



Analisis Keberlanjutan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Kawasan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulumbu Nusa Tenggara Timur

Dwi Putri Bonita^{1*}, Ake Wihadanto¹, Edi Rusdiyanto¹

¹Magister Studi Lingkungan, Universitas Terbuka, Indonesia

*Corresponding Author's e-mail: dwiputribonita1797@gmail.com

Article History:

Received: November 4, 2025

Revised: November 27, 2025

Accepted: November 30, 2025

Keywords:

Geothermal Energy,
Multidimensional Scaling,
Sustainability, Sustainable
Development

Abstract: This study aims to analyze the sustainability of geothermal energy utilization at the Ulumbu Geothermal Power Plant (PLTP) in East Nusa Tenggara by focusing on five key dimensions: environmental, social, economic, technological, and institutional. The analysis was conducted using the Rapid Appraisal for Multidimension (Rap-MD) method with Multidimensional Scaling (MDS), validated through Monte Carlo simulation to ensure the robustness of the results. Primary data were collected through questionnaires and interviews, while secondary data were obtained from official documents and previous studies. The findings reveal that the sustainability status of PLTP Ulumbu is classified as “moderately sustainable,” with an aggregate index value of 58%. The environmental (60.80%) and social (60.60%) dimensions achieved the highest scores, followed by economic (59.41%), technological (57.24%), and institutional (52.00%) aspects, the latter being the weakest. Sensitive factors influencing sustainability include community education level, poverty rate, land-use conditions, waste treatment technology, and the role of local institutions. These results emphasize the importance of strengthening collaboration among government, PLN, and local communities to maximize geothermal energy benefits, support economic development, and preserve ecological balance. The study provides strategic insights for policymakers and stakeholders in formulating sustainable renewable energy development strategies in Indonesia.

Copyright © 2025, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Bonita, D. P., Wihadanto, A., & Rusdiyanto, E. (2025). Analisis Keberlanjutan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Kawasan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulumbu Nusa Tenggara Timur. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 4(11), 3372–3388. <https://doi.org/10.55681/sentri.v4i11.4912>

PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, urbanisasi, serta industrialisasi yang semakin pesat. Kondisi ini mendorong pemerintah untuk mencari solusi dalam memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan tanpa menambah ketergantungan pada bahan bakar fosil yang kian menipis dan memberikan dampak lingkungan yang serius. Bahan bakar fosil diketahui sebagai penyumbang utama emisi karbon dioksida dan gas rumah kaca, yang mempercepat perubahan iklim global dan mengancam kualitas lingkungan hidup. Oleh karena itu,

transisi menuju energi baru terbarukan (EBT) menjadi sebuah keniscayaan yang tidak hanya dituntut oleh agenda pembangunan nasional, tetapi juga sejalan dengan komitmen global dalam mengurangi emisi karbon serta mendukung tercapainya *Sustainable Development Goals* (SDGs).

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki keunggulan karena ketersediaannya yang relatif stabil, ramah lingkungan, serta potensi besar di Indonesia yang terletak pada jalur *Ring of Fire*. Berdasarkan data Kementerian ESDM, potensi panas bumi nasional mencapai 29,5 GW, namun hingga 2020 pemanfaatannya baru sekitar 3.109,5 MW atau hanya 10,5% dari total potensi. Rendahnya tingkat pemanfaatan ini menunjukkan adanya kesenjangan besar antara potensi dan realisasi yang perlu segera dijembatani melalui kebijakan, investasi, dan inovasi teknologi. Dalam konteks nasional, pemerintah menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada 2025 dan 34% pada 2030, yang menuntut percepatan pengembangan proyek panas bumi, termasuk di wilayah Indonesia timur.

Salah satu upaya nyata adalah pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulumbu di Kabupaten Manggarai, Nusa Tenggara Timur, yang dikelola oleh PT PLN (Persero). PLTP ini awalnya beroperasi dengan kapasitas 4 x 2,5 MW dan direncanakan dikembangkan menjadi 2 x 20 MW. Kehadiran PLTP Ulumbu memiliki arti strategis, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan energi listrik lokal yang selama ini terbatas, tetapi juga untuk mendorong pertumbuhan ekonomi daerah, membuka lapangan kerja, serta mengurangi ketimpangan pembangunan antara wilayah barat dan timur Indonesia. Lebih dari itu, keberadaan PLTP Ulumbu mempertegas peran Indonesia dalam memanfaatkan potensi energi terbarukan untuk memperkuat ketahanan energi nasional.

Namun, pembangunan PLTP Ulumbu juga menimbulkan tantangan multidimensi yang kompleks. Dari aspek lingkungan, terdapat kekhawatiran terkait kualitas udara, air, serta risiko degradasi ekosistem akibat aktivitas eksplorasi dan produksi. Dari aspek sosial, penolakan masyarakat muncul karena perbedaan pemahaman mengenai dampak proyek, gangguan terhadap lahan pertanian, kawasan sakral, serta mata pencaharian tradisional. Dari aspek ekonomi, proyek panas bumi memerlukan biaya investasi awal yang tinggi, serta menghadapi risiko geologi dan ketidakpastian hasil eksplorasi. Dari aspek teknologi, meskipun PLTP Ulumbu telah menerapkan teknologi modern, pengembangan kapasitas lebih besar menuntut penerapan teknologi pengeboran presisi, sistem monitoring real-time, serta inovasi pengolahan limbah untuk memastikan efisiensi dan keberlanjutan. Sementara itu, dari aspek kelembagaan, hambatan utama mencakup koordinasi antar lembaga, dinamika regulasi, serta keterlibatan masyarakat lokal yang masih belum optimal.

Melihat kompleksitas permasalahan tersebut, analisis keberlanjutan PLTP Ulumbu menjadi penting untuk memastikan bahwa pemanfaatan energi panas bumi dapat dilakukan secara efektif, inklusif, dan ramah lingkungan. Penelitian ini menggunakan pendekatan multidimensi dengan menilai aspek lingkungan, sosial, ekonomi, teknologi, dan kelembagaan, untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai status keberlanjutan PLTP Ulumbu. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi faktor pengungkit yang paling berpengaruh dalam meningkatkan indeks keberlanjutan, sehingga hasilnya dapat menjadi rekomendasi strategis bagi pemerintah, PLN, serta pemangku kepentingan lain dalam merumuskan kebijakan energi terbarukan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki kontribusi teoretis dalam pengembangan kajian keberlanjutan energi panas bumi, tetapi juga manfaat praktis berupa acuan dalam pengambilan keputusan, mitigasi konflik sosial, penguatan kelembagaan,

serta perbaikan strategi pengelolaan PLTP yang berkelanjutan. Keberhasilan pengelolaan PLTP Ulumbu akan menjadi contoh penting dalam mendorong pengembangan proyek energi panas bumi lainnya di Indonesia, khususnya di kawasan timur yang memiliki potensi besar namun masih menghadapi banyak keterbatasan.

