

Pemilihan Alternatif Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Pada Program Listrik Pedesaan Dengan Pendekatan Multi Kriteria

Harisma Citra Siallagan*, I Nyoman Pujawan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: harisma.siallagan@gmail.com*

Keywords:

fuzzy analytical hierarchy process (fahp), multi criteria decision making (mcdm), rural electrification

Abstract

Limited access to electricity in disadvantaged, frontier, and outermost (3T) areas remains a major challenge in supporting equitable development, particularly in Central Sulawesi Province. The selection of renewable energy power generation technologies for rural electrification programs requires a decision-making approach that considers various technical, economic, social, and environmental aspects. This study aims to identify the criteria influencing the selection of 3T rural power generation alternatives, determine the priority weights of each criterion, and recommend the most suitable renewable energy power generation alternative for rural electrification programs in Central Sulawesi Province. The research applies a Multi Criteria Decision Making (MCDM) approach using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method to determine the priority weights of criteria and evaluate renewable energy alternatives. The criteria considered include technical, economic, environmental, social, and operational sustainability aspects. The results indicate that each criterion has different importance levels in determining the optimal power generation alternative, with technical feasibility and sustainability aspects becoming dominant factors in the decision-making process. Based on the weighting process and alternative ranking, the study identifies the most appropriate renewable energy generation option to support electricity access in 3T rural areas of Central Sulawesi Province. This research provides a systematic and objective decision-making framework that can assist government institutions and stakeholders in planning sustainable renewable energy infrastructure development.

Kata Kunci:

fuzzy analytical hierarchy process (fahp), multi criteria decision making (mcdm), listrik pedesaan

Abstrak

Keterbatasan akses energi listrik di wilayah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T) menjadi salah satu tantangan utama dalam mendukung pemerataan pembangunan, khususnya di Provinsi Sulawesi Tengah. Pemilihan teknologi pembangkit listrik energi terbarukan untuk program listrik pedesaan memerlukan pendekatan pengambilan keputusan yang mempertimbangkan berbagai aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kriteria yang memengaruhi pemilihan alternatif pembangkit listrik desa 3T, menentukan tingkat kepentingan setiap kriteria, serta memberikan rekomendasi alternatif pembangkit listrik terbaik untuk diterapkan di Provinsi Sulawesi Tengah. Metode penelitian menggunakan pendekatan Multi Criteria Decision Making (MCDM) dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan bobot prioritas kriteria dan melakukan evaluasi terhadap alternatif pembangkit energi terbarukan. Kriteria yang digunakan meliputi aspek teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, dan keberlanjutan operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kriteria memiliki tingkat kepentingan yang berbeda dalam menentukan keputusan pemilihan pembangkit, dengan aspek teknis dan keberlanjutan menjadi faktor dominan dalam proses evaluasi. Berdasarkan hasil pembobotan dan peringkat alternatif, diperoleh alternatif pembangkit energi terbarukan yang paling sesuai untuk mendukung kebutuhan listrik pedesaan di wilayah 3T Provinsi Sulawesi Tengah. Penelitian ini

Pencapaian rata-rata RDB berdasarkan Regional pengelolaan listrik desa, antara lain: RDB Regional SUMKAL sebesar 96,47%, RDB Regional JAMALI sebesar 99,98% dan RDB Regional SULMAPANA sebesar 78,76%. Regional SULMPANA masih tertinggal jauh dalam pencapaian RDB, dimana sebesar 21,24% RDB belum tercapai. Pada Roadmap Tahun 2025-2029 diprogramkan pembangunan listrik desa terhadap sebanyak 6.354 desa di Regional SULMAPANA untuk mencapai RDB 100%.

Dalam proses melistriki desa-desa, PLN mengutamakan melalui Grid extension dimana pembangunan hanya meliputi pembangunan jaringan distribusi, tetapi jika tidak terdapat jaringan eksisting maka perlu dibangun Pembangkit baru (*Off-Grid*) di daerah tersebut. Program listrik desa juga diarahkan untuk menggunakan potensi sumber energi terbarukan setempat dengan tarif yang sudah ditetapkan pemerintah, hal ini untuk mendukung komitmen pemerintah untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29%. Berdasarkan survei awal yang sudah dilakukan masing-masing Unit Induk Wilayah terkait, dari 6.354 desa belum terlistriki di Regional SULMAPANA terdapat 3.460 desa yang perlu dilakukan pembangunan pembangkit baru (*Off-Grid*) karena jauh dari jaringan eksisting. Pembangunan pembangkit listrik tersebut dibagi menjadi 2 jenis pembangkit, yaitu pembangkit komunal pada 693 desa dan pembangkit individu pada 2.767 desa. Pembangkit komunal ditujukan untuk penyediaan energi listrik dengan pembangkit terpusat dengan kapasitas tertentu yang digunakan untuk melistriki suatu kawasan desa/ dusun tanpa terkoneksi dengan jaringan eksisting. Sedangkan pembangkit individu ditujukan untuk penyediaan energi listrik secara terpisah menggunakan PLTS Supersun pada masing-masing rumah tangga pada suatu desa/ dusun dengan lokasi antar rumah cenderung tersebar berjauhan, jumlah calon pelanggan sedikit (<40 rumah tangga), pemakaian listrik yang rendah serta terdapat keterbatasan lahan dan kondisi geografis. Rekapitulasi rencana pembangunan listrik desa di Regional SULMAPANA dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rekapitulasi Rencana Pembangunan Listrik Desa di Regional SULMAPANA

