

## PEMILIHAN ENERGI BARU TERBARUKAN SEBAGAI SUBSTITUSI BAHAN BAKU PLTU BATUBARA DI PROVINSI SUMATERA UTARA MENGGUNAKAN METODE FUZZY ANALITYCAL HIERARCHY PROCESS (F-AHP)

Wan Habibi Rahman Barus<sup>1)</sup>, Iphov Kumala Sriwana<sup>2)</sup>

Program Studi Magister Teknik Industri Telkom University

e-mail: <sup>1)</sup>wanhabibirahmanbarus@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2)</sup>iphovkumala@telkomuniversity.ac.id

### ABSTRAK

Pembangkit listrik di provinsi Sumatera Utara masih di dominiasi oleh PLTU, yang dimana sumber energy listriknya berasal dari sumber energy tak terbarukan yaitu dari Batubara. Daya terpasang pada PLTU di provinsi Sumatera Utara sekitar 1.828 MW ini memiliki kontribusi yang sangat besar bagi ketersediaan listrik di provinsi Sumatera Utara. PLTU Batubara memebrikan pengaruh yang sangat besar dari aspek lingkungan, aspek ekonomi dan aspek sosial. Dari segi dampak lingkungan dapat menimbulkan efek berupa emisi pencemar. Emisi-emisi yang dihasilkan berupa SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, VHC (Volatine Hydrocarbon) dan SPM (Suspended Particulate Matter). Efek lain juga yaitu partikel debu yang mengandung unsur radioaktif berbahaya jika terhisap masuk ke paru-paru. Terdapat pula logam berat seperti Pb, Hg, Ar, Ni, Se yang kadarnya jauh dari ambang batas khususnya yang berada disekitar pembangkit listrik tenaga uap. Tujuan dari penelitian adalah melakukan pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara dengan mempertimbangkan berbagai aspek dan kriteria. Metode yang digunakan adalah fuzzy AHP. Perhitungan dengan metode fuzzy AHP untuk mendapatkan bahan baku yang menjadi prioritas dengan melakukan perhitungan nilai dari setiap bobot alternative yang digunakan. Alternatif yang dijadikan pertimbangan substitusi PLTU Batubara yaitu limbah padat kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket. Didapatkan hasil dengan menggunakan metode fuzzy AHP bahan baku yang menjadi prioritas yaitu pelet kayu dengan bobot 0,3914 diikuti oleh limbah pada kelapa sawit 0,3564 dan arang briket dengan bobot 0,2522. Hasil analisi menunjukkan bahwa pemerintah dalam hal ini PLN, Dinas ESDM dan lembaga terkait lainnya perlu mengambil sikap dengan melakukan prioritas terhadap pengembangan dan pemanfaatan pelet kayu sebagai bahan baku substitusi PLTU Batubara di provinsi Sumatera Utara.

**Kata kunci:** Batubara, Energi Baru Terbarukan, Fuzzy AHP, Pengambilan Keputusan, PLTU

### ABSTRACT

Power plants in the province of North Sumatra are still dominated by PLTU, where the source of electrical energy comes from non-renewable energy sources, namely coal. The installed power at the PLTU in North Sumatra province is around 1,828 MW. This has a very large contribution to the availability of electricity in the province of North Sumatra. Coal PLTU has a very big influence from environmental, economic and social aspects. In terms of environmental impacts, it can cause effects in the form of pollutant emissions. The resulting emissions are SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, VHC (Volatine Hydrocarbon) and SPM (Suspended Particulate Matter). Another effect is dust particles containing radioactive elements that are dangerous if inhaled into the lungs. There are also heavy metals such as Pb, Hg, Ar, Ni, Se whose levels are far from the threshold, especially those around steam power plants. The purpose of this research is to select raw materials for coal-fired power plant substitution by considering various aspects and criteria. The method used is fuzzy AHP. Calculations with the fuzzy AHP method to get the raw materials that become a priority by calculating the value of each alternative weight used. Alternatives that are considered as substitution of coal power plant are palm oil solid waste, wood pellets and charcoal briquettes. The results obtained using the fuzzy AHP method, the priority raw materials are wood pellets with a weight of 0.3914 followed by oil palm waste of 0.3564 and charcoal briquettes with a weight of 0.2522. The results of the analysis show that the government in this case PLN, the Department of Energy and Mineral Resources and other related institutions need to take an attitude by prioritizing the development and utilization of wood pellets as raw material for coal-fired power plant substitution in the province of North Sumatra.

