kedua, kawasan industri hijau. Perusahaan dalam satu kawasan dapat berbagi produksi surya, penyimpanan, dan fleksibilitas. Blockchain dapat melacak asal listrik, mengalokasikan sertifikat, serta mendukung pelaporan emisi rantai pasok. Integrasi dengan standar internasional meningkatkan kredibilitas ekspor, asalkan data diverifikasi oleh lembaga yang diakui.

Ketiga, komunitas energi di perkotaan. Apartemen, kampus, rumah sakit, dan pusat perbelanjaan dapat menguji pembagian manfaat panel surya serta baterai bersama. Kontrak pintar mengalokasikan energi berdasarkan investasi atau kebutuhan, sementara perlindungan pelanggan tetap dijaga. Kampus dapat menjadi living laboratory yang melibatkan mahasiswa teknik, manajemen, hukum, dan kebijakan publik.

Keempat, kendaraan listrik. Identitas interoperabel dan settlement antaroperator dapat mengurangi fragmentasi layanan pengisian. Smart charging dapat membantu jaringan menyerap energi terbarukan. Pilot sebaiknya dimulai dari armada yang pola operasinya teratur, seperti bus, kendaraan logistik, atau kendaraan dinas, sebelum diperluas.

Kelima, sertifikat dan pembiayaan hijau. Ledger dapat memperkuat ketertelusuran energi bersih dan kinerja proyek, tetapi harus terhubung dengan registri resmi. Bank dan investor dapat

memperoleh data operasional yang lebih tepat waktu. UMKM energi dapat mengakses pembiayaan jika biaya verifikasi menurun, walaupun prinsip kehati-hatian tetap berlaku.

Pemerintah dapat memfasilitasi regulatory sandbox, standar data, pedoman keamanan, dan interoperabilitas. PLN, regulator, perguruan tinggi, pemerintah daerah, perusahaan teknologi, dan komunitas perlu membangun konsorsium berbasis masalah. Kebijakan sebaiknya netral terhadap teknologi dan berorientasi pada hasil: keandalan, keterjangkauan, penurunan emisi, serta pemerataan manfaat.

15. Implikasi Manajerial

Bagi pimpinan organisasi energi, blockchain adalah inovasi sistem, bukan sekadar proyek TI. Ia mengubah batas organisasi, pembagian kewenangan, model pendapatan, dan hubungan dengan pelanggan. Sponsor eksekutif harus memahami bahwa keberhasilan lebih banyak ditentukan oleh kesepakatan antarpelaku dan integrasi proses daripada pemilihan platform.

Kapabilitas yang dibutuhkan mencakup arsitektur digital, keamanan siber, analitik energi, desain pasar, hukum teknologi, manajemen perubahan, dan komunikasi publik. Tim lintas fungsi harus memiliki bahasa bersama. Ahli blockchain perlu memahami batas fisik jaringan; insinyur listrik perlu memahami identitas dan kontrak pintar; manajer perlu memahami risiko algoritmik.

Pengadaan teknologi harus menuntut portabilitas data, dokumentasi, auditabilitas kode, dukungan standar, dan rencana keluar vendor. Hak atas data serta kode kontrak pintar harus jelas. Ketergantungan pada satu perusahaan dapat mengubah ledger terdistribusi menjadi layanan tertutup.

Manajemen perubahan perlu menjelaskan manfaat konkret bagi pengguna. Prosumer ingin pembayaran tepat, operator ingin sistem stabil, regulator ingin perlindungan publik, dan investor ingin data tepercaya. Narasi transformasi harus menghubungkan kebutuhan tersebut. Pelatihan, help desk, simulasi, dan mekanisme pengaduan merupakan bagian dari desain.

Etika harus ditempatkan sebagai kriteria optimasi. Sistem yang efisien tetapi mengeksklusi pengguna rentan bukan inovasi yang baik. Algoritma harga dan baseline perlu diuji dampak distribusionalnya. Keputusan otomatis yang memengaruhi akses energi harus dapat dijelaskan, diaudit, dan digugat. Dengan demikian, “trust in code” tidak menggantikan kepercayaan sosial, melainkan mendukung institusi yang layak dipercaya.

16. Agenda Penelitian

Penelitian selanjutnya perlu bergerak dari demonstrasi teknis menuju evaluasi komparatif jangka panjang. Banyak studi membuktikan bahwa transaksi dapat dijalankan, tetapi lebih sedikit yang membandingkan biaya total, dampak jaringan, perilaku pengguna, dan emisi dengan solusi terpusat.