Provinsi	Pembangkit Komunal (Desa)	Pembangkit Individu SUPERSUN (Desa)	Tanpa Pembangkit (Desa)	Total Desa
SULAWESI BARAT		9	125	134
SULAWESI SELATAN	26	44	98	168
SULAWESI TENGGARA	8	25	31	64
GORONTALO			27	27
SULAWESI TENGAH	69	4	103	176
SULAWESI UTARA	3		227	230
MALUKU	80	1	64	145
MALUKU UTARA	56	4	40	100
NUSA TENGGARA BARAT			101	101
NUSA TENGGARA TIMUR	35		864	899
PAPUA	43	16	171	230
PAPUA BARAT	222		23	245
PAPUA BARAT DAYA	66	15	366	447
PAPUA PEGUNUNGAN	5	1.875	242	2122
PAPUA SELATAN	57	239	40	336

PAPUA TENGAH	23	535	372	930
TOTAL	693	2.767	2.894	6.354

Sumber: Roadmap PT PLN (Persero) tahun 2025-2029

Berdasarkan survey awal semua desa tersebut memiliki potensi energi surya (PLTS) dan energi bayu (PLTB), sedangkan potensi energi mikro hidro (PLTMH) ditemukan di 22 desa yang terletak di Provinsi Sulawesi Tengah seperti dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Daftar Usulan Pembangunan Pembangkit Listrik (*Off-Grid*) pada Desa 3T dengan Potensi Energi PLTS, PLTB dan PLTMH di Provinsi Sulawesi Tengah

No	Tahun Roadmap	Kabupaten	Kecamatan	DESA	Kapasitas Pembangkit (kW/kWp)	Jumlah Calon Pelanggan
1	2026	SIGI	Pipikoro	Kantewu	90	231
2	2026	SIGI	Pipikoro	Kantewu II	85	219
3	2026	SIGI	Pipikoro	Lawe	45	114
4	2026	SIGI	Pipikoro	Lonebasa	105	271
5	2026	SIGI	Pipikoro	Mamu	51	131
6	2026	SIGI	Pipikoro	Mapahi	31	80
7	2026	SIGI	Pipikoro	Masewo	36	92
8	2026	SIGI	Pipikoro	Onu	82	212
9	2026	SIGI	Pipikoro	Pelempea	54	138
10	2026	SIGI	Pipikoro	Poluroa	40	102
11	2026	SIGI	Pipikoro	Porelea II	78	201
12	2026	SIGI	Pipikoro	Porelea	60	153
13	2026	SIGI	Pipikoro	Tuwo Tanijaya	55	141
14	2026	SIGI	Pipikoro	Morui II	29	75
15	2026	SIGI	Kulawi Selatan	Moa	25	64
16	2027	BANGGAI	Pagimana	Baloa Doda	61	157
17	2027	SIGI	Kulawi	Banggaiba	70	181
18	2027	SIGI	Kulawi	Rantewulu	106	272
19	2027	SIGI	Kulawi	Siwongi	106	272
20	2027	SIGI	Kulawi	Towulu	160	412
21	2027	SIGI	Pipikoro	Banasu	52	130
22	2027	SIGI	Pipikoro	Kalamanta	50	95

Sumber: Roadmap PT PLN (Persero) tahun 2025-2029

Pembangunan pembangkit Listrik komunal di perdesaan *off-grid* selama ini dominan memanfaatkan energi surya (PLTS) karena dinilai modular, cepat dibangun dan sesuai dengan arah pengembangan energi terbarukan. Kebiasaan penerapan suatu teknologi tidak selalu menunjukkan bahwa teknologi tersebut merupakan pilihan paling optimal untuk seluruh

kondisi wilayah. Setiap desa *off-grid* memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari sisi potensi sumber energi, kondisi geografis, pola beban, aksesibilitas, kemampuan operasi dan pemeliharaan dalam jangka panjang, hingga penerimaan masyarakat. Oleh karena itu, keputusan pemilihan teknologi seharusnya tidak hanya didasarkan pada pola yang sudah biasa dilakukan, tetapi perlu melakukan evaluasi alternatif berdasarkan kriteria yang lebih kompleks secara objektif dan terukur. Dengan demikian, rekomendasi teknologi yang dihasilkan diharapkan lebih tepat guna, dapat diterima masyarakat, memiliki dampak lingkungan yang terkendali, serta mampu mendukung keberlanjutan penyediaan Listrik di wilayah pedesaan *off-grid*, khususnya Kabupaten Sigi dan Banggai.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini berfokus pada proses pengambilan keputusan dalam menentukan alternatif pembangkit listrik energi terbarukan yang paling sesuai untuk mendukung Program Listrik Pedesaan di Provinsi Sulawesi Tengah. Permasalahan utama yang dikaji mencakup identifikasi berbagai kriteria yang berpengaruh terhadap pemilihan alternatif pembangkit listrik energi terbarukan serta penentuan tingkat kepentingan masing-masing kriteria tersebut dalam proses pengambilan keputusan. Selain itu, penelitian ini juga diarahkan untuk menentukan alternatif pembangkit listrik terbaik yang dapat direkomendasikan untuk diterapkan pada wilayah pedesaan, khususnya daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T) di Provinsi Sulawesi Tengah.

