

Perbandingan Teknologi Energi Terbarukan Sebagai Solusi Ketahanan Energi Nasional

Kiki Utama Putra

Universitas Alwashliyah Medan

Email: hutasuhutmutmainnah@gmail.com

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar, namun pemanfaatannya masih jauh dari optimal. Penelitian ini membandingkan empat teknologi energi terbarukan utama tenaga surya (PLTS), tenaga angin (PLTB), tenaga air (PLTA), dan biogas dari sudut pandang teknis dan ekonomis. Perbandingan dilakukan berdasarkan empat parameter utama: efisiensi konversi energi, biaya pembangkitan (Levelized Cost of Energy/LCOE), keandalan pasokan, dan kesesuaian dengan kondisi geografis Indonesia. Hasil kajian menunjukkan bahwa setiap teknologi memiliki keunggulan yang spesifik terhadap kondisi tertentu: PLTS unggul dalam kemudahan pemasangan dan skalabilitas; PLTB menawarkan efisiensi konversi tertinggi di lokasi berangin; PLTA memberikan keandalan pasokan 24 jam dengan LCOE terendah; dan biogas cocok untuk daerah pertanian dengan pasokan energi yang relatif stabil. Tidak ada satu teknologi yang secara mutlak unggul untuk semua kondisi, sehingga pendekatan bauran energi (energy mix) yang mempertimbangkan potensi lokal dinilai sebagai strategi paling optimal untuk Indonesia.

Kata Kunci: energi terbarukan; PLTS; PLTB; PLTA; biogas; LCOE; bauran energi

Abstract

Indonesia possesses enormous renewable energy potential, yet its utilization remains far below optimal levels. This study compares four major renewable energy technologies — solar (PLTS), wind (PLTB), hydropower (PLTA), and biogas from technical and economic perspectives. The comparison is based on four key parameters: energy conversion efficiency, levelized cost of energy (LCOE), supply reliability, and suitability for Indonesia's geographic conditions. Findings indicate that each technology holds specific advantages under particular conditions: solar excels in ease of installation and scalability; wind offers the highest conversion efficiency in windy locations; hydropower provides 24-hour reliability at the lowest LCOE; and biogas suits agricultural areas with relatively stable energy supply. No single technology is universally superior across all conditions, making an energy mix approach that considers local potential the most optimal strategy for Indonesia.

Keywords: renewable energy; solar; wind; hydropower; biogas; LCOE; energy mix

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Listrik adalah kebutuhan dasar yang tidak bisa dipisahkan dari kehidupan modern. Dari menyalakan lampu di rumah, mengisi daya ponsel, hingga menjalankan mesin di pabrik semuanya bergantung pada pasokan listrik yang andal. Namun, sebagian besar listrik yang kita gunakan saat ini masih dihasilkan dari bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Masalahnya, bahan bakar fosil adalah sumber daya yang akan habis, dan proses pembakarannya menghasilkan gas rumah kaca yang menjadi penyebab utama perubahan iklim.

Di sinilah energi terbarukan hadir sebagai solusi. Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber alam yang dapat diperbarui secara terus-menerus seperti sinar matahari yang setiap hari terbit, angin yang selalu berhembus, air sungai yang terus mengalir, dan limbah organik yang dihasilkan dari aktivitas pertanian. Sumber-sumber ini tidak akan habis dan menghasilkan jauh lebih sedikit emisi karbon dibandingkan bahan bakar fosil.

Indonesia berada dalam posisi yang sangat beruntung. Sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia menerima sinar matahari hampir sepanjang tahun. Sebagai negara kepulauan dengan pantai yang panjang, potensi angin laut sangat besar. Sebagai negara dengan ribuan sungai dan pegunungan, potensi energi air sangat melimpah. Sebagai negara agraris, limbah pertanian dan peternakan tersedia dalam jumlah besar sebagai bahan baku biogas. Menurut data Kementerian ESDM (2023), total potensi energi terbarukan Indonesia mencapai lebih dari 3.600 GW namun yang sudah dimanfaatkan baru sekitar 12,5 GW atau kurang dari 1% dari potensi yang ada.