Pertanyaan pertama adalah desain pasar. Bagaimana harga lokal memasukkan batas jaringan tanpa menjadi terlalu kompleks? Bagaimana manfaat dibagi antara prosumer, konsumen

biasa, operator jaringan, dan agregator? Eksperimen lapangan dapat menguji respons pengguna terhadap skema harga dan transparansi.

Pertanyaan kedua adalah arsitektur. Kombinasi blockchain, edge computing, digital twin, dan AI perlu diuji pada skala realistis. Penelitian harus mengukur throughput, latensi, ketersediaan, konsumsi energi komputasi, dan ketahanan terhadap serangan. Klaim keamanan harus didukung threat model yang eksplisit.

Pertanyaan ketiga adalah governance. Model konsorsium mana yang mencegah dominasi sekaligus memungkinkan keputusan cepat? Bagaimana aturan diubah tanpa merugikan transaksi lama? Penelitian organisasi dan institusi sama pentingnya dengan ilmu komputer.

Pertanyaan keempat adalah keadilan energi. Siapa memperoleh manfaat, siapa menanggung risiko, dan siapa tidak dapat berpartisipasi? Indikator harus mencakup keterjangkauan, akses digital, gender, wilayah, dan kapasitas komunitas. Participatory design dapat memasukkan suara pengguna sejak awal.

Pertanyaan kelima adalah konteks Indonesia. Pilot di pulau kecil, kawasan industri, perkotaan, dan wilayah layanan berbeda dapat menghasilkan pembelajaran yang tidak tersedia dari studi luar negeri. Perguruan tinggi dapat membangun testbed terbuka, berbagi data yang dianonimkan, dan mengembangkan kompetensi nasional.

17. Arsitektur Referensi Sistem

Arsitektur blockchain untuk energi sebaiknya dipahami sebagai susunan beberapa lapisan. Lapisan pertama adalah sistem fisik: pembangkit, jaringan, panel surya, baterai, kendaraan listrik, mesin industri, serta beban rumah tangga. Pada lapisan ini berlaku hukum kelistrikan, batas keselamatan, dan proteksi. Keputusan yang membutuhkan respons sangat cepat tetap dilakukan pengendali lokal. Blockchain tidak boleh berada di jalur kritis pemutusan gangguan.

Lapisan kedua adalah pengukuran dan edge computing. Smart meter, sensor, dan gateway membaca produksi, konsumsi, tegangan, frekuensi, serta kondisi perangkat. Gateway membersihkan data, memberi cap waktu, menandatangani pesan, dan mengagregasi bacaan. Analitik ringan dapat mendeteksi anomali sebelum data dikirim. Dengan demikian, ledger tidak menerima aliran mentah yang sangat besar, melainkan transaksi atau bukti yang relevan.

Lapisan ketiga adalah komunikasi dan identitas. Setiap organisasi, pengguna, dan perangkat memperoleh kredensial digital. Public key infrastructure atau decentralized identifier dapat digunakan sesuai kebutuhan. Kebijakan menentukan siapa boleh membaca, mengusulkan, memvalidasi, atau mengubah status. Rotasi kunci dan pencabutan kredensial harus tersedia ketika perangkat hilang atau pegawai berpindah tugas.

Lapisan keempat adalah ledger dan kontrak pintar. Ledger menyimpan registri aset, hash data, persetujuan, tawaran, hasil pasar, dan settlement. Kontrak pintar memeriksa aturan deterministik, misalnya batas harga, status lisensi, ketersediaan jaminan, dan formula

pembayaran. Kode harus modular agar pembaruan satu layanan tidak mengganggu seluruh jaringan.

Lapisan kelima adalah analitik dan optimasi off-chain. Mesin ramalan memprediksi beban dan energi terbarukan. Optimal power flow memeriksa kelayakan jaringan. Algoritma pasar mencocokkan tawaran. Hasil perhitungan ditandatangani dan diserahkan ke ledger bersama bukti yang cukup. Jika hasil disengketakan, input, versi algoritma, dan jejak keputusan dapat diperiksa.