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai kriteria yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan alternatif pembangkit listrik desa 3T berbasis energi terbarukan di Provinsi Sulawesi Tengah. Selanjutnya, penelitian ini bertujuan untuk menentukan bobot tingkat kepentingan dari setiap kriteria yang digunakan sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan pemilihan alternatif pembangkit listrik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang objektif dan sistematis bagi para pemangku kepentingan dalam melakukan evaluasi serta menentukan alternatif pembangkit listrik energi terbarukan yang paling optimal untuk mendukung keberlanjutan Program Listrik Pedesaan di Provinsi Sulawesi Tengah.

METODE PENELITIAN

Menentukan Kriteria yang Sesuai untuk Seleksi Pembangkit di Pedesaan Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai

Berdasarkan informasi kriteria dari literatur yang terdapat Bab II, sebuah penelitian yang dilakukan oleh Giri et al pada tahun 2024 didapatkan kandidat kriteria-subkriteria potensial sebagai acuan dimana kriteria-subkriteria tersebut sebelumnya digunakan sebagai kriteria dalam pemilihan alternatif pembangkit energi terbarukan. Kriteria-subkriteria tersebut direkomendasikan untuk diterapkan di negara berkembang termasuk Indonesia dengan melibatkan pakar dan pemangku kepentingan lokal agar mendapatkan hasil yang lebih representatif. Selanjutnya dilakukan seleksi terhadap kandidat kriteria-subkriteria tersebut yang dinilai oleh pakar paling sesuai diterapkan untuk kebutuhan desa 3T di Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai. Selain ini para pakar juga akan menilai apakah ada kriteria yang tumpang tindih dari kandidat yang tersedia dan juga usulan kriteria lain yang belum terdapat pada kandidat tersebut.

Pengumpulan data dilakukan dengan memberikan kuesioner kepada beberapa ahli (praktisi) di Divisi Listrik Desa PT PLN (Persero). Jumlah responden ahli yang terlibat pada proses pemilihan kriteria, yaitu sebanyak 7 (tujuh) orang praktisi di bidang pengelolaan Listrik desa di PT PLN (Persero) dengan pengalaman kerja minimal 10 tahun.

Menentukan Pembangkit Listrik yang Potensial untuk Masing-Masing Desa

Berdasarkan informasi alternatif pembangkit listrik yang potensial untuk masing-masing desa berdasarkan potensi energi setempat dan dari beberapa literatur yang terdapat pada Bab II, kemudian dibuat beberapa analisa awal untuk menentukan alternatif yang sesuai untuk diseleksi sebagai alternatif pembangkit listrik di masing-masing desa *off-grid* yang diusulkan. Setelah didapatkan kriteria dan alternatif yang sesuai untuk diseleksi, kemudian dengan menggunakan bantuan metode FAHP akan dilakukan proses seleksi tersebut untuk mendapatkan alternatif terbaik.

Penelitian ini menggunakan beberapa kriteria dengan parameter yang dapat diukur secara kuantitatif dan kualitatif untuk mengambil keputusan. Dalam penilaian keputusan ini tentunya akan dihadapkan dengan berbagai kondisi yang tidak pasti begitu juga preferensi penilai yang berbeda-beda dari berbagai macam bidang yang terlibat. Metode *Fuzzy AHP* diharapkan dapat memberikan penilaian yang lebih baik dan kompleks dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat.

Pembuatan, Penyebaran dan Pengisian Kuisioner

Untuk kebutuhan analisa FAHP untuk penilaian kriteria dan alternatif, penulis menyebarkan kuisioner kepada 10 orang responden ahli yang terdiri dari responden yang telah menjalani masa kerja minimal 8 tahun, memiliki latar belakang pekerjaan di bidang Listrik Pedesaan yang pengelola desa yang diteliti sehingga diharapkan didapatkan data yang sesuai untuk kebutuhan analisa FAHP dalam menentukan alternatif terbaik. Terdapat 2 responden yang menduduki jabatan manajemen menengah, 5 responden manajemen dasar dan 3 responden generalist yang mengelola Listrik Pedesaan Pedesaan di PT PLN (Persero) yang dapat memberikan data dan penilaian terkait program pembangunan listrik pedesaan di Indonesia.

Adapun penjelasan mengenai isi kuisioner akan dijelaskan pada bab IV.

Perhitungan Bobot Kriteria

1. Data dari responden yang didapatkan dari kuisioner kemudian dibuatkan matriks perbandingan AHP untuk setiap penilaian kriteria dan penilaian alternatif dari setiap responden.
2. Melakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai maksimum eigen value, consistency index (CI) dan consistency ratio (CR) dari masing-masing responden.
3. Memastikan $CR \leq 10\%$ untuk setiap penilaian kriteria dan alternatif dari setiap responden. Jika didapatkan ada $CR > 10\%$, maka perlu diadakan diskusi lebih lanjut dengan responden untuk memperbaiki penilaian sehingga jadi $CR \leq 10\%$.
4. Jika setelah diskusi lanjut ternyata masih ada nilai CR masih $> 10\%$ pada penilaian kriteria ataupun penilaian alternatif dari salah satu responden, maka data dari responden tersebut tidak dapat diterima.
5. Hanya data kuisioner penilaian kriteria dan penilaian alternatif dengan nilai $CR \leq 10\%$ yang akan dilanjutkan ke tahap Fuzzy AHP.