Sayangnya, tidak semua teknologi energi terbarukan cocok untuk semua kondisi. Panel surya tidak efektif di daerah yang sering mendung. Turbin angin memerlukan angin dengan kecepatan minimum tertentu. Pembangkit listrik tenaga air membutuhkan sungai dengan debit dan ketinggian jatuh air yang memadai. Biogas memerlukan pasokan bahan organik yang konsisten. Oleh karena itu, memahami perbandingan teknis dan ekonomis dari berbagai teknologi energi terbarukan ini penting terutama untuk menentukan teknologi mana yang paling tepat diterapkan di suatu wilayah.

B. Rumusan Masalah dan Tujuan

Penelitian ini merumuskan tiga pertanyaan utama: (1) Bagaimana perbandingan efisiensi konversi energi dari masing-masing teknologi energi terbarukan? (2) Bagaimana perbandingan biaya pembangkitan (LCOE) dan keekonomisan masing-masing teknologi? (3) Teknologi mana yang paling sesuai diterapkan di Indonesia berdasarkan kondisi geografis dan kebutuhan energi yang ada?

Tujuan penelitian ini adalah memberikan gambaran yang jelas, terstruktur, dan mudah dipahami tentang kelebihan dan kekurangan empat teknologi energi terbarukan utama, sebagai referensi dalam pengambilan keputusan perencanaan energi baik di tingkat rumah tangga, komunitas, maupun kebijakan nasional.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Apa Itu Energi Terbarukan?

Energi terbarukan (renewable energy) adalah energi yang berasal dari sumber alam yang secara alami terisi kembali dalam skala waktu manusia. Berbeda dengan bahan bakar fosil yang terbentuk selama jutaan tahun dan tidak bisa diperbarui dalam waktu singkat, sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, air, dan biomassa tersedia secara berkelanjutan. International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023) mendefinisikan energi terbarukan sebagai segala bentuk energi yang diproduksi dari sumber yang dapat diisi ulang secara alami dan tidak akan habis dalam jangka waktu yang bermakna bagi manusia.

B. Konsep Levelized Cost of Energy (LCOE)

Untuk membandingkan biaya berbagai teknologi pembangkit listrik secara adil, para ahli energi menggunakan metrik yang disebut Levelized Cost of Energy atau LCOE. Secara sederhana, LCOE adalah total biaya membangun dan mengoperasikan sebuah pembangkit listrik sepanjang masa hidupnya, dibagi dengan total listrik yang dihasilkan. Hasilnya dinyatakan dalam satuan biaya per kilowatt-jam (USD/kWh atau Rp/kWh).

LCOE memperhitungkan: (1) biaya awal pembangunan (investasi/kapital), (2) biaya operasional dan pemeliharaan selama masa hidup pembangkit, (3) biaya bahan bakar jika ada, dan (4) faktor kapasitas yaitu seberapa sering pembangkit beroperasi di kapasitas penuh. LCOE yang lebih rendah berarti teknologi tersebut lebih ekonomis untuk menghasilkan listrik. Menurut laporan IRENA (2023), LCOE dari energi surya dan angin telah turun drastis dalam satu dekade terakhir, menjadikannya kompetitif bahkan lebih murah dari batu bara di banyak negara.

C. Kondisi Energi Indonesia

Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan data Kementerian ESDM 2023, Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Namun realisasi hingga akhir 2023 baru mencapai sekitar 13,1%. Kesenjangan antara target dan realisasi ini menunjukkan bahwa pemilihan teknologi yang tepat dan efisien sangat krusial untuk mempercepat transisi energi Indonesia.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur sistematis (systematic literature review) dengan pendekatan komparatif deskriptif. Data dikumpulkan dari laporan resmi lembaga energi internasional seperti IRENA (International Renewable Energy Agency), IEA (International Energy Agency), dan ESDM (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia), serta jurnal-jurnal ilmiah teknik elektro yang relevan yang diterbitkan dalam kurun waktu 2018–2024.