**Keywords:** Coal, New Renewable Energy, Fuzzy AHP, Decision Making, PLTU

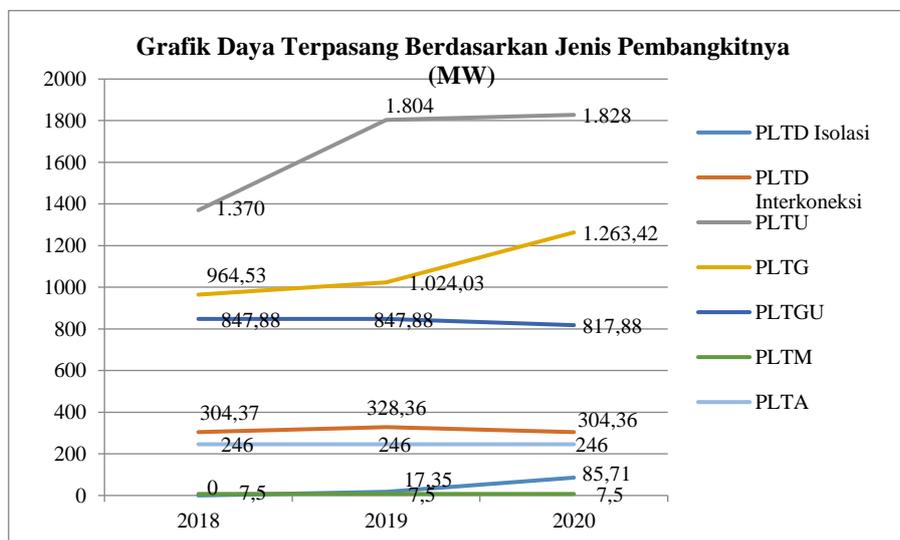
## PENDAHULUAN

Sumber energi baru dan terbarukan merupakan sumber energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global, karena energi yang diperoleh berasal dari proses alam yang berkelanjutan seperti sinar matahari, angin, air, biomassa, *biofuel* dan panas bumi, hal ini menunjukkan bahwa sumber energi itu ada dan tidak menimbulkan kerugian [1].

Salah satu kebutuhan dalam kegiatan sehari-hari adalah energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik. Selain menghasilkan energi listrik sebagai fungsi utamanya, pembangkit listrik juga menghasilkan limbah, seperti emisi CO<sub>2</sub>. Emisi CO<sub>2</sub> merupakan hasil dari proses pembakaran dan juga hasil penguapan. Salah satu proses pengeluaran emisi CO<sub>2</sub> adalah pembakaran batubara pada PLTU. Emisi CO<sub>2</sub> tersebut dapat memberikan efek pemanasan global dan efek gas rumah kaca (GRK), yang dapat menyebabkan perubahan iklim yang ekstrim. PLTU Batubara juga menghasilkan kontaminan radioaktif yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia [2].

Untuk emisi CO<sub>2</sub> pada PLTU Batubara menghasilkan sekitar 1,14 kg/kWh. Jumlah energi listrik yang dihasilkan PLTU Batubara pada Tahun 2020 sebesar 1.828 MW dan menghasilkan sekitar 2,08 juta Emisi CO<sub>2</sub> ke udara bebas. Jika hal ini terus dilakukan maka akan memberikan dampak yang sangat besar dalam pemanasan global, sehingga perlu ada penggantian bahan baku dari pembangkit listrik tersebut ke sumber energi baru terbarukan [3].

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai yang memiliki wewenang dalam melakukan penyediaan energi memiliki beberapa pembangkit listrik berdasarkan jenis sumber tenaga pembangkitnya. Berikut dapat dilihat perkembangan daya terpasang pembangkit tenaga listrik PLN menurut tenaga pembangkitnya dari Tahun 2018-2020 di provinsi Sumatera Utara dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Daya Terpasang Berdasarkan Jenis Pembangkitnya

Dapat dilihat berdasarkan Gambar 1. pembangkit listrik di provinsi Sumatera Utara masih di dominasi oleh PLTU dan tiap tahun mengalami peningkatan daya terpasang. PLTU ini sendiri beroperasi dengan menggunakan bahan baku yaitu berupa batubara. Batubara merupakan sumber energi yang tak dapat diperbaharui [4]. Jumlah sumber batubara akan mengalami penurunan bahkan hingga kepunahan, sehingga harus ada penggantian sumber bahan baku menjadi bahan baku yang dapat diperbaharui atau yang biasa disebut dengan energi baru terbarukan (EBT).