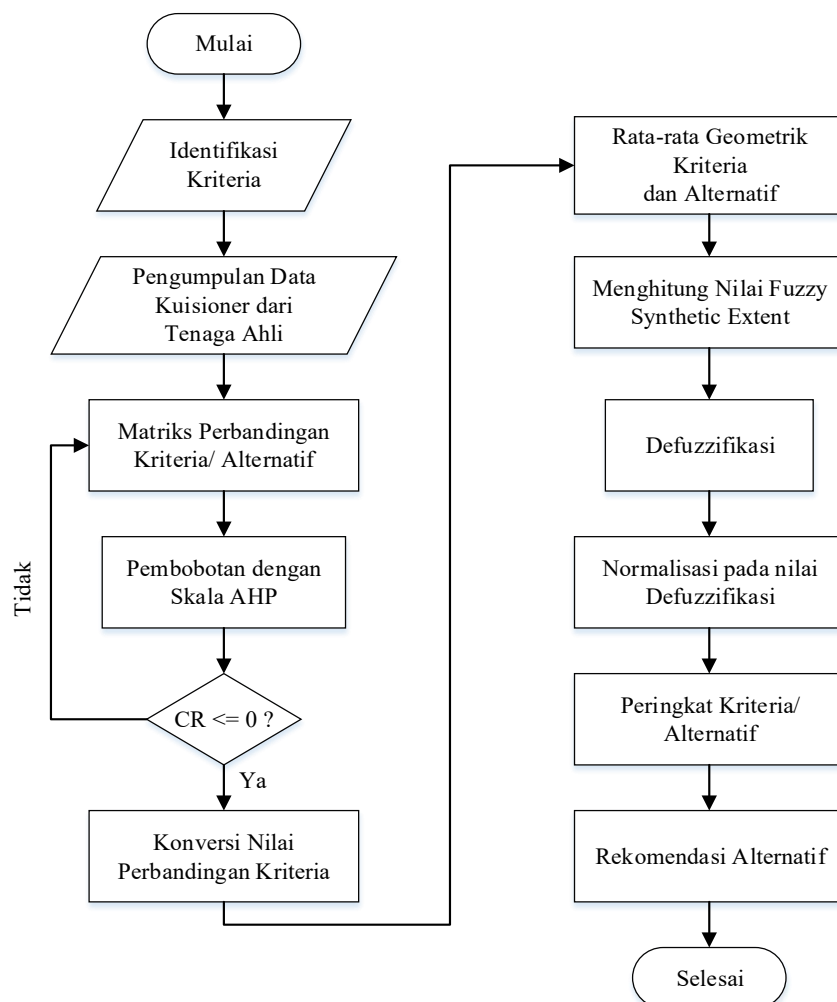
Penentuan Prioritas Pembangkit

1. Bobot yang telah didapatkan pada tahap AHP, diubah ke dalam skala triangular fuzzy number (TFN). Setiap data matriks perbandingan AHP pada penilaian kriteria dan penilaian alternatif dari setiap responden diubah ke dalam skala matriks perbandingan triangular fuzzy number (TFN).

2. Melakukan rata-rata geometrik (Geometric Mean atau GMM) pada data matriks perbandingan TFN dari beberapa responden.
3. Menghitung nilai fuzzy synthetic extent terhadap matriks perbandingan TFN yang telah dirata-ratakan secara geometrik.
4. Defuzzifikasi.
5. Normalisasi nilai defuzzifikasi.
6. Melakukan perankingan kriteria dan setiap alternatif.
7. Melakukan perankingan terhadap alternatif berdasarkan nilai bobot setiap kriteria dan setiap alternatif berdasarkan setiap kriteria.
8. Memberikan rekomendasi alternatif terbaik.

Diagram Alir Metode Penelitian

Gambar 3.1 memperlihatkan diagram alir yang dilakukan pada penelitian ini, dimulai dari identifikasi permasalahan, kebutuhan tenaga listrik di masing-masing desa sampai dengan penetapan alternatif terbaik sumber energi listrik untuk kebutuhan masing-masing desa.



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

[Pemilihan Kriteria untuk Seleksi Sumber Energi Listrik Pembangkit di Perdesaan *Off-Grid* Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai

Pengisian kuesioner dilakukan mengikuti metodologi yang dijelaskan pada Bab 3.1 didapatkan hasil pengisian kuesioner serta rekapitulasi hasil pengisian dan diskusi yang ditunjukkan pada Lampiran B. Kesimpulan hasil seleksi kriteria utama dan subkriteria adalah didapatkan 5 kriteria utama dan 17 subkriteria yang akan digunakan dalam penelitian ini dengan rincian pada Tabel 4.1.

Tabel 3 Kriteria dan Subkriteria untuk Seleksi Sumber Energi Listrik di Perdesaan *Off-Grid* Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai

No.	Kriteria	Keterangan
1	Ekonomi (E)	Aspek finansial utama yang menjadi pertimbangan dalam penerapan pembangkit energi terbarukan pada Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah.
2	Teknis (T)	Aspek teknologi dan operasional yang menjadi pertimbangan keberhasilan implementasi pembangkit energi terbarukan pada Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah.
3	Sosial (S)	Aspek yang memengaruhi bagaimana pembangkit energi terbarukan diterima dan diintegrasikan ke dalam kehidupan sosial dan ekonomi masyarakat pada Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah.
4	Lingkungan (L)	Aspek yang terkait dengan dampak ekologis serta isu lingkungan yang memengaruhi penerimaan dan penerapan pembangkit energi terbarukan pada pada Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah.
5	Politik (P)	Aspek kebijakan, regulasi, dan dukungan pemerintah yang mempengaruhi penerapan pembangkit energi terbarukan pada pada Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah.
No.	Subkriteria	Keterangan
1	Biaya Investasi (E1)	Pengeluaran modal awal yang mencakup perencanaan, pengadaan, konstruksi, instalasi, dan pengujian sistem pembangkit energi terbarukan hingga siap dioperasikan.
2	Biaya <i>Operations & Maintenance</i>	Pengeluaran finansial yang diperlukan untuk menjalankan, menjaga, dan memperbaiki sistem atau fasilitas energi terbarukan setelah sistem tersebut dipasang.
3	<i>Payback Periods</i> (E3)	Waktu yang dibutuhkan agar penghematan energi atau pendapatan yang dihasilkan dari sistem energi terbarukan sama dengan total biaya yang dikeluarkan untuk pembelian, instalasi, dan pengoperasian sistem tersebut.
4	LCOE (E4)	Biaya rata-rata per kWh listrik yang dihasilkan selama seluruh umur operasi suatu pembangkit.
5	<i>Capacity Factor</i> (T1)	Rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh pembangkit listrik selama periode waktu tertentu dengan energi listrik maksimum yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik tersebut pada kapasitas nominalnya (jika beroperasi penuh sepanjang waktu).
6	Efisiensi Sistem (T2)	Tingkat kemampuan keseluruhan sistem pembangkit dalam mengubah energi alam yang tersedia menjadi energi listrik yang benar-benar dapat