Lapisan keenam adalah aplikasi bisnis dan antarmuka pengguna. Dashboard menampilkan tagihan, pendapatan prosumer, jejak karbon, kondisi aset, dan notifikasi. Antarmuka harus menyederhanakan kompleksitas blockchain. Pengguna tidak semestinya dipaksa memahami gas fee, hash, atau manajemen kunci yang rumit. Account recovery yang aman dan dukungan pelanggan perlu dirancang sebagai bagian produk.

Lapisan terakhir adalah governance dan assurance yang melintang pada semua lapisan. Di dalamnya terdapat regulasi, audit, manajemen risiko, perlindungan data, standar teknis, serta prosedur insiden. Arsitektur yang matang mempunyai observability: indikator kesehatan node, transaksi gagal, anomali meter, perubahan kontrak, dan pola serangan dapat dipantau. Log teknis tidak cukup; organisasi juga perlu memantau dampak ekonomi dan sosial.

Aliran transaksi contoh dimulai ketika panel surya menghasilkan surplus. Gateway memvalidasi bacaan, mengirim ringkasan bertanda tangan, dan menawarkan energi. Mesin pasar menghimpun tawaran, memperhitungkan batas transformator, lalu menghasilkan alokasi. Validator menyepakati transaksi. Setelah interval selesai, bacaan aktual dibandingkan dengan komitmen. Kontrak pintar menghitung nilai energi, biaya jaringan, pajak, serta atribut terbarukan. Pembayaran dapat dilakukan melalui sistem uang elektronik atau perbankan; tidak harus memakai mata uang kripto. Ringkasan akhir masuk ke sistem penagihan dan pelaporan regulator.

Arsitektur ini menunjukkan bahwa blockchain hanyalah satu komponen. Keandalannya bergantung pada meter, komunikasi, algoritma, hukum, dan operasi manusia. Prinsip modularitas memungkinkan blockchain diganti tanpa membongkar jaringan fisik. Prinsip tersebut juga mengurangi lock-in dan membuat investasi lebih tahan terhadap perubahan teknologi.

18. Kasus Simulatif: Microgrid Kampus–Rumah Sakit

Bayangkan sebuah kawasan yang terdiri atas kampus, rumah sakit, asrama, perumahan pegawai, panel surya 5 MWp, baterai 10 MWh, generator darurat, dan seratus kendaraan listrik. Rumah sakit memerlukan pasokan sangat andal; kampus memiliki fleksibilitas pada pendingin dan jadwal laboratorium tertentu; asrama memiliki pola konsumsi malam; kendaraan banyak terparkir siang hari. Sistem tetap terhubung ke jaringan utama, tetapi dapat beroperasi sebagai microgrid ketika terjadi gangguan.

Tujuan operasionalnya terdiri atas lima sasaran: meminimalkan biaya listrik, memaksimalkan konsumsi surya lokal, menjaga cadangan rumah sakit, mengurangi beban puncak jaringan, dan memberi imbalan adil bagi pemilik aset. Fungsi tujuan multiobjektif

memberi penalti besar pada risiko kehilangan beban kritis. Baterai tidak boleh dikosongkan hanya karena harga sesaat menguntungkan apabila cadangan darurat turun di bawah batas.

Pada pukul enam pagi, sistem menerima ramalan cuaca, jadwal kegiatan, status baterai, serta perkiraan kebutuhan kendaraan. Algoritma menyusun jadwal satu hari. Kontrak pintar menerima komitmen: gedung administrasi bersedia mengurangi pendinginan 100 kW antara pukul 13.00–14.00 dengan harga tertentu; armada kampus menunda sebagian pengisian; pemilik kendaraan pribadi memberi izin memakai maksimal dua kilowatt-jam untuk jasa fleksibilitas; rumah sakit tidak menawarkan pengurangan beban kritis.

Menjelang siang, awan tebal mengurangi produksi surya lebih cepat daripada ramalan. Gateway cuaca dan meter mengirim pembaruan. Sistem optimasi menghitung ulang jadwal. Sebagian pendingin nonkritis dikurangi, baterai melepas energi, dan pengisian kendaraan ditunda. Ledger mencatat versi ramalan, perubahan jadwal, persetujuan yang telah diberikan, serta aktivasi fleksibilitas. Pengendali lokal mengeksekusi perintah setelah memeriksa batas kenyamanan dan keselamatan.