Beberapa hal yang diperhitungkan saat mengganti bahan baku batubara adalah *International Energi Agency* (IEA), yang mengungkapkan bahwa bahan bakar fosil Batubara menyumbang 44% dari total emisi CO<sub>2</sub> global. Pembakaran batu bara merupakan sumber emisi gas rumah kaca terbesar, yang memicu perubahan iklim [5]. Batubara yang dibakar pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) mengeluarkan sejumlah polutan seperti NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub>, penyumbang utama terbentuknya hujan asam dan polusi PM<sub>2.5</sub>. Komunitas ilmiah dan medis telah memaparkan bahaya kesehatan dari partikel halus (PM<sub>2.5</sub>) dari emisi ini ke udara. PLTU batubara juga mengeluarkan bahan kimia berbahaya dan mematikan seperti merkuri dan arsenic [6].

Penggunaan batubara yang masih tinggi dan dampak yang diberikan oleh penggunaan batubara terhadap lingkungan maka pemerintah diharapkan mengambil suatu tindakan dalam melakukan pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara. Dimana potensi EBT dapat dimanfaatkan dalam substitusi PLTU Batubara yaitu berupa pemanfaatan limbah padat kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket.

Penelitian ini menggunakan metode *fuzzy* AHP dalam menyelesaikan permasalahan di atas. Metode *fuzzy* AHP merupakan metode hasil dari perkembangan metode AHP yang juga merupakan hasil integrasi antara AHP dan konsep *fuzzy*. Metode AHP merupakan metode untuk penyelesaian permasalahan dengan kriteria kualitatif dan kuantitatif pada berbagai macam kriteria [7]. Dengan pendekatan konsep *fuzzy* nilai kekaburan atau kesamaan pada nilai AHP dapat dihindari sehingga didapatkan *triangular fuzzy number* (TFN) yang akan meminimalisasi ketidakpastian sehingga diharapkan dengan menggunakan metode *fuzzy* AHP akan mendapatkan hasil yang lebih akurat [8]. Hasil dari menggunakan metode *fuzzy* AHP adalah rangking alterantif yang menjadi prioritas sebagai pemilihan substitusi bahan baku PLTU Batubara.

Pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara dengan mempertimbangkan berbagai aspek dan juga kriteria yaitu aspek teknologi, aspek kualitas sumber energi, aspek teknologi, aspek ekonomi dan aspek social [9]. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pemilihan bahan baku energy baru terbarukan sebagai substitusi bahan baku PLTU Batubara dan menentukan kriteria, subkriteria dalam melakukan pemilihan substitusi bahan baku PLTU Batubara berdasarkan konsensus para pakar ahli dan menentukan urutan yang menjadi prioritas untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pengganti batubara.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini digolongkan sebagai penelitian deskriptif. Penelitian deskriptif adalah penelitian yang berusaha untuk memaparkan pemecahan masalah terhadap suatu masalah yang ada sekarang secara sistematis dan faktual berdasarkan data-data atau memberikan gambaran yang lebih detail mengenai gejala atau fenomena. Penelitian ini dimulai dari proses pengumpulan data, penyajian data, dan pengolahan data, serta analisis dan interpretasi hasil pengolahan data.

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *Fuzzy* AHP. Langkah-langkah pengolahan data menggunakan metode *Fuzzy* AHP untuk mengetahui nilai bobot dari setiap kriteria, sub kriteria dan alternative yang menjadi prioritas adalah sebagai berikut:

- a. Membuat sebuah struktur hierarki (*Decomposition*).
- b. Membentuk matriks perbandingan berpasangan (*Comparative Judgement*).
- c. Mengubah nilai variabel linguistic/AHP menjadi bilangan *fuzzy*.
- d. Menghitung bobot prioritas dari setiap kriteria, subkriteria dan alternative (*Syntesis of Priority*).
- e. Melakukan pengujian konsistensi (*Logical Consistency*).

- f. Menghitung rata-rata geometris *Fuzzy AHP*
- g. Perhitungan *fuzzy syntethic extent value /Defuzzifikasi*.
- h. Menghitung bobot prioritas.
- i. Menghitung *super matrix* dan bobot masing-masing kriteria, sukriteria dan altenatif.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini membahas mengenai pemanfaatan sumber energi baru terbarukan yang nantinya sumber energi tersebut akan menjadi substitusi bahan baku PLTU Batubara. Pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara dilakukan dengan membandingkan tiga EBT yaitu limbah pada kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket. Ketiga bahan baku tersebut dibandingkan dengan berbagai macam kriteria dalam pengambilan keputusan dengan menggunakan metode *Fuzzy AHP*.