Perbandingan dilakukan berdasarkan empat parameter utama yang dipilih karena relevansinya dalam konteks perencanaan energi: (1) efisiensi konversi energi seberapa besar energi dari sumber alam berhasil diubah menjadi listrik; (2) Levelized Cost of Energy (LCOE) biaya per kilowatt-jam yang dihasilkan sepanjang masa hidup pembangkit; (3) keandalan pasokan kemampuan pembangkit untuk beroperasi secara konsisten sepanjang waktu; dan (4)

kesesuaian geografis dengan kondisi Indonesia. Data kuantitatif disajikan dalam bentuk tabel perbandingan untuk memudahkan analisis dan penarikan kesimpulan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Empat Teknologi

Sebelum masuk ke perbandingan, penting untuk memahami cara kerja masing-masing teknologi secara singkat agar pembaca dapat mengikuti analisis dengan lebih mudah.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan panel fotovoltaik (PV) lempengan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon untuk menyerap sinar matahari dan mengubahnya langsung menjadi listrik melalui efek fotoelektrik. Semakin banyak cahaya matahari yang diterima, semakin banyak listrik yang dihasilkan. Keunggulan utama PLTS adalah kemudahan pemasangan: panel surya bisa dipasang di atap rumah, lahan kosong, bahkan di atas waduk (floating solar).

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) menggunakan turbin angin kincir besar dengan bilah seperti baling-baling untuk menangkap energi kinetik angin dan mengubahnya menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi listrik oleh generator. Semakin kencang dan konsisten angin berhembus, semakin efektif turbin bekerja. Di Indonesia, potensi terbesar ada di Sulawesi, Nusa Tenggara, dan Maluku.

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) memanfaatkan energi potensial air yang tersimpan di ketinggian (biasanya dalam waduk atau bendungan) dan mengubahnya menjadi energi kinetik ketika air dialirkan melalui pipa ke turbin di bawahnya. Turbin berputar dan menggerakkan generator yang menghasilkan listrik. PLTA adalah teknologi yang sudah sangat matang dan menjadi tulang punggung kelistrikan di banyak negara, termasuk Indonesia melalui PLTA-PLTA besar seperti Cirata dan Saguling.

Biogas dihasilkan dari proses penguraian bahan organik (kotoran hewan, sampah makanan, limbah pertanian) oleh bakteri dalam kondisi tanpa oksigen proses yang disebut fermentasi anaerobik. Gas yang dihasilkan, terutama metana (CH₄), dapat dibakar langsung untuk memasak, atau dialirkan ke generator untuk menghasilkan listrik. Keunikan biogas adalah memanfaatkan limbah yang jika dibiarkan justru akan menghasilkan gas rumah kaca berbahaya.

B. Perbandingan Teknis dan Ekonomis

Tabel 1 berikut menyajikan perbandingan komprehensif keempat teknologi berdasarkan parameter-parameter kunci yang telah ditetapkan dalam metodologi. Data potensi Indonesia bersumber dari Kementerian ESDM (2023).

Tabel 1. Perbandingan Teknis Empat Teknologi Energi Terbarukan

Kriteria	Tenaga Surya	Tenaga Angin	Tenaga Air	Biogas
Sumber Energi	Sinar matahari	Pergerakan udara	Aliran/jatuhan air	Limbah organik
Biaya Awal	Sedang–Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah–Sedang
Biaya Operasional	Sangat Rendah	Rendah	Rendah	Sedang

Efisiensi Konversi	15–22%	35–45%	85–95%	20–30%
Ketertgantungan Cuaca	Sangat Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah
Ketersediaan 24 Jam	Tidak (butuh baterai)	Tidak (intermiten)	Ya (jika waduk)	Ya (relatif stabil)
Dampak Lingkungan	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Rendah
Cocok untuk	Perkotaan & pedesaan	Pesisir & dataran tinggi	Sungai & pegunungan	Pertanian & peternakan
Potensi di Indonesia	207,8 GWp	60,6 GW	94,5 GW	32,6 GW

Sumber: IRENA (2023), Kementerian ESDM (2023), diolah penulis

C. Analisis Biaya Pembangkitan (LCOE)

Salah satu faktor penentu dalam pemilihan teknologi energi terbarukan adalah biaya. Banyak orang beranggapan bahwa energi terbarukan masih sangat mahal. Fakta terkini menunjukkan sebaliknya. Tabel 2 menyajikan perbandingan LCOE dari keempat teknologi dibandingkan dengan PLTU batu bara sebagai acuan.