Setelah kejadian, data meter diverifikasi. Gedung administrasi hanya memberikan 80 kW dari komitmen 100 kW karena sebuah ruang seminar tetap digunakan. Kontrak pintar menghitung pembayaran berdasarkan realisasi, tidak langsung menerapkan penalti sebelum memeriksa alasan yang diizinkan. Baterai menerima pendapatan untuk energi dan kapasitas, tetapi biaya degradasi dikurangkan sesuai formula. Pemilik kendaraan memperoleh kredit pada tagihan pengisian.

Pada sore hari terjadi gangguan jaringan utama. Microgrid beralih ke mode islanding melalui kontrol proteksi lokal, bukan blockchain. Ledger berfungsi mencatat status, prioritas beban, dan penggunaan cadangan. Rumah sakit memperoleh pasokan utama; laboratorium kritis tetap hidup; beban rekreasi dihentikan. Ketika jaringan pulih, catatan kejadian membantu audit dan penghitungan kompensasi.

Evaluasi pilot membandingkan enam bulan operasi dengan baseline tahun sebelumnya yang telah disesuaikan cuaca dan aktivitas. Indikator teknis mencakup peak demand, curtailment surya, state of charge, durasi gangguan, dan pelanggaran tegangan. Indikator ekonomi mencakup biaya total, pendapatan fleksibilitas, biaya transaksi, dan sengketa. Indikator sosial mencakup kenyamanan, pemahaman pengguna, distribusi manfaat, dan jumlah peserta yang keluar.

Hasil simulatif menunjukkan bagaimana blockchain dapat mengurangi rekonsiliasi dan menyediakan audit lintas organisasi. Namun, nilai utamanya hanya muncul karena data meter tepercaya, algoritma memasukkan batas fisik, dan tata kelola menetapkan prioritas rumah sakit. Jika ketiga unsur tersebut hilang, ledger yang sempurna secara kriptografis tetap menghasilkan sistem yang buruk.

Kasus ini juga mengajarkan bahwa token internal tidak harus diperdagangkan sebagai aset spekulatif. Unit digital dapat sekadar menjadi instrumen akuntansi yang dikonversi ke rupiah pada settlement. Pemisahan fungsi utilitas dan spekulasi membantu perlindungan pengguna serta

kepatuhan. Selain itu, partisipasi harus bersifat informed consent: pengguna mengetahui data apa yang dipakai, risiko apa yang ada, dan bagaimana mencabut izin.

Dari sisi manajemen, pilot memerlukan steering committee yang beranggotakan pengelola kampus, rumah sakit, operator jaringan, perwakilan pengguna, ahli keamanan, dan auditor. Perubahan kontrak pintar tidak boleh dilakukan sepihak oleh vendor. Setiap versi melalui uji, masa pemberitahuan, dan persetujuan sesuai tingkat risiko. Dengan demikian, inovasi tetap adaptif tanpa mengorbankan akuntabilitas.

19. Model Evaluasi Nilai dan Risiko

Evaluasi proyek blockchain energi dapat menggunakan kerangka empat dimensi: value, viability, feasibility, dan responsibility. Value menilai apakah pengguna dan sistem memperoleh manfaat. Viability menilai keberlanjutan ekonomi serta institusional. Feasibility menilai kemampuan teknis dan operasional. Responsibility menilai keamanan, privasi, lingkungan, dan keadilan.

Pada dimensi value, organisasi menghitung penghematan biaya rekonsiliasi, pengurangan curtailment, peningkatan pemanfaatan aset, kecepatan settlement, dan kualitas audit. Manfaat nonfinansial seperti kepercayaan peserta dapat diukur melalui survei dan jumlah sengketa. Klaim harus dikaitkan dengan baseline dan kelompok pembanding bila memungkinkan.

Pada viability, analisis memasukkan biaya node, integrasi, meter, komunikasi, audit kode, kepatuhan, pelatihan, dan governance. Pendapatan atau penghematan harus cukup untuk menutup total cost of ownership. Konsorsium juga perlu model pembiayaan yang adil: apakah biaya berdasarkan volume transaksi, jumlah meter, manfaat, atau kontribusi tetap.

Pada feasibility, pengujian meliputi throughput, finality, ketersediaan, kualitas data, interoperabilitas, dan pemulihan bencana. Service-level objective ditetapkan menurut fungsi. Settlement dapat mentoleransi beberapa menit, sedangkan proteksi tidak. Risiko teknis dinilai melalui failure mode and effects analysis, threat modeling, dan uji penetrasi.