LANDASAN TEORI

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PTLP)

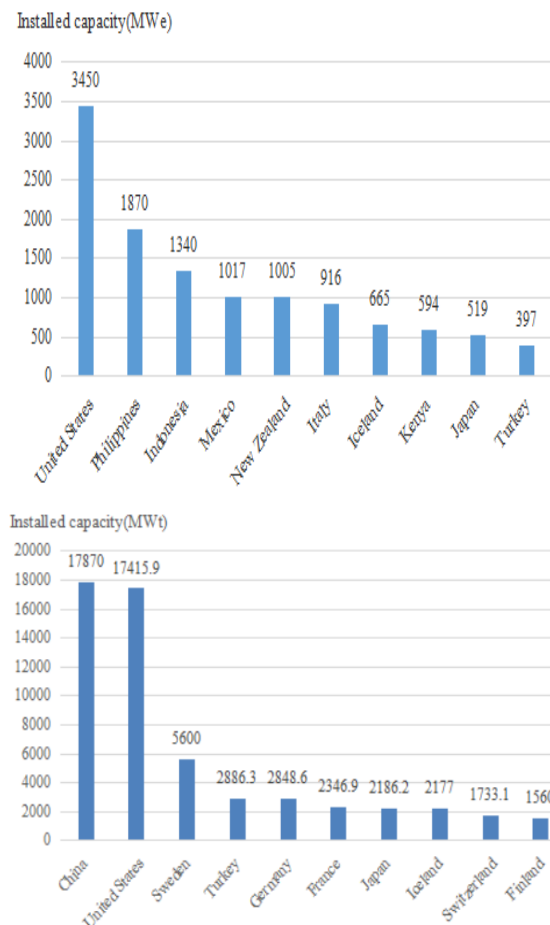
Indonesia memiliki potensi panas bumi yang besar karena berada di jalur cincin api dunia, tersebar di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku, hingga wilayah bekas gunung api purba seperti Bangka Belitung, Papua Barat, Kalimantan, Riau, dan Yogyakarta. Pada 2020, potensi terbukti mencapai 3.387 MW dengan total cadangan 14.626,5 MW. Kapasitas terpasang PLTP meningkat dari 1.438 MW pada 2015 menjadi 2.131 MW pada 2019 melalui tambahan unit di Karaha, Sarulla, Lumut Balai, Sorik Marapi, dan Muaralaboh. Meski demikian, kapasitas ini baru sekitar 8% dari total potensi 25,38 GW. Untuk mempercepat pengembangan, pemerintah telah menetapkan 64 Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP), terdiri dari 17 WKP eksisting dan 47 WKP baru setelah diberlakukannya UU No. 27 Tahun 2003.

Energi Terbarukan dan Energi Panas Bumi

Energi terbarukan muncul sebagai solusi atas keterbatasan energi fosil sekaligus untuk mengurangi dampak negatif penggunaannya, seperti emisi CO₂ penyebab pemanasan global serta SO₂ dan NO₂ yang memicu hujan asam. Menurut International Energy Agency (IEA), energi terbarukan adalah energi yang bersumber dari proses alam yang terus diperbarui, meliputi energi surya, angin, biomassa, panas bumi, air, laut, biofuel, dan hidrogen. Panas bumi sendiri didefinisikan sebagai energi panas dalam kerak bumi yang berpindah dari sumber panas menuju permukaan (Hochstein, 2000). Secara hukum, UU No. 27 Tahun 2003 dan UU No. 21 Tahun 2014 menegaskan bahwa panas bumi merupakan energi panas yang terkandung dalam air panas, uap, dan batuan beserta mineral serta gas ikutan yang tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem geotermal, sehingga untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan.

Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Berbagai Negara

Dalam penelitian (Hou *et al.*, 2018) dalam penelitiannya yang berjudul *Development and utilization of geothermal energy in China : Current practices and future strategies*, dapat dilihat bahwa energi panas bumi sudah banyak digunakan di beberapa negara baik di Asia maupun di luar Asia. Berikut adalah 10 negara teratas dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi di dunia.



Gambar 1. Sepuluh Negara Teratas Dalam Penggunaan Langsung Panas Bumi di Dunia

China memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, terdiri atas sumber daya dangkal, hidro-geothermal, dan *hot dry rock* (HDR), dengan cadangan energi setara miliaran ton batu bara standar. Pemanfaatannya saat ini lebih banyak untuk penggunaan langsung, seperti pemanas dan pendingin, dengan teknologi hidrogeothermal yang sudah relatif maju. Untuk pembangkit listrik, teknologi yang paling efisien adalah sistem uap kering bersuhu tinggi, sementara teknologi lain masih dalam tahap awal.

Dalam Rencana Lima Tahun ke-13 (2016–2020), pemerintah China menargetkan pengembangan energi baru terbarukan, termasuk panas bumi. Namun, kebijakan khusus untuk panas bumi masih terbatas karena menghadapi kendala ekonomi, sosial, teknologi, lingkungan, dan hukum. Untuk mendorong pengembangan lebih lanjut, pemerintah perlu memperkuat dukungan teknis, meningkatkan eksplorasi, mendorong penelitian dan pengembangan teknologi, serta membangun kerangka kebijakan baru yang mencakup jaminan legislatif, mekanisme pasar, dan kerja sama internasional (Hou et al., 2018).

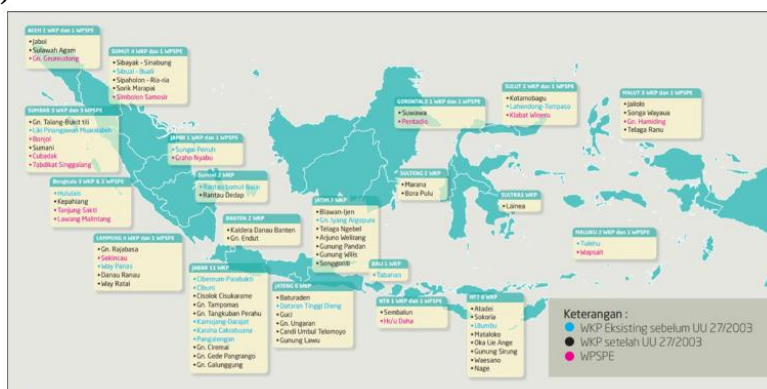
Pengembangan Energi Panas Bumi di Indonesia

Posisi geografis Indonesia di zona *Ring of Fire* menjadikannya salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia. Potensi ini tersebar di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Maluku, serta di wilayah bekas gunung api purba seperti Bangka Belitung, Papua Barat, Kalimantan, Riau, dan Yogyakarta. Hingga tahun 2020, potensi panas bumi yang teridentifikasi mencapai 3.387 MW dengan total cadangan sebesar 14.626,5 MW.