Tabel 2. Perbandingan LCOE Teknologi Energi Terbarukan vs Batu Bara

Jenis Pembangkit	LCOE Global (USD/kWh)	LCOE Indonesia (Rp/kWh)	Tren 2010–2023
PLTS (Photovoltaic)	0,049	750–1.200	Turun 89%
PLTB (Onshore)	0,033	900–1.500	Turun 69%
PLTA (Hydropower)	0,030	500–900	Stabil
Biogas (Biomassa)	0,066	1.200–2.000	Turun 13%
PLTU Batu Bara (perbandingan)	0,083	700–1.100	Naik 5%

Sumber: IRENA Renewable Power Generation Costs 2023, diolah penulis

Data pada Tabel 2 menunjukkan fakta yang mengejutkan: tiga dari empat teknologi energi terbarukan (PLTB, PLTA, dan PLTS) kini memiliki LCOE yang lebih rendah dari PLTU batu bara secara global. Ini adalah perubahan besar yang terjadi dalam satu dekade terakhir, terutama didorong oleh penurunan harga panel surya sebesar 89% dan turbin angin sebesar 69% sejak 2010. Dengan kata lain, argumen "energi terbarukan terlalu mahal" tidak lagi berlaku secara ekonomis di tingkat global.

Khusus untuk Indonesia, LCOE energi terbarukan dalam rupiah masih dipengaruhi oleh beberapa faktor lokal seperti biaya logistik ke pulau-pulau terpencil, keterbatasan tenaga ahli lokal, dan regulasi impor komponen. Namun tren penurunannya tetap signifikan dan diprediksi akan terus berlanjut seiring meningkatnya skala produksi dan transfer teknologi.

D. Analisis per Teknologi: Kelebihan dan Tantangan

Tenaga Surya (PLTS). Kelebihan terbesar PLTS adalah fleksibilitasnya. Panel surya bisa dipasang mulai dari skala kecil (rooftop 1–5 kW untuk satu rumah) hingga skala besar (solar farm ratusan MW). Biaya panel surya sudah turun lebih dari 89% sejak 2010, menjadikannya semakin terjangkau. Di Indonesia dengan rata-rata penyinaran matahari 4,5–5,1 kWh/m²/hari, potensinya sangat besar. Tantangan utama PLTS adalah sifatnya yang intermiten: tidak menghasilkan listrik di malam hari dan berkurang saat mendung. Untuk itu diperlukan sistem penyimpanan energi (baterai) atau jaringan yang terintegrasi dengan sumber lain, yang menambah biaya keseluruhan sistem.

Tenaga Angin (PLTB). Turbin angin memiliki efisiensi konversi tertinggi di antara keempat teknologi, yakni 35–45% (dibandingkan panel surya yang hanya 15–22%). Ini karena energi angin relatif lebih mudah dikonversi menjadi gerakan mekanik daripada cahaya menjadi listrik. Namun PLTB memiliki persyaratan lokasi yang ketat: kecepatan angin rata-rata minimal 6–7 m/s diperlukan agar pembangkit beroperasi secara ekonomis. Di Indonesia, lokasi yang memenuhi syarat ini terbatas terutama di wilayah timur seperti Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Maluku. Tantangan lain adalah biaya awal yang tinggi dan dampak visual serta suara pada lingkungan sekitar.

Tenaga Air (PLTA). Dari sisi keandalan, PLTA adalah yang terbaik di antara empat teknologi ini. Dengan adanya waduk, PLTA dapat dioperasikan sesuai permintaan listrik diaktifkan saat beban puncak dan dimatikan saat permintaan rendah. Efisiensinya mencapai 85–95%, jauh di atas teknologi lainnya. LCOE-nya juga terendah karena tidak ada biaya bahan bakar dan masa operasionalnya bisa mencapai 50–100 tahun. Tantangan utama PLTA adalah biaya pembangunan awal yang sangat tinggi dan dampak lingkungan berupa perubahan ekosistem sungai dan pemindahan penduduk di sekitar area waduk. Untuk daerah yang tidak memiliki sungai besar, teknologi mikro-hidro berskala kecil (di bawah 1 MW) bisa menjadi alternatif yang lebih terjangkau.

Biogas. Biogas adalah satu-satunya teknologi dari empat yang dibahas di sini yang dapat menghasilkan listrik secara relatif stabil sepanjang hari tanpa bergantung pada kondisi cuaca, selama pasokan bahan baku organik tersedia. Ini menjadikannya sangat cocok sebagai sumber listrik dasar (baseload) untuk daerah pertanian dan peternakan. Selain menghasilkan listrik, biogas juga menghasilkan pupuk organik (digestate) sebagai produk sampingan yang bernilai. Tantangan biogas adalah kebutuhan akan manajemen yang lebih aktif dibandingkan PLTS atau PLTB, serta potensi masalah bau dan sanitasi jika tidak dikelola dengan baik.