Pada responsibility, proyek menghitung konsumsi listrik komputasi, emisi lifecycle, jumlah data pribadi, kemungkinan diskriminasi tarif, serta akses kelompok rentan. Data governance menetapkan tujuan penggunaan, retensi, akses, dan penghapusan off-chain. Human oversight diwajibkan untuk keputusan berdampak tinggi.

Setiap dimensi dapat diberi skor satu sampai lima, tetapi angka tidak boleh menutupi trade-off. Proyek dengan manfaat tinggi dan risiko privasi tinggi belum tentu layak sebelum mitigasi tersedia. Gate review dilakukan setelah prototipe, pilot, dan sebelum skala penuh. Keputusan yang sah dapat berupa lanjut, revisi, hentikan, atau gunakan teknologi alternatif.

Manajemen portofolio juga penting. Organisasi sebaiknya tidak membangun blockchain terpisah untuk setiap use case. Identitas, node, audit, dan integrasi dasar dapat menjadi shared capability, sementara kontrak pintar dibuat modular. Namun, konsolidasi tidak boleh

menciptakan titik kegagalan baru atau menggabungkan data yang semula terpisah tanpa dasar hukum.

Indikator pascaimplementasi harus memantau unintended consequences. Harga lokal mungkin meningkatkan manfaat prosumer tetapi menaikkan biaya nonpeserta. Otomatisasi dapat menurunkan biaya administrasi tetapi menciptakan ketergantungan pada vendor. Transparansi dapat mengurangi kecurangan tetapi memperbesar risiko surveillance. Evaluasi berkala memungkinkan kebijakan diperbaiki sebelum dampak negatif menjadi permanen.

20. Penutup

Blockchain mempunyai potensi nyata untuk mendukung optimasi energi ketika masalah utama terletak pada koordinasi banyak pihak, integritas data, audit, dan otomatisasi transaksi. Aplikasinya meliputi perdagangan P2P, agregasi sumber daya terdistribusi, respons permintaan, kendaraan listrik, sertifikat energi terbarukan, pembiayaan, dan pemeliharaan aset.

Namun, blockchain bukan mesin optimasi fisik dan bukan pengganti institusi. Algoritma sistem tenaga tetap menentukan dispatch dan keamanan jaringan; sensor tetap menentukan kualitas input; regulator tetap menentukan hak dan perlindungan; manusia tetap bertanggung jawab atas tujuan sosial. Nilai teknologi muncul dalam arsitektur hibrida yang menggabungkan komputasi off-chain, verifikasi on-chain, smart meter, IoT, AI, dan tata kelola konsorsium.

Pendekatan yang paling bertanggung jawab adalah problem-driven, permissioned, hemat energi, interoperabel, serta bertahap. Setiap proyek harus membandingkan alternatif, mengukur dampak, melindungi privasi, dan menyediakan mekanisme koreksi. Bagi Indonesia, microgrid kepulauan, kawasan industri hijau, komunitas energi, dan pengisian kendaraan listrik menawarkan ruang eksperimen yang strategis.

Pada akhirnya, optimasi energi bukan sekadar memperoleh lebih banyak transaksi dengan lebih cepat. Tujuannya adalah sistem energi yang andal, terjangkau, rendah karbon, transparan, dan adil. Blockchain layak digunakan sejauh ia membantu mencapai tujuan tersebut dengan manfaat bersih yang dapat dibuktikan.

Glossarium

Istilah	Pengertian
Agregator	Pihak yang menghimpun banyak sumber daya energi kecil agar dapat berpartisipasi sebagai satu portofolio.
Blockchain	Buku besar terdistribusi yang mencatat transaksi secara berurutan dan disepakati melalui protokol konsensus.
Consensus mechanism	Aturan yang digunakan simpul jaringan untuk menyepakati validitas dan urutan transaksi.
Demand response	Perubahan konsumsi listrik sebagai respons terhadap harga, insentif, atau sinyal operator.
Distributed energy resources (DER)	Aset energi skala kecil yang terhubung pada jaringan distribusi, seperti surya atap, baterai, dan beban fleksibel.
Distributed ledger technology (DLT)	Teknologi pencatatan yang menyimpan salinan ledger pada beberapa simpul.
Finality	Tingkat kepastian bahwa transaksi yang telah diterima tidak akan dibatalkan.
Hash	Sidik jari digital yang merepresentasikan data dan berubah apabila data sumber berubah.
Internet of Energy	Ekosistem perangkat, data, dan pasar energi yang saling terhubung secara digital.
Microgrid	Sistem energi lokal yang dapat beroperasi terhubung dengan jaringan utama atau secara mandiri.
Off-chain	Penyimpanan atau komputasi yang dilakukan di luar blockchain.
On-chain	Data atau eksekusi yang dicatat langsung pada blockchain.
Oracle	Mekanisme yang memasukkan data dari dunia luar ke kontrak pintar.
Peer-to-peer energy trading	Pertukaran energi langsung antarpeserta melalui platform pasar.
Permissioned blockchain	Blockchain yang membatasi hak akses atau validasi kepada peserta yang disetujui.
Prosumer	Pengguna energi yang sekaligus dapat memproduksi, menyimpan, atau menjual energi.