No.	Pulau	Sumber Daya (MW)						Kapasitas Terpasang
		Lokasi	Spekulatif	Hipotetik	Cadangan			
					Mungkin	Terduga	Terbukti	
1	Sumatera	101	2.276	1.557	3.735	1.040,7	1.070,3	744,3
2	Jawa	73	1.265	1.190	3.414	418	1.820	1.253,8
3	Bali	6	70	21	104	110	30	0
4	Nusa Tenggara	31	190	148	892	121	12,5	12,5
5	Kalimantan	14	151	18	13	0	0	0
6	Sulawesi	90	1.365	362	1.041	180	120	120
7	Maluku	33	560	91	497	6	2	0
8	Papua	3	75	0	0	0	0	0
Total		351	5.952	3.387	9.696	1.875,7	3.054,8	2.130,6
					23.965,5			

Gambar 2. Data Potensi Panas Bumi
Sumber: (Khasmadin & Harmoko, 2021)

Kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) di Indonesia meningkat dari 1.438 MW pada 2015 menjadi 2.131 MW pada 2019. Penambahan kapasitas berasal dari PLTP Karaha Unit 1 (30 MW), Sarulla Unit 3 (110 MW), Lumut Balai (55 MW), Sorik Marapi (42,3 MW), dan Muaralaboh (85 MW). Meski demikian, kapasitas tersebut baru sekitar 8% dari total potensi panas bumi Indonesia yang diperkirakan mencapai 25,38 GW. Untuk mendorong pengembangannya, pemerintah telah menetapkan 64 Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP), terdiri atas 17 WKP eksisting sebelum UU No. 27 Tahun 2003 dan 47 WKP yang ditetapkan setelahnya (Khasmadin & Harmoko, 2021).



Gambar 3. peta wilayah Kerja Panas Bumi Menurut WSPE dan UU 27/2003

Potensi Energi Panas Bumi di Berbagai Negara

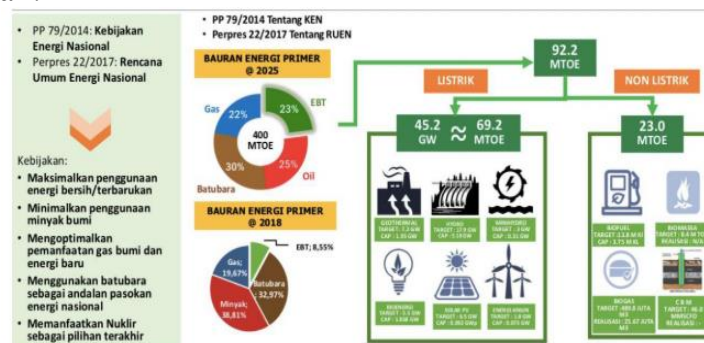
Energi panas bumi semakin penting dalam transisi energi global karena ketersediaannya yang stabil, biaya operasional rendah, dan dampak lingkungan minimal. Teknologi PLTP terbagi atas tiga tipe utama: uap kering, uap kilat, dan siklus biner. Amerika Serikat menjadi produsen terbesar dengan kapasitas 3.639 MW melalui kompleks The Geysers, menghasilkan 16,7 miliar kWh per tahun. Indonesia menempati posisi kedua dengan kapasitas 1.948 MW pada 2018, serta memiliki beberapa proyek besar seperti Gunung Salak (375 MW) dan Sarulla (330 MW), dan diprediksi akan melampaui AS pada 2027.

Filipina berada di posisi ketiga dengan kapasitas 1.868 MW, didukung regulasi seperti Renewable Energy Act 2008 dan Program Net Metering. Turki menempati posisi keempat dengan kapasitas 1.347 MW, sementara Selandia Baru berada di peringkat kelima

dengan kapasitas 1.005 MW yang sebagian besar berasal dari Zona Vulkanik Taupo. Posisi Indonesia di antara produsen utama dunia menunjukkan peran strategis panas bumi dalam memenuhi kebutuhan energi bersih sekaligus mendukung ketahanan energi nasional.

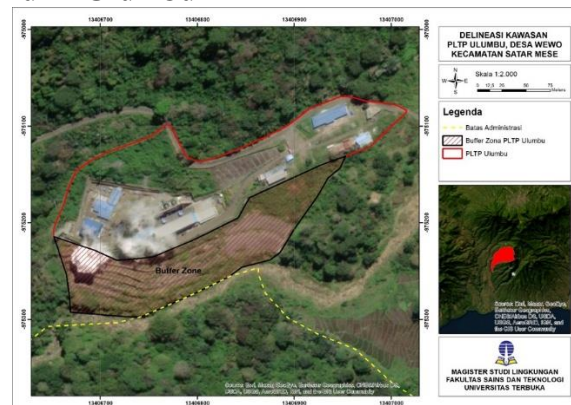
Pengukuran Pemanfaatan Energi Panas Bumi yang Berkelanjutan

Penelitian Nurwahyudin & Harmoko (2020) menekankan bahwa pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia diarahkan oleh Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 79 Tahun 2014. Regulasi tersebut mengatur pemanfaatan sumber daya energi nasional, termasuk panas bumi, dengan menekankan pada penggunaan energi terbarukan seperti tenaga air, perbedaan suhu laut, dan angin untuk mendukung ketenagalistrikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan energi panas bumi di Indonesia selaras dengan kerangka kebijakan nasional dalam upaya memaksimalkan kontribusi energi baru terbarukan bagi ketahanan energi berkelanjutan.



Gambar 4. KEN dan RUEN Panas Bumi

Wilayah Kerja Panas Bumi Ulumbu



Gambar 5. Peta Luas PLTP Ulumbu

PLTP Ulumbu yang dikelola oleh PLN mencakup area 24.963 m² dan beroperasi dengan empat unit pembangkit, masing-masing berkapasitas 2,5 MW. Unit IV mulai beroperasi pada 2011, Unit III pada 2012, serta Unit I dan II pada 2014, dengan total kapasitas produksi mencapai 15 MW. Sistem ini memanfaatkan uap dari tiga sumur panas bumi dengan suhu sekitar 240°C. Dua jenis turbin digunakan, yaitu *back pressure turbine* (unit I dan II) yang membuang uap langsung ke udara, serta *condensing turbine* (unit III dan IV) yang mengembalikan uap menjadi air sebelum diinjeksi kembali ke tanah. Untuk

keselamatan, fasilitas dilengkapi laboratorium dan sistem peringatan gas H₂S, dengan infrastruktur berbahan tahan korosi seperti stainless steel dan galvanis. PLTP Ulumbu menjadi contoh pemanfaatan panas bumi skala menengah yang mendukung pasokan listrik di Nusa Tenggara Timur.

Teori Keberlanjutan

Konsep keberlanjutan diperkenalkan dalam Laporan Brundtland oleh World Commission on Environment and Development (WCED, 1987), yang mendefinisikannya sebagai pembangunan yang mampu memenuhi kebutuhan generasi sekarang tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang. Konsep ini menekankan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan, serta menjadi dasar bagi berbagai kebijakan global, termasuk Sustainable Development Goals (SDGs).