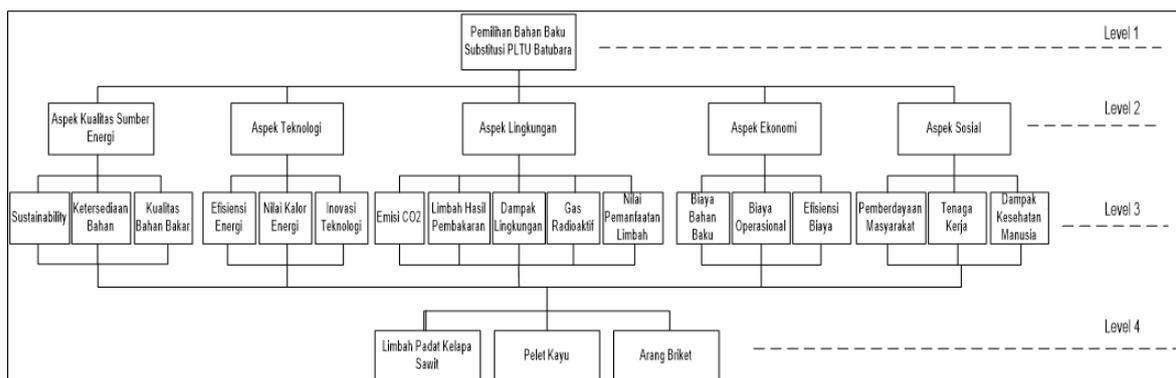
Hasil dengan menggunakan metode *Fuzzy AHP* nantinya akan didapatkan alternative yang menjadi prioritas bahan baku yang akan digunakan sebagai bahan baku substitusi PLTU Batubara. Data yang dilakukan pengolahan berdasarkan hasil kuesioner dari ketiga pakar ahli dalam bidang energi baru terbarukan dan pembangkit listrik. Terkait biodata ketiga pakar ahli tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Biodata Responden Para Pakar

No.	Nama	Umur	Pekerjaan	Pengalaman
1	Hifdzul Fikri	27 Tahun	Praktisi Bidang Energi	5 Tahun
2	Zubaidi	50 Tahun	Kepala Bagian Dinas ESDM	15 Tahun
3	Edi Warman	54 Tahun	Dosen Mata Kuliah EBT	17 Tahun

- a. Membuat Struktur Hierarki

Langkah awal dalam metode *Analytical Hierarchy Process (AHP)* adalah dengan membuat sebuah struktur hierarki pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara. Gambar struktur hierarki pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Hierarki Pemilihan Bahan Baku Substitusi PLTU Batubara

- b. Membentuk Matriks Perbandingan Berpasangan (*Comparative Judgement*).

Matriks perbandingan berpasangan adalah matriks yang menggambarkan kontribusi atau dampak setiap faktor pada setiap tujuan atau kriteria tingkat yang lebih tinggi [10]. Tabel matriks perbandingan berpasangan berdasarkan penilaian ketiga pakar dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Perbandingan Berpasangan pada Level 2

Elemen	Responden 1				
	A. Kualitas S.E.	A. Teknologi	A. Lingkungan	A. Ekonomi	A. Sosial
A. Kualitas Sumber Energi	1	7	1/7	3	1/3
A. Teknologi	1/7	1	1/7	1/7	1/3
A. Lingkungan	7	7	1	3	3
A. Ekonomi	1/3	7	1/3	1	9
A. Sosial	3	3	1/3	1/9	1

Elemen	Responden 2				
	A. Kualitas S.E.	A. Teknologi	A. Lingkungan	A. Ekonomi	A. Sosial
A. Kualitas Sumber Energi	1	7	1	5	9
A. Teknologi	1/7	1	1/3	9	7
A. Lingkungan	1	3	1	1/5	1/3
A. Ekonomi	1/5	1/9	5	1	1
A. Sosial	1/9	1/7	3	1	1

Elemen	Responden 3				
	A. Kualitas S.E.	A. Teknologi	A. Lingkungan	A. Ekonomi	A. Sosial
A. Kualitas Sumber Energi	1	1	1	1/7	1
A. Teknologi	1	1	1	1/5	1/3
A. Lingkungan	1	1	1	5	1
A. Ekonomi	7	5	1/5	1	5
A. Sosial	1	3	1	1/5	1

c. Mengubah ke dalam Nilai *Fuzzy*

Dilakukan transformasi nilai AHP ke dalam nilai *Fuzzy* pada matriks perbandingan berpasangan. Nilai *fuzzy* pada matriks perbandingan berpasangan dapat dilihat Tabel 3.