Proof-of-authority	Konsensus yang mengandalkan validator beridentitas dan berwenang.
Proof-of-work	Konsensus berbasis kompetisi komputasi yang dapat memakai energi besar.
Smart contract	Program pada ledger yang menjalankan aturan transaksi secara otomatis.
Smart grid	Jaringan listrik yang memakai komunikasi, sensor, dan kontrol digital untuk meningkatkan kinerja.
Smart meter	Meter digital yang mengukur dan mengomunikasikan konsumsi atau produksi energi.
Tokenisasi	Representasi hak, atribut, atau aset dalam bentuk token digital.
Transactive energy	Koordinasi produksi dan konsumsi melalui sinyal ekonomi serta transaksi.
Virtual power plant	Agregasi dan koordinasi DER agar beroperasi sebagai satu portofolio pembangkit.
Zero-knowledge proof	Teknik kriptografi untuk membuktikan suatu pernyataan tanpa mengungkap seluruh data dasarnya.

Daftar Pustaka

- Aklilu, Y. T., Ding, J., Khalid, M., & Mian, A. (2022). Survey on blockchain for smart grid management, control, and operation. *Energies*, 15(1), 193. <https://doi.org/10.3390/en15010193>
- Alladi, T., Chamola, V., Rodrigues, J. J. P. C., & Kozlov, S. A. (2019). Blockchain in smart grids: A review on different use cases. *Sensors*, 19(22), 4862. <https://doi.org/10.3390/s19224862>
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Riva Sanseverino, E., Sciumè, G., & Zizzo, G. (2020). Blockchain for power systems: Current trends and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>
- Koukaras, P., Tjortjis, C., Gkaidatzis, P., Bezas, N., & Ioannidis, D. (2024). Integrating blockchain in smart grids for enhanced demand response: A comprehensive review of architecture, implementation strategies, and future directions. *Energies*, 17(5), 1007. <https://doi.org/10.3390/en17051007>
- Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870–880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>
- Mollah, M. B., Zhao, J., Niyato, D., Lam, K.-Y., Zhang, X., Ghias, A. M. Y. M., Koh, L. H., & Yang, L. (2021). Blockchain for future smart grid: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(1), 18–43. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2993601>
- Munsing, E., Mather, J., & Moura, S. (2017). Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks. 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2164–2171. <https://doi.org/10.1109/CCTA.2017.8062773>
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3440802>
- Nepal, J. P., Pajja, N., Bist, V., Kretinin, A., & Hadjidemetriou, L. (2022). Blockchain-based smart renewable energy: Review of operational and transactional challenges. *Energies*, 15(13), 4911. <https://doi.org/10.3390/en15134911>

- Noor, S., Yang, W., Guo, M., van Dam, K. H., & Wang, X. (2018). Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain. *Applied Energy*, 228, 1385–1398. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.012>
- Pop, C., Cioara, T., Antal, M., Anghel, I., Salomie, I., & Bertoncini, M. (2018). Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. *Sensors*, 18(1), 162. <https://doi.org/10.3390/s18010162>
- Siano, P., De Marco, G., Rolan, A., & Loia, V. (2019). A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 3454–3466. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>
- Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.036>
- Vionis, P., & Kotsilieris, T. (2024). The potential of blockchain technology and smart contracts in the energy sector: A review. *Applied Sciences*, 14(1), 253. <https://doi.org/10.3390/app14010253>
- Zhao, W., Luan, T. H., Lin, L., Xu, Y., Gao, W., & Li, W. (2023). Blockchain-based applications for smart grids: An umbrella review. *Energies*, 16(17), 6147. <https://doi.org/10.3390/en16176147>