Berbagai teori mendukung kerangka keberlanjutan, antara lain:

1. **Sustainable Development Theory** – menekankan keseimbangan tiga dimensi utama: ekonomi, sosial, dan lingkungan (Brundtland, 1987).
2. **Triple Bottom Line (TBL)** – dikembangkan oleh Elkington (1997) dengan pendekatan *People, Planet, Profit*, yang menilai keberlanjutan organisasi tidak hanya dari segi ekonomi, tetapi juga dampak sosial dan lingkungan.
3. **Natural Capital Theory** – Daly & Costanza (1992) menekankan pentingnya menjaga stok modal alam agar tetap lestari.
4. **Circular Economy Theory** – berfokus pada efisiensi sumber daya melalui prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) untuk mengurangi limbah (MacArthur, 2015).
5. **Industrial Ecology Theory** – meniru ekosistem alami dengan menjadikan limbah sebagai sumber daya dalam sistem tertutup (Pirages, 2016).

Selain itu, pendekatan sistemik (Meadows, 2008) menekankan bahwa keberlanjutan merupakan hasil interaksi kompleks antara dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan yang saling memengaruhi melalui mekanisme umpan balik (*feedback loop*). Dengan memahami titik pengungkit (*leverage points*), kebijakan dapat dirancang lebih efektif untuk mencapai pembangunan berkelanjutan.

Aspek Lingkungan

Aspek lingkungan dalam pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) berperan penting dalam konservasi sumber daya alam, mitigasi perubahan iklim, dan perlindungan ekosistem. Pemanfaatan panas bumi mampu menekan emisi gas rumah kaca serta mengurangi ketergantungan pada energi fosil, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan sumber energi konvensional. Namun, dampak ekologis seperti perubahan karakteristik tanah, penggunaan air tanah, serta potensi emisi gas non-karbon tetap perlu dikendalikan. Penelitian menunjukkan bahwa praktik pengelolaan berkelanjutan, seperti penerapan teknologi re-injection dan sistem pemantauan lingkungan yang ketat, efektif dalam meminimalkan risiko ekologis dan menjaga keseimbangan ekosistem. Dengan demikian, PLTP dapat memberikan manfaat lingkungan yang signifikan jika dioperasikan dengan prinsip keberlanjutan.

Aspek Sosial

Aspek sosial dalam pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) berhubungan erat dengan kesejahteraan masyarakat, keadilan sosial, serta akses terhadap layanan dasar seperti pendidikan dan kesehatan. Keberadaan PLTP dapat memberikan

manfaat melalui peningkatan ekonomi lokal, penciptaan lapangan kerja, serta pembangunan infrastruktur sosial. Studi Hariyadi et al. (2019) menunjukkan bahwa implementasi PLTP telah memperluas akses listrik bagi masyarakat pedesaan, yang berdampak positif terhadap kualitas pendidikan dan layanan kesehatan.

Namun, proyek PLTP juga dapat menimbulkan tantangan sosial, seperti relokasi, perubahan pola mata pencaharian, dan munculnya resistensi masyarakat. Santoso & Kusumasari (2019) menyoroti kasus penolakan PLTP Baturraden oleh Aliansi Selamatkan Slamet, yang menekankan kurangnya partisipasi publik, isu hukum, serta pentingnya pengakuan hak masyarakat atas sumber daya air. Penelitian Putri & Sulhan (2023) juga menegaskan bahwa penolakan masyarakat seringkali dipicu oleh stigma negatif dan keterbatasan pengetahuan tentang energi panas bumi, diperburuk oleh ketidakpastian cadangan geotermal dan masalah perizinan.

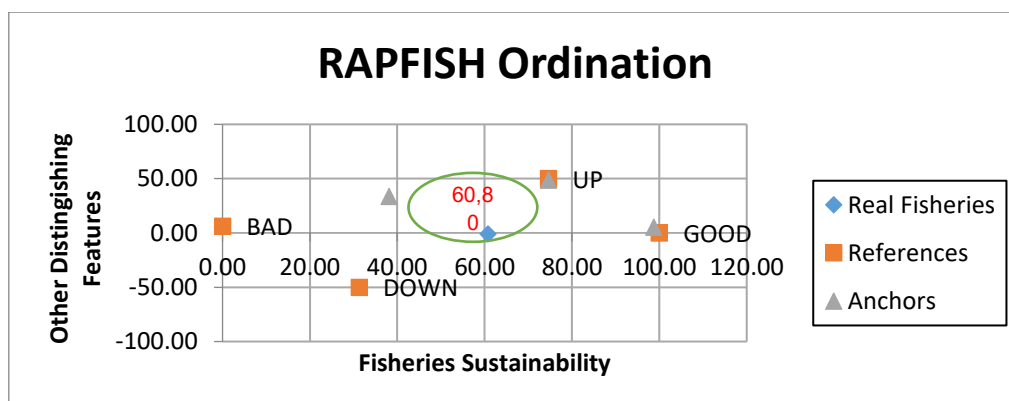
METODE PENELITIAN

Penelitian "Analisis Keberlanjutan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)" menggunakan teknik Rap-Multidimensi (*Rapid Appraisal for Multidimension*) dengan MDS (*Multidimensional Scaling*). **Teknik RAP-Multidimensi** (adalah metode analisis cepat yang menggabungkan pendekatan kualitatif dan kuantitatif untuk mengevaluasi berbagai aspek suatu sistem secara simultan. Metode ini melibatkan identifikasi variabel, pengumpulan data melalui wawancara atau survei, serta analisis menggunakan MDS untuk memetakan hubungan antar variabel dalam bentuk visual. Hasilnya membantu dalam memahami pola keterkaitan faktor-faktor yang berpengaruh dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif. Dengan keunggulan dalam efisiensi, kemampuan analisis multidimensi, serta visualisasi yang intuitif, teknik ini sering digunakan dalam penelitian sosial, ekonomi, lingkungan, dan perencanaan strategis berbasis data. Oleh karena itu penelitian ini merupakan penelitian dengan pendekatan kuantitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

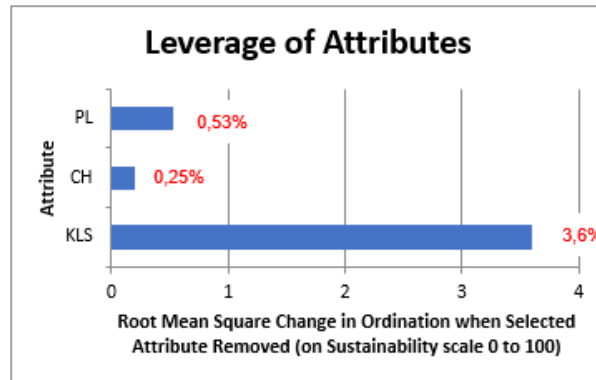
Aspek/Antribut Lingkungan

Dilihat dari data kuantitatif dan kualitatif berupa visualisasi grafik *output* yang dihasilkan pada aspek lingkungan memperoleh nilai indeks keberlanjutan sebesar 60,80 %, dimana nilai indeks keberlanjutan setiap unit berkisar antara 0-100%. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai indeksnya menunjukkan cukup berkelanjutan (*range* 50.00-74.99)