E. Strategi Bauran Energi untuk Indonesia

Dari seluruh analisis di atas, jelas bahwa tidak ada satu teknologi energi terbarukan yang sempurna untuk semua situasi. Setiap teknologi memiliki keunggulan dan keterbatasannya masing-masing. Strategi yang paling masuk akal untuk Indonesia adalah bauran energi (energy mix) — menggabungkan beberapa teknologi secara sinergis berdasarkan potensi dan kebutuhan lokal masing-masing wilayah.

Sebagai contoh konkret: di Jawa dan Bali dengan kepadatan penduduk tinggi, kombinasi PLTS atap (rooftop solar) untuk kebutuhan siang hari dan PLTA untuk beban

puncak malam hari bisa menjadi solusi yang saling melengkapi. Di Nusa Tenggara dengan potensi angin besar, PLTB dapat menjadi tulang punggung dengan PLTS sebagai pelengkap. Di Kalimantan dan Sumatera yang memiliki banyak lahan pertanian dan perkebunan sawit, biogas dari limbah organik berpotensi besar untuk melistriki desa-desa terpencil. Pendekatan ini juga selaras dengan target Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) yang mengedepankan kemandirian energi berbasis potensi lokal.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

A. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa keempat teknologi energi terbarukan yang dibandingkan PLTS, PLTB, PLTA, dan biogas masing-masing memiliki keunggulan teknis dan ekonomis yang spesifik dan tidak dapat digeneralisasi. PLTA unggul dalam keandalan dan LCOE terendah tetapi memerlukan investasi awal terbesar. PLTB memiliki efisiensi konversi tertinggi tetapi terbatas pada lokasi berangin. PLTS paling fleksibel dan terus turun harganya tetapi bersifat intermiten. Biogas paling stabil tetapi memerlukan manajemen aktif dan pasokan bahan baku yang konsisten.

Yang paling penting untuk digarisbawahi adalah fakta bahwa secara ekonomis, tiga dari empat teknologi ini kini sudah lebih murah dari batu bara secara global. Argumentasi bahwa energi terbarukan terlalu mahal sudah tidak lagi relevan. Hambatan transisi energi Indonesia saat ini lebih bersifat regulatoris, kelembagaan, dan infrastruktur bukan lagi hambatan teknologi atau biaya.

B. Rekomendasi

Berdasarkan hasil kajian, penelitian ini merekomendasikan: (1) Pemerintah dan industri energi hendaknya mendorong pendekatan bauran energi berbasis potensi lokal, bukan "satu solusi untuk semua". (2) Program PLTS atap (rooftop solar) perlu dipercepat di perkotaan mengingat biaya yang terus turun dan kemudahan instalasinya. (3) Pengembangan PLTB di wilayah timur Indonesia perlu didorong dengan insentif investasi yang lebih kompetitif. (4) Pengembangan biogas skala komunitas di daerah pertanian perlu diintegrasikan dengan program ketahanan pangan untuk menciptakan nilai ganda. (5) Bagi mahasiswa teknik elektro, pemahaman mendalam tentang karakteristik teknis dan ekonomis masing-masing teknologi ini adalah kompetensi dasar yang wajib dimiliki untuk berkontribusi dalam transisi energi Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Potensi dan Realisasi Energi Baru Terbarukan Indonesia. Jakarta: Ditjen EBTKE. <https://ebtke.esdm.go.id>

Lubis, A., & Dalimi, R. (2021). Kajian Potensi dan Pengembangan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 13(1), 1–12.

Prasetyo, E. A., & Haryono, T. (2022). Analisis Kelayakan Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Bayu di Kawasan Pantai Selatan Jawa. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(2), 87–96.

Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Lembaran Negara RI Tahun 2014 Nomor 300.

Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). (2017). Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017. Sekretariat Kabinet RI.

Yuliani, D., & Suharto, B. (2020). Evaluasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Biogas dari Limbah Kotoran Sapi: Studi Kasus di Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, 6(2), 112–121.