		dimanfaatkan oleh beban, setelah memperhitungkan seluruh rugi-rugi pada setiap komponen sistem.
7	<i>Technical Maturity</i> (T3)	Sejauh mana teknologi tersebut telah dikembangkan, diuji, dan terbukti berfungsi secara andal dan konsisten dalam berbagai kondisi operasional untuk jangka waktu yang lama dan apakah tersedia infrastruktur pendukung, rantai pasokan suku cadang, serta tenaga kerja (keahlian teknis) yang memadai untuk instalasi, operasi, dan pemeliharaan teknologi tersebut.
8	<i>Deployment Time</i> (T4)	Periode waktu yang dibutuhkan untuk merencanakan, membangun, menginstal, dan mengaktifkan suatu fasilitas atau proyek energi terbarukan hingga siap beroperasi secara penuh dan menghasilkan listrik.
9	<i>Availability Factor</i> (T5)	Kemampuan sumber energi terbarukan untuk menyediakan listrik secara konsisten dan tanpa gangguan.
10	<i>Social Benefits</i> (S1)	Dampak positif yang dirasakan oleh masyarakat secara luas, bukan hanya dari segi finansial, misalnya peningkatan kualitas hidup, memperkuat keamanan energi desa, terciptanya lapangan pekerjaan.
11	Dampak terhadap kesehatan (S2)	Dampak positif terhadap kesehatan manusia datang dari kemampuannya untuk mengurangi emisi karbon dan polusi udara yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Namun risiko dari material yang digunakan, misalnya pemanfaatan kadmium dan merkuri selama pembuatan sel surya atau isu spesifik lokasi harus dipertimbangkan. Paparan terhadap material beracun ini selama proses manufaktur atau pembuangan limbah (jika tidak dikelola dengan benar) dapat menjadi isu kesehatan yang relevan.
12	<i>Job Creation</i> (S3)	Munculnya pekerjaan baru akibat pembangunan pembangkit listrik energi terbarukan yang berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi dan kemajuan sosial.
13	Penerimaan Masyarakat (S4)	Tingkat persetujuan, dukungan, atau kesediaan masyarakat untuk menerima dan mengadopsi teknologi atau proyek energi terbarukan di sekitar mereka.
14	Kebutuhan Lahan (L1)	Ketersediaan dan penggunaan lahan yang efisien sangat penting untuk memastikan bahwa pembangunan sumber energi ini tidak mengganggu penggunaan lahan lainnya, seperti pertanian, kawasan konservasi, atau pemukiman.
15	Dampak Lingkungan (L2)	Pengaruh yang ditimbulkan oleh pengembangan dan operasional sumber energi terbarukan terhadap lingkungan sekitar. Dampak ini dapat berupa perubahan pada ekosistem, gangguan habitat alami, kualitas air dan udara, deforestasi, serta keanekaragaman hayati akibat pembangunan proyek energi seperti pembangkit listrik tenaga surya, angin, ataupun mikrohidro.
16	Kebijakan Nasional (P1)	Rangkaian aturan, strategi, dan arahan yang ditetapkan oleh pemerintah suatu negara untuk mengatur dan mengarahkan pengembangan serta penerapan sumber daya dan teknologi tertentu, termasuk di bidang energi terbarukan. Kebijakan ini bertujuan untuk mencapai target tertentu, seperti meningkatkan proporsi energi terbarukan dalam bauran energi nasional, mengurangi emisi karbon, dan memperkuat keamanan energi secara keseluruhan.
17	Koordinasi dengan PEMDA setempat (P2)	Efektivitas komunikasi, sinkronisasi kebijakan, dukungan administratif, serta kolaborasi antara PLN dan pemerintah daerah dalam memastikan