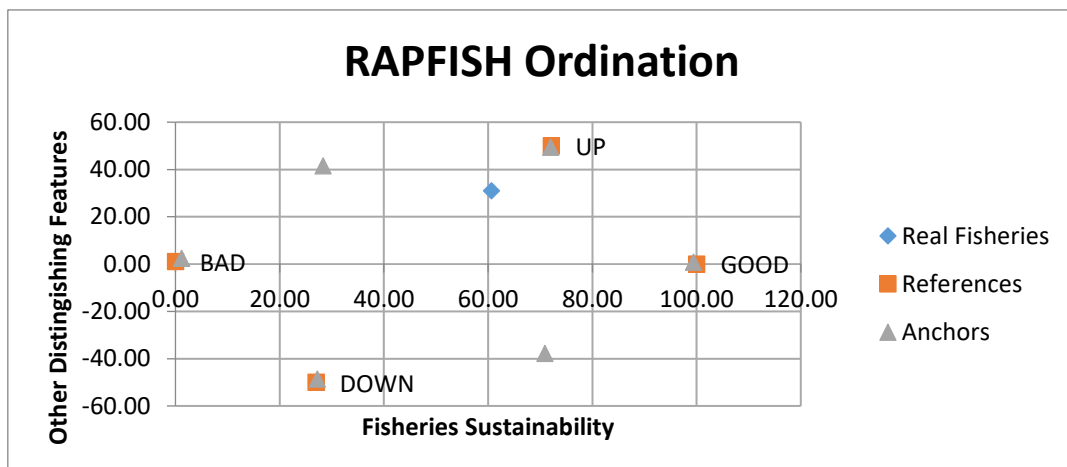
Gambar 6. Indeks Keberlanjutan Aspek Sosial

Atribut pengungkit atau atribut sensitif pada aspek lingkungan dapat dilihat pada gambar 6, untuk mengetahui atribut sensitif yang berpengaruh didasarkan pada nilai koefisien pada *Root Mean Square* (RMS) setiap atribut. Pendekatan yang digunakan untuk menentukan atribut pengungkit adalah hukum nilai tengah, dimana atribut yang paling sensitif ditetapkan adalah atribut yang nilainya diatas nilai rata-rata variabel/atribut. Maka, atribut pengungkit yang berpengaruh sensitif terhadap perubahan nilai indeks keberlanjutan pada aspek lingkungan adalah kondisi Lahan Sekitar 3,6%.

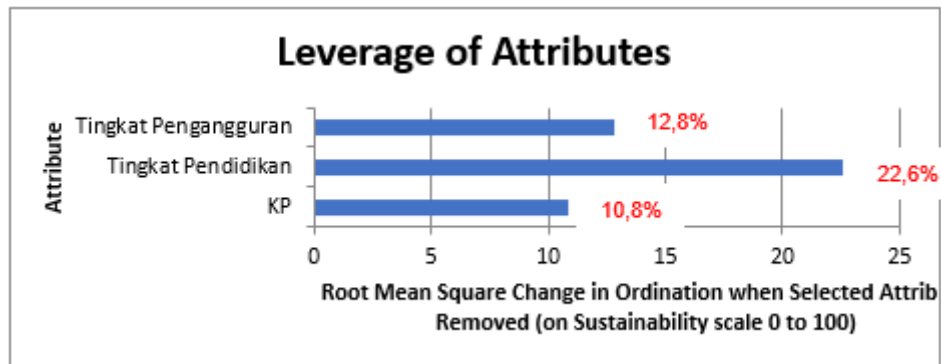


Aspek Sosial

Dilihat dari data kuantitatif dan kualitatif berupa visualisasi grafik *output* yang dihasilkan pada aspek sosial memperoleh nilai indeks keberlanjutan sebesar 60,60 %, dimana nilai indeks keberlanjutan setiap unit berkisar antara 0-100%. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai indeksnya menunjukkan cukup berkelanjutan (*range* 50.00-74.99)

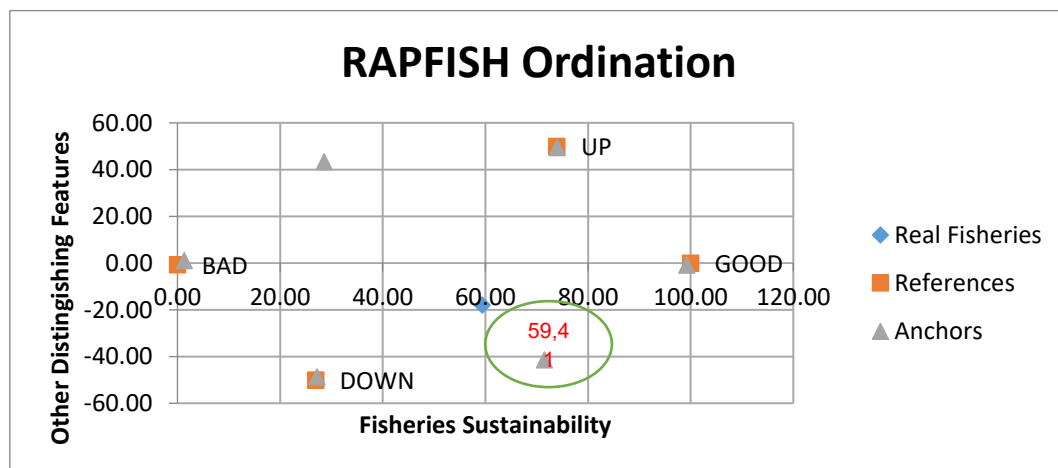


Atribut pengungkit atau atribut sensitif pada aspek sosial dapat dilihat pada gambar 4.4, untuk mengetahui atribut sensitif yang berpengaruh didasarkan pada nilai koefisien pada *Root Mean Square* (RMS) setiap atribut. Pendekatan yang digunakan untuk menentukan atribut pengungkit adalah hukum nilai tengah, dimana atribut yang paling sensitif ditetapkan adalah atribut yang nilainya diatas nilai rata-rata variabel/atribut. Maka, atribut pengungkit yang berpengaruh sensitif terhadap perubahan nilai indeks keberlanjutan pada aspek sosial adalah tingkat Pendidikan 22,6 %.

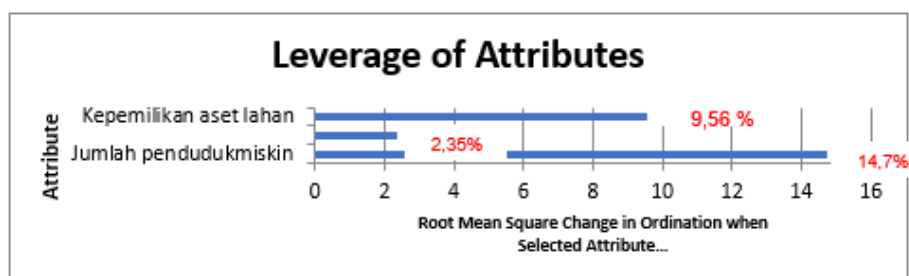


Aspek Ekonomi

Dilihat dari data kuantitatif dan kualitatif berupa visualisasi grafik *output* yang dihasilkan pada aspek ekonomi memperoleh nilai indeks keberlanjutan sebesar 59,41 %, dimana nilai indeks keberlanjutan setiap unit berkisar antara 0-100%. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai indeksnya menunjukkan cukup berkelanjutan (*range* 50.00-74.99)

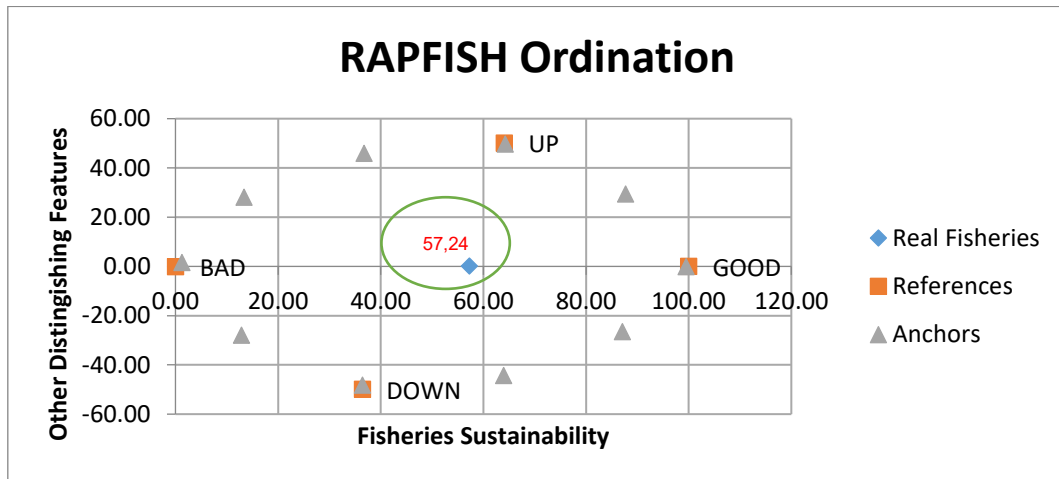


Atribut pengungkit atau atribut sensitif pada aspek ekonomi dapat dilihat pada gambar 4.6, untuk mengetahui atribut sensitif yang berpengaruh didasarkan pada nilai koefisien pada *Root Mean Square* (RMS) setiap atribut. Pendekatan yang digunakan untuk menentukan atribut pengungkit adalah hukum nilai tengah, dimana atribut yang paling sensitif ditetapkan adalah atribut yang nilainya diatas nilai rata-rata variabel/atribut. Maka, atribut pengungkit yang berpengaruh sensitif terhadap perubahan nilai indeks keberlanjutan pada aspek ekonomi adalah jumlah penduduk miskin 14, 7 %.

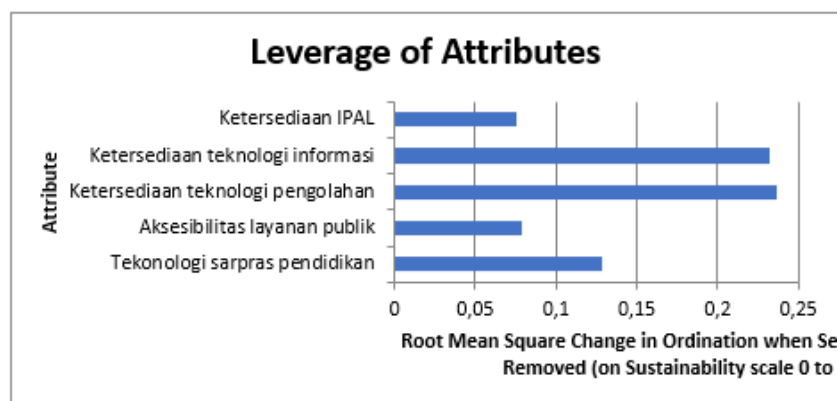


Aspek Teknologi

Dilihat dari data kuantitatif dan kualitatif berupa visualisasi grafik *output* yang dihasilkan pada aspek teknologi memperoleh nilai indeks keberlanjutan sebesar 57,24% dimana nilai indeks keberlanjutan setiap unit berkisar antara 0-100%. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai indeksnya menunjukkan cukup berkelanjutan (*range* 50.00-74.99).

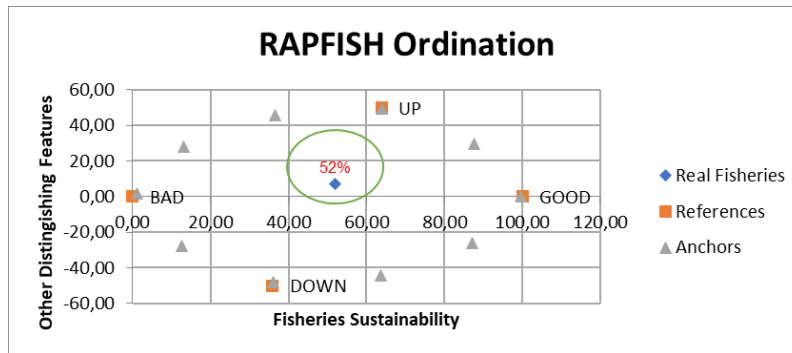


Atribut pengungkit atau atribut sensitif pada aspek Teknologi dapat dilihat pada gambar 4.8, untuk mengetahui atribut sensitif yang berpengaruh didasarkan pada nilai koefisien pada *Root Mean Square* (RMS) setiap atribut. Pendekatan yang digunakan untuk menentukan atribut pengungkit adalah hukum nilai tengah, dimana atribut yang paling sensitif ditetapkan adalah atribut yang nilainya diatas nilai rata-rata variabel/atribut. Maka, atribut pengungkit yang berpengaruh sensitif terhadap perubahan nilai indeks keberlanjutan pada aspek teknologi adalah ketersediaan teknologi pengolahan 0,23% dan ketersediaan teknologi informasi 0,23

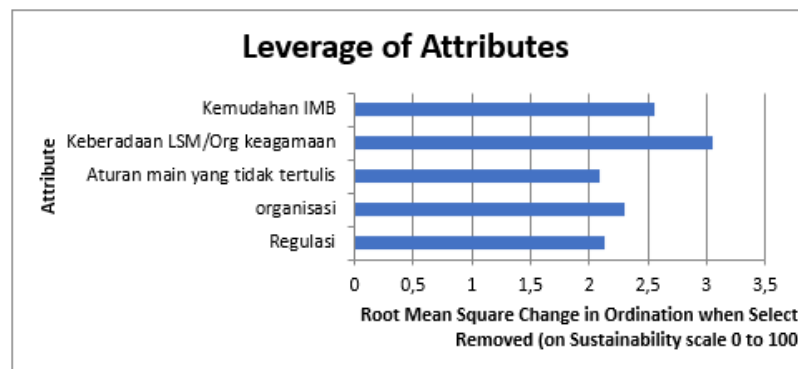


Aspek Kelembagaan

Dilihat dari data kuantitatif dan kualitatif berupa visualisasi grafik *output* yang dihasilkan pada aspek kelembagaan memperoleh nilai indeks keberlanjutan sebesar 52% dimana nilai indeks keberlanjutan setiap unit berkisar antara 0-100%. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai indeksnya menunjukkan cukup berkelanjutan (*range* 50.00-74.99).