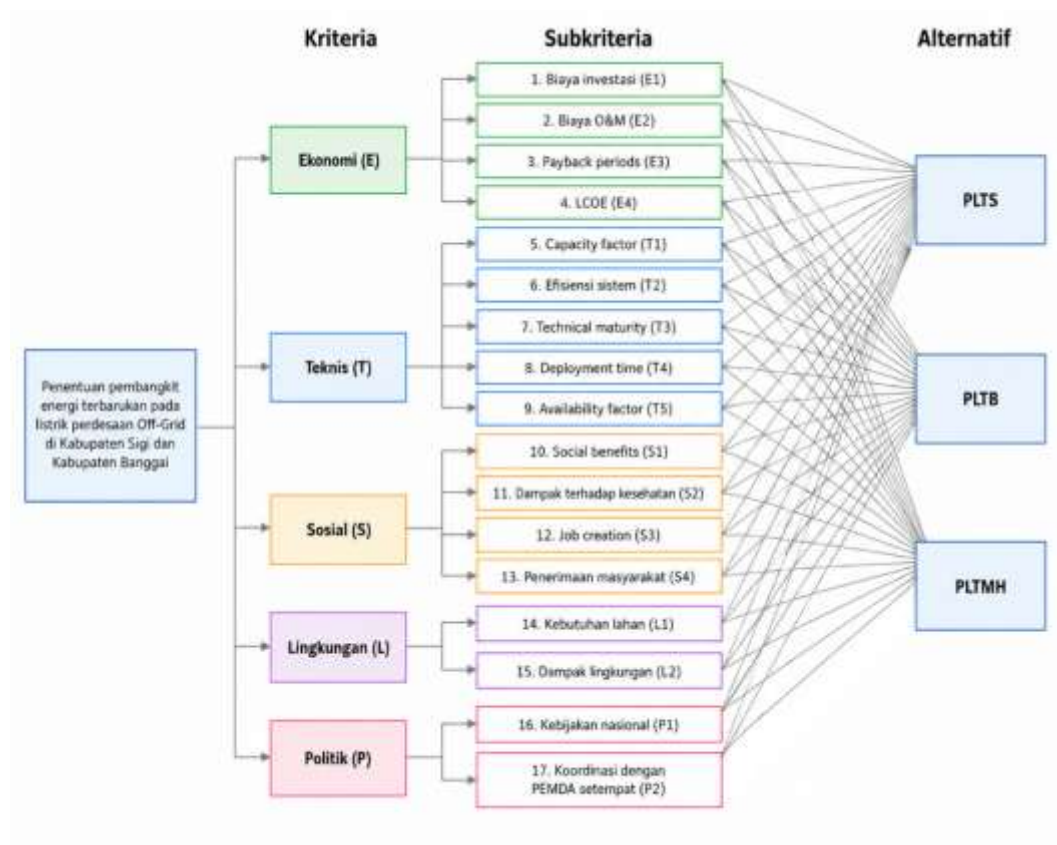
kelancaran perizinan, kesesuaian tata ruang, penerimaan sosial, dan keberlanjutan operasional proyek.

Pemilihan Alternatif untuk Seleksi Sumber Energi Listrik Pembangkit di Perdesaan *Off-Grid* Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai

Berdasarkan penjelasan pada Sub bab 1.1 bahwa berdasarkan survey awal terdapat 22 desa di Sulawesi Tengah, yaitu 21 desa di Kabupaen Sigi dan 1 desa di Kabupaten Banggai yang memiliki potensi energi surya (PLTS), energi bayu (PLTB), dan potensi energi mikro hidro (PLTMH) sehingga selanjutnya akan digunakan ketiga alternatif tersebut.

Hirarki

Berdasarkan kriteria, sub kriteria dan alternatif yang sudah didapatkan untuk menentukan pembangkit energi terbarukan yang terbaik pada Listrik perdesaan di Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai, maka dibuatkan hirarki sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4 Hirarki Penentuan Pembangkit Listrik *Off-Grid* di Perdesaan Kabupaten Sigi dan Banggai

Perbandingan Tingkat Kepentingan Kriteria dan Subkriteria

Setelah 5 kriteria utama dan 17 subkriteria ditetapkan, selanjutnya adalah melakukan perbandingan tingkat kepentingan antar kriteria dan antar subkriteria. Proses ini bertujuan untuk menentukan tingkat prioritas atau bobot dari kriteria utama dan subkriteria, selanjutnya bobot tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kriteria mana yang paling berpengaruh terhadap alternatif. Sebanyak 10 tenaga ahli di bidang Listrik Perdesaan akan

melakukan pengisian kuesioner perbandingan berpasangan antar 5 kriteria utama yang mengacu pada Tabel 4.1. Skala perbandingan berpasangan yang digunakan dalam penilaian kriteria utama menggunakan skala perbandingan Saaty seperti pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Skala Perbandingan Berpasangan

Intensitas Kepentingan	Definisi	Keterangan
1	Sama penting	Kedua elemen sama penting (equal importance)
3	Sedikit lebih penting	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada elemen lainnya
5	Lebih penting	Elemen yang satu lebih penting daripada elemen lainnya
7	Sangat lebih penting	Satu elemen lebih mutlak penting daripada elemen lainnya
9	Mutlak lebih penting	Satu elemen mutlak lebih penting daripada elemen lainnya
2,4,6,8	Nilai-nilai antara dua pertimbangan yang berdekatan	Nilai-nilai ini diperlukan satu kompromi (compromise value)

Petunjuk pengisian diberikan untuk menyamakan pemahaman dan prosedur penilaian sebagai berikut:

1. Responden diminta untuk memberikan penilaian atas Tingkat kepentingan antar dua kriteria utama/ subkriteria dalam menentukan alternatif pembangkit Listrik energi terbarukan di Listrik Perdesaan Sulawesi Tengah. Penilaian menggunakan skala 1 sampai 9 yang mewakili persepsi dan penilaian atas perbandingan antar kriteria seperti pada Tabel 4.2.
2. Pada survey ini dilakukan perbandingan berpasangan antar Kriteria Utama seperti pada Tabel 4.3, perbandingan berpasangan antar subkriteria Ekonomi pada Tabel 4.4, perbandingan berpasangan antar subkriteria Teknis pada Tabel 4.5, perbandingan berpasangan antar subkriteria Sosial Tabel 4.6, perbandingan berpasangan antar subkriteria Lingkungan pada Tabel 4.7 dan perbandingan berpasangan antar subkriteria Politik pada Tabel 4.8.
3. Pengisian dilakukan dengan memberikan penilaian tingkat kepentingan antar 2 kriteria, yaitu kriteria pada kolom kiri dan kolom kanan. Jika kriteria pada kolom sebelah kiri dianggap lebih penting daripada kriteria pada kolom sebelah kanan maka pengisian dilakukan pada kolom kiri saja dan tidak perlu mengisi nilai pada kolom kanan. Begitu juga sebaliknya.