Atribut pengungkit atau atribut sensitif pada aspek Kelembagaan dapat dilihat pada gambar 4.10, untuk mengetahui atribut sensitif yang berpengaruh didasarkan pada nilai koefisien pada *Root Mean Square* (RMS) setiap atribut. Pendekatan yang digunakan untuk menentukan atribut pengungkit adalah hukum nilai tengah, dimana atribut yang paling sensitif ditetapkan adalah atribut yang nilainya diatas nilai rata-rata variabel/atribut. Maka, atribut pengungkit yang berpengaruh sensitif terhadap perubahan nilai indeks keberlanjutan pada aspek kelembagaan adalah keberadaan LSM/ organisasi keagamaan 3,04%, Kemudaha IMB 2,55%, Organisasi 2,29%, Regulasi 2,13%, dan aturan main tidak tertulis 2,08%



Validasi Hasil Penilaian Indeks Keberlanjutan

a. Validasi Berdasarkan Nilai *S-tress* dan nilai *Square Correlation* (R^2)

Validasi berdasarkan nilai *S-tress* dan nilai *Square Correlation* (R^2) dilakukan untuk menentukan kondisi *goodness of fit* yakni apakah data atau nilai yang didapat tersebut real. Nilai stress yang kurang dari 0,25 dan R^2 yang lebih dari 0,80 menunjukkan bahwa penilaian indeks keberlanjutan bersifat valid.

Aspek	Parameter		Keterangan
	<i>S-tress</i> (<0.25)	R^2 (>0.80)	
Aspek Lingkungan	0,22	0,91	Valid
Aspek Sosial	0,17	0,91	Valid
Aspek Ekonomi	0,18	0,92	Valid

Aspek	Parameter		Keterangan
	<i>S-tress</i> (<0.25)	R2 (>0.80)	
Aspek Teknologi	0,17	0,91	Valid
Aspek Kelembagaan	0,17	0,92	Valid

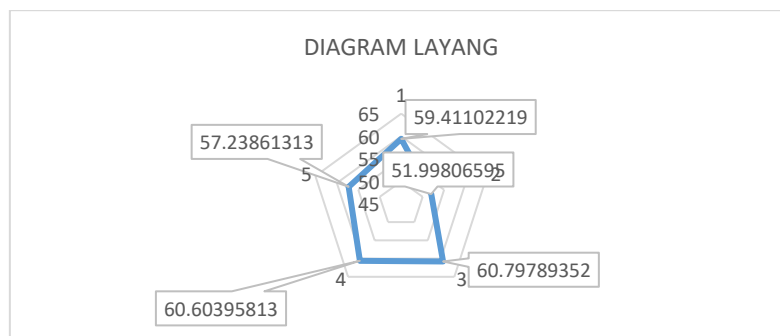
b. Validasi Hasil Penilaian Indeks Dengan Simulasi Monte Carlo

Validasi berdasarkan perhitungan selisih antara penilaian indeks keberlanjutan dari kelima aspek dengan hasil simulasi monte carlo, dengan selang kepercayaan 95% atau nilai error 5%. Apabila hasil selisih atau galat antara nilai keberlanjutan dengan hasil simulasi tidak lebih dari 5% maka dikatakan layak atau valid.

Aspek	Indeks Keberlanjutan		Galat (%)	Keterangan
	Hasil Penilaian	Hasil Simulasi		
Aspek Lingkungan	60,80	60.79	0,01	Valid
Aspek Sosial	60.60	60.60	0,00	Valid
Aspek Ekonomi	59,41	59.41	0,00	Valid
Aspek Teknologi	57,24	57.23	0,01	Valid
Aspek Kelembagaan	52.00	51.99	0,00	Valid

Status Keberlanjutan Pemanfaatan Energi Panas Bumi PTLP Ulumbu

Setelah mendapatkan indeks keberlanjutan dari pemanfaatan energi panas bumi di PLTP Ulumbu NTT, diperoleh bahwa aspek lingkungan memiliki indeks 60,80 %, aspek sosial memiliki indeks 60,60 %, aspek ekonomi 59,41%, aspek teknologi 57,24 % dan aspek kelembagaan 52%. Secara agregat indeks keberlanjutan pemanfaatan energi panas bumi PLTP Ulumbu sebesar 58% artinya cukup berkelanjutan.



Aspek Keberlanjutan	Hasil Penilaian	Status Keberlanjutan
Aspek Lingkungan	60,80	Cukup Berkelanjutan
Aspek Sosial	60.60	Cukup Berkelanjutan
Aspek Ekonomi	59,41	Cukup Berkelanjutan
Aspek Teknologi	57,24	Cukup Berkelanjutan
Aspek Kelembagaan	52.00	Cukup Berkelanjutan
Agregasi/Gabungan	58,00	Cukup Berkelanjutan

Rekomendasi Keberlanjutan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di PLTP Ulumbu

Aspek	Atribut sensitif	Rekomendasi
Lingkungan	Kondisi lahan sekitar	Rehabilitasi lingkungan dengan reboisasi dan menjaga keberadaan vegetasi asli untuk mendukung keseimbangan ekosistem di sekitar PLTP.
Sosial	Tingkat pendidikan	Penyediaan fasilitas pendidikan yang memadai di sekitar PLTP agar tingkat pendidikan masyarakat meningkat.
Ekonomi	Jumlah penduduk miskin	Mendorong pengembangan usaha kecil dan menengah di sekitar area PLTP sebagai bentuk multiplier effect pembangunan.
Teknologi	Ketersediaan teknologi informasi permukiman	Mengadopsi teknologi terbaru yang ramah lingkungan serta memberikan pelatihan kepada tenaga kerja lokal terkait penggunaan dan pemeliharaan teknologi.
	Ketersediaan teknologi pengolahan sampah/limbah padat	Berkolaborasi dengan lembaga riset lokal untuk menyesuaikan teknologi dengan kebutuhan dan kondisi setempat.
Kelembagaan	keberadaan LSM/ organisasi keagamaan	Membentuk tim terpadu dari pemerintah pusat, daerah, dan masyarakat untuk memastikan

Aspek	Atribut sensitif	Rekomendasi
		koordinasi yang efektif dalam pengelolaan proyek. Mengadakan forum diskusi publik secara berkala untuk meningkatkan transparansi dan mengakomodasi masukan masyarakat dalam setiap tahap proyek.

KESIMPULAN

Pembangunan PLTP Ulumbu dianalisis melalui lima aspek utama yang saling berkaitan dalam mendukung keberlanjutan wilayah, yaitu sosial, ekonomi, lingkungan, teknologi, dan kelembagaan. Aspek sosial mencakup kepadatan penduduk, tingkat pendidikan, dan pengangguran yang memengaruhi adaptasi masyarakat terhadap perubahan. Aspek ekonomi dilihat dari tingkat kemiskinan, pendapatan, dan kepemilikan aset lahan, sedangkan aspek lingkungan berfokus pada kondisi lahan, curah hujan, serta pengelolaan limbah. Aspek teknologi mencakup sarana pendidikan, kesehatan, teknologi informasi, dan pengolahan limbah, sementara aspek kelembagaan terkait dengan regulasi, organisasi formal dan nonformal, aturan tidak tertulis, serta kemudahan perizinan.

Analisis keberlanjutan menggunakan pendekatan *Multidimensional Scaling* (MDS) menunjukkan bahwa seluruh aspek berada pada kategori “cukup berkelanjutan”, dengan indeks berkisar antara 52% hingga 60%. Aspek lingkungan (60,80%) dan sosial (60,60%) memperoleh skor tertinggi, diikuti aspek ekonomi (59,41%), teknologi (57,24%), dan kelembagaan (52,00%) sebagai aspek terlemah. Validasi dengan simulasi Monte Carlo menghasilkan selisih kurang dari 1% serta nilai S-Stress dan R^2 yang ideal, sehingga model analisis dapat dinyatakan reliabel dan akurat.

Melalui analisis leverage, faktor pengungkit utama yang berpengaruh terhadap keberlanjutan PLTP Ulumbu berhasil diidentifikasi. Tingkat pendidikan menjadi faktor dominan pada aspek sosial, sementara jumlah penduduk miskin berperan penting dalam aspek ekonomi. Kondisi lahan sekitar memengaruhi kualitas lingkungan, sedangkan ketersediaan teknologi pengolahan limbah menjadi kunci pada aspek teknologi. Pada aspek kelembagaan, organisasi nonformal seperti LSM dan kelompok keagamaan berfungsi memperkuat partisipasi masyarakat serta kontrol sosial. Faktor-faktor sensitif ini perlu menjadi prioritas dalam strategi pembangunan agar keberlanjutan PLTP Ulumbu dapat lebih terjamin.

Saran

Hasil analisis menunjukkan bahwa aspek teknologi dan kelembagaan memiliki indeks keberlanjutan terendah, dengan atribut seperti teknologi pengolahan limbah, informasi permukiman, dan mekanisme perizinan menunjukkan kontribusi rendah. Kondisi ini menandakan perlunya peningkatan pemanfaatan teknologi yang lebih efisien serta penguatan peran organisasi nonformal untuk memperkuat partisipasi masyarakat. Keterbatasan penelitian ini terletak pada pendekatan kuantitatif yang belum mampu menangkap dinamika sosial dan nilai budaya lokal secara mendalam, sehingga penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode campuran (*mixed-method*), termasuk

wawancara, FGD, observasi partisipatif, serta integrasi indikator kelembagaan berbasis budaya lokal dan data spasial guna memperkaya analisis keberlanjutan PLTP.

DAFTAR REFERENSI

- Abdullah, I. (2019). *Peran Penggunaan Energi Terbarukan Dan Efisiensi Energi Terhadap Emisi Karbon Dioksida Di Negara Negara Industri Baru*.
- Afraah, S. M., Sofyandi, M. S., Mulyani, M., Ramadhan, G. D., Sajiwo, B., Bakti, G. N., Ahmadi, W. F., Rofiah, S., Nurjannah, S., & Wegayanti, I. A. N. (2024). Pelatihan Manajemen Sampah Berbasis Rumah Tangga melalui Penerapan Mini Komposter pada Kelompok PKK di Bantul. *Journal of Appropriate Technology for Community Services*, 6(1), 29–39. <https://doi.org/10.20885/jattec.vol6.iss1.art4>
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2022). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment* - (13th ed.). <https://faculty.cengage.com/works/9780357452073>
- Alrikabi, N. K. M. A. (2014). Renewable Energy Types. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(1), 61–64. <https://doi.org/10.7763/jocet.2014.v2.92>
- Badan Pusat Statistik Provinsi Nusa Tenggara Timur. (2024). *Upah Minimum Kabupaten/Kota (UMR)*. <https://ntt.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTYyZlZl=/upah-minimum-kabupaten-kota-umr-sebulan.html>
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI Nomor 03–1733–2004 Tentang Tata Cara Perencanaan Lingkungan Perumahan di Perkotaan. 2004, 11. http://johannes.lecture.ub.ac.id/files/2012/10/Tata-Cara-Perencanaan-Lingkungan-Perumahan-di-Perkotaan_-SNI-03-1733-2004.pdf
- Brundtland, C. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press. <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2018). Research Design. In *Research methods in education*. Routledge. <https://www.routledge.com/Research-Methods-in-Education/Cohen-Manion-Morrison/p/book/9781138209886>
- Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, 6(1), 37–46. <http://www.jstor.org/stable/2385849>
- Creswell, Jhon W. (2014). *Qualitative, Quantitative, and Mixed-Methods Research* (3rd ed.). SAGE PublicationsSAGE CA: Los Angeles, CA. <https://doi.org/10.1128/microbe.4.485.1>
- Fandari, A. El, Suprayitno, G., & Daryanto, A. (2014). Pengembangan Energi Panas Bumi yang Berkelanjutan. *Semesta Teknika*, 17(1), 68–82. <https://doi.org/10.18196/st.v17i1.412>
- Fauzi, A., & Anna, S. (2005). *Permodelan Sumberdaya Perikanan dan Kelautan Untuk Analisis Kebijakan*. Pt Geamedia Pustaka Utama.
- Forestin, K. V., Dewi, E. N., & Widowati, I. (2024). Analysis of Sustainability Status and Management of Brown Seaweed *Sargassum* sp. in the Waters of Ujung Kulon Conservation Area. *Asian Journal of Current Research*, 9(2), 25–38. <https://doi.org/10.56557/ajocr/2024/v9i28561>
- Holden, E., Linnerud, K., & Banister, D. (2017). The Imperatives of Sustainable Development. *Sustainable Development*, 25(3), 213–226. <https://doi.org/10.1002/sd.1647>

- Hou, J., Cao, M., & Liu, P. (2018). Development and utilization of geothermal energy in China: Current practices and future strategies. *Renewable Energy*, 125, 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.115>
- <https://ekonomi.bisnis.com>. (2023). *Ini 5 Negara Penghasil Energi Panas Bumi Terbesar di Dunia*. <https://ekonomi.bisnis.com/read/20230224/44/1631464/ini-5-negara-penghasil-energi-panas-bumi-terbesar-di-dunia-indonesia-termasuk>