Adapun format lengkap kuesioner perbandingan Tingkat kepentingan kriteria dan subkriteria dapat dilihat pada Lampiran C.

Tabel 5 Perbandingan Berpasangan antar Kriteria Utama

Tabel 1. Perbandingan Berpasangan antar Kriteria Utama																		
Kriteria	Skala Penilaian																Kriteria	
Ekonomi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknis

Ekonomi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sosial
Ekonomi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Lingkungan
Ekonomi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Politik
Teknis	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sosial
Teknis	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Lingkungan
Teknis	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Politik
Sosial	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Lingkungan
Sosial	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Politik
Lingkungan	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Politik

Tabel 6 Perbandingan Berpasangan antar Subkriteria pada Kriteria Ekonomi

Sub-Kriteria	Skala Penilaian																	Sub-Kriteria
Biaya Investasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Biaya Operati on & Mainten ance
Biaya Investasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Payback Periods
Biaya Investasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	LCOE
Biaya Oper ation & Mai ntenance	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Payback Periods
Biaya Oper ation & Mai ntenance	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	LCOE
Payback Periods	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	LCOE

Tabel 7 Perbandingan Berpasangan antar Subkriteria pada Kriteria Teknis

Sub-Kriteria	Skala Penilaian																	Sub-Kriteria
Capacity Factor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Efisiensi Sistem
Capacity Factor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Technical Maturity
Capacity Factor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Deployment Time
Capacity Factor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Availability Factor

Efisiensi Sistem	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Technical Maturity
Efisiensi Sistem	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Deployment Time
Efisiensi Sistem	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Availability Factor
Technical Maturity	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Deployment Time
Technical Maturity	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Availability Factor
Deployment Time	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Availability Factor

Tabel 8 Perbandingan Berpasangan antar Subkriteria pada Kriteria Sosial

Sub-Kriteria	Skala Penilaian																	Sub-Kriteria
<i>Social Benefits</i>	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak terhadap kesehatan
<i>Social Benefits</i>	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Job Creation
<i>Social Benefits</i>	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penerimaan masyarakat
Dampak terhadap kesehatan	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Job Creation
Dampak terhadap kesehatan	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penerimaan masyarakat
Job Creation	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penerimaan masyarakat

Tabel 9 Perbandingan Berpasangan antar Subkriteria pada Kriteria Lingkungan

Kriteria	Skala Penilaian																	Kriteria
Kebutuhan Lahan	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan

Tabel 10 Perbandingan Berpasangan antar Subkriteria pada Kriteria Politik

Kriteria	Skala Penilaian																	Kriteria
Kebijakan Nasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Koordinasi dengan PEMDA setempat

Berdasarkan data kuesioner tersebut nantinya akan diseleksi terlebih dahulu menggunakan metode AHP untuk mendapatkan nilai CR. Penilaian responden baik pada perbandingan Tingkat kepentingan kriteria/ subkriteria maupun Tingkat kepentingan alternatif berdasarkan kriteria harus memenuhi syarat uji konsistensi $\leq 10\%$ pada seluruh responden jika ingin melanjutkan dengan perhitungan *Fuzzy* AHP. Perhitungan *Fuzzy* AHP nantinya akan menghasilkan perankingan pada perbandingan kriteria dan perbandingan alternatif sehingga akan diketahui kriteria terbaik dan alternatif terbaik berdasarkan 17 subkriteria.

Perbandingan Tingkat Kepentingan Alternatif

Langkah yang sama pada perbandingan Tingkat kepentingan Kriteria/ Subkriteria akan dilakukan juga pada tahap ini. Berdasarkan penentuan alternatif seperti dijelaskan pada sub bab 4.2 terdapat 3 potensi energi terbarukan yang ada di Perdesaan Off-Grid Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai, yaitu potensi energi surya (PLTS), energi bayu (PLTB), dan potensi energi mikro hidro (PLTMH). Ketiga alternatif tersebut saling dibandingkan seperti pada Tabel 11.

Tabel 11 Perbandingan Berpasangan antar Alternatif berdasarkan Subkriteria

Alternatif	Skala Penilaian																Alternatif	
PLTS	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	PLTB
PLTS	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	PLTMH
PLTB	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	PLTMH

Tabel 11 tersebut digunakan untuk membandingkan antar alternatif berdasarkan 17 subkriteria yang sudah dijelaskan pada Tabel 4.1. Adapun format lengkap kuesioner perbandingan tingkat kepentingan alternatif berdasarkan 17 subkriteria dapat dilihat pada Lampiran C.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi mengenai pemilihan tiga alternatif pembangkit energi terbarukan di Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai menggunakan lima kriteria utama dan tujuh belas subkriteria, dapat disimpulkan bahwa urutan prioritas subkriteria dari tingkat kepentingan tertinggi hingga terendah adalah Availability Factor, Technical Maturity, Kebijakan Nasional, Levelized Cost of Energy (LCOE), Biaya Investasi, Koordinasi dengan Pemerintah Daerah (PEMDA), Capacity Factor, Kebutuhan Lahan, Biaya Operation and Maintenance, Efisiensi Sistem, Social Benefits, Dampak Lingkungan, Penerimaan Masyarakat, Payback Period, Deployment Time, Dampak terhadap Kesehatan, dan Job Creation. Hasil pembobotan menunjukkan bahwa aspek keandalan pasokan listrik, kematangan teknologi, dan dukungan kebijakan menjadi faktor yang paling menentukan dalam proses pengambilan keputusan pemilihan pembangkit listrik energi terbarukan untuk wilayah perdesaan.

Berdasarkan hasil penggabungan bobot kriteria dan penilaian alternatif menggunakan metode Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) memperoleh peringkat tertinggi sebagai alternatif terbaik, diikuti oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sedangkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menempati peringkat terakhir. Hasil analisis sensitivitas juga menunjukkan bahwa PLTMH secara

konsisten mempertahankan posisi sebagai alternatif dengan prioritas tertinggi pada berbagai skenario pengujian, sehingga meningkatkan tingkat kepercayaan terhadap rekomendasi yang dihasilkan. Keunggulan PLTMH terutama dipengaruhi oleh nilai yang tinggi pada subkriteria Availability Factor, yang menunjukkan kemampuan pembangkit ini dalam menyediakan pasokan listrik secara berkelanjutan. Kondisi debit air di wilayah perdesaan Kabupaten Sigi dan Kabupaten Banggai yang relatif stabil memungkinkan PLTMH beroperasi secara kontinu sepanjang hari, sehingga memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan PLTS dan PLTB yang bersifat intermittent karena bergantung pada intensitas penyinaran matahari dan kecepatan angin. Oleh karena itu, PLTMH direkomendasikan sebagai alternatif pembangkit listrik energi terbarukan yang paling sesuai untuk mendukung pengembangan program listrik perdesaan di kedua wilayah tersebut.

REFERENSI

- Alizadeh, R., Soltanisehat, L., Lund, P. D., & Zamanisabzi, H. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. *Energy Policy*, 137, 111174.
- Brodny, Jaroslaw., Tutak, Magdalena. (2023). Assessing the energy security of European Union countries from two perspectives – A new integrated approach based on MCDM methods. 347 (2023) 121443/ Elsevier.
- Buyukozkan, et al. (2024). Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey. 158 (2024) 111465/ Elsevier.
- Das, S. (2023). Multi criteria decision making for the most suitable combination of energy resources for a decentralized hybrid energy solution with green hydrogen as the storage option. 0196-8904/© 2023 Elsevier.
- Das, S., De, S. (2022). MCDM for simultaneous optimum economy, investment risk and environmental impact for distributed renewable power: Demonstration with an Indian village data. 0196-8904/© 2022 Elsevier Ltd.
- Dewan Energi Nasional. 2023. Outlook Energi Indonesia 2023.
- Dwivedi, Ankur, et al. (2023). Prioritization of potential barriers to the implementation of solar drying techniques using MCDM tools: A case study and mapping in INDIA . 253 (2023) 199–218/ Elsevier.
- Giri, et.al. (2024). A fuzzy Graph Theory and Matrix Approach (fuzzy GTMA) to select the best renewable energy alternative in India. 0306-2619/ © 2024 Elsevier.
- <https://environment-indonesia.com/dampak-lingkungan-pembangkit-listrik-tenaga-angin/>
- Li, et. al. (2022). A decision-making and planning optimization framework for multi-regional rural hybrid renewable energy system. 0196-8904/© 2022 Elsevier.
- Ozturk, et al. (2024). Ranking renewable energy alternatives for Chicago by integrated analytic hierarchy process and VIKOR. Springer.
- Pathak, Sudhir, et al. (2021). Prioritization of barriers to the development of renewable energy technologies in India using integrated Modified Delphi and AHP method. 50 (2022) 101818/ Elsevier.
- Rencana Umum penyediaan tenaga listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2020 - 2030
- Roadmap Program Listrik Desa Tahun 2022-2024 PT PLN (Persero)

- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytical hierarchy process. *International Journal Services Sciences*, vol. 1, no. 1, hal. 83 – 98.
- Saaty, T.L. (1990). *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process- Planning Priority Setting*. New York: McGraww-Hill.
- Saraswat, S.K., Digalwar, Abhijeet. (2020). Evaluation of energy sources based on sustainability factors using integrated fuzzy MCDM approach. *Emerald Insight*.
- Saraswat, S.K., Digalwar, Abhijeet. (2021). Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach. 171 (2021) 58e74/ Elsevier.
- Seddiki, et. al. (2019). Multi-criteria evaluation of renewable energy alternatives for electricity generation in a residential building. 1364-0321/ © 2019 Elsevier.
- Solangi, et al. (2021). Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. 173 (2021) 209e222/ Elsevier.
- Subhan Nafis, Mohamad Aman, Adjar Hadiyono. (2015). Analisis keekonomian penerapan pembangkit listrik tenaga surya pada sistem ketenagalistrikan nias. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan* Vol. 14 No. 2 Desember 2015: 83 – 94. SSN 1978-2365.
- Thanh, Nguyen. (2022). Sustainable Energy Source Selection for Industrial Complex in Vietnam: A Fuzzy MCDM Approach. *IEEE Access*.