Tabel 3. Transformasi Nilai AHP ke dalam Nilai *Fuzzy*

Elemen	Responden 1														
	A. Kualitas Sumber Energi			A. Teknologi			A. Lingkungan			A. Ekonomi			A. Sosial		
A. Kualitas Sumber Energi	1	1	1	5	7	9	1/9	1/7	1/5	1	3	5	1/3	1/3	1
A. Teknologi	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	1/5	1/3	1
A. Lingkungan	5	7	9	5	7	9	1	1	1	1	3	5	1	3	5
A. Ekonomi	1/5	1/3	1	5	7	9	1/5	1/3	1	1	1	1	7	9	9
A. Sosial	1	3	3	1	3	5	1/5	1/3	1	1/9	1/9	1/7	1	1	1

Elemen	Responden 2														
	A. Kualitas Sumber Energi			A. Teknologi			A. Lingkungan			A. Ekonomi			A. Sosial		
A. Kualitas Sumber Energi	1	1	1	5	7	9	1	1	3	3	5	7	7	9	9
A. Teknologi	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1/5	1/3	1	7	9	9	5	7	9
A. Lingkungan	1/3	1	1	1	3	5	1	1	1	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1
A. Ekonomi	1/7	1/5	1/3	1/9	1/9	1/7	3	5	7	1	1	1	1/3	1	1
A. Sosial	1/9	1/9	1/7	1/9	1/7	1/5	1	3	5	1	1	3	1	1	1

Elemen	Responden 3														
	A. Kualitas Sumber Energi			A. Teknologi			A. Lingkungan			A. Ekonomi			A. Sosial		
A. Kualitas Sumber Energi	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1/9	1/7	1/5	1	1	3
A. Teknologi	1/3	1	1	1	1	1	1	1	3	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1
A. Lingkungan	1/3	1	1	1/3	1	1	1	1	1	3	5	7	1	1	3
A. Ekonomi	5	7	9	3	5	7	1/7	1/5	1/3	1	1	1	3	5	7
A. Sosial	1/3	1	1	1	3	5	1/3	1	1	1/7	1/5	1/3	1	1	1

d. Menentukan bobot prioritas prioritas tiap elemen-elemen

Penentuan bobot prioritas setiap elemen diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata setiap baris. Perhitungan berat rata-rata dapat dipertimbangkan dengan rumus berikut [11]:

$$\text{Bobot: } \frac{\text{Jumlah Baris}}{n \text{ kriteria}} \tag{1}$$

Contoh perhitungan rata-rata pembobotan:

$$\text{Bobot Kualitas} = \frac{(0,2424 + 0,4116 + 0,1801 + 0,2648 + 0,2249)}{5} = 0,2647$$

Tabel 4. Perhitungan Rata-Rata Pembobotan Level Antar Kriteria

Elemen	A. Kualitas Sumber Energi	A. Teknologi	A. Lingkungan	A. Ekonomi	A. Sosial	Bobot Parsial
A. Kualitas Sumber Energi	0.2424	0.4116	0.1801	0.2648	0.2249	0.2647
A. Teknologi	0.0597	0.1014	0.1180	0.1409	0.1304	0.1101
A. Lingkungan	0.3598	0.2299	0.2674	0.2991	0.1419	0.2596
A. Ekonomi	0.2027	0.1594	0.1979	0.2214	0.3772	0.2317
A. Sosial	0.1354	0.0977	0.2366	0.0737	0.1256	0.1338
Jumlah	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

e. Uji Konsistensi (*Logical Conclusion*)

Tahap selanjutnya dilakukan perhitungan nilai rasio konsistensi dan konsistensi matriks dengan cara sebagai berikut [11]:

1. Perhitungan Rasio Konsistensi

Rasio konsistensi = (Matriks rata-rata pembobotan) x (Bobot Parsial Tiap Baris) (2)

$$\begin{pmatrix} 1.0000 & 4.0569 & 0.6737 & 1.1958 & 1.7904 \\ 0.2465 & 1.0000 & 0.4413 & 0.6365 & 1.0381 \\ 1.4844 & 2.2660 & 1.0000 & 1.3511 & 1.1298 \\ 0.8363 & 1.5711 & 0.7402 & 1.0000 & 3.0027 \\ 0.5585 & 0.9633 & 0.8851 & 0.3330 & 1.0000 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.2647 \\ 0.1101 \\ 0.2596 \\ 0.2317 \\ 0.1338 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.4030 \\ 0.5763 \\ 1.3664 \\ 1.2201 \\ 0.6947 \end{pmatrix}$$

2. Perhitungan Konsistensi Vektor

Konsistensi vektor = (Rasio Konsistensi/Bobot parsial tiap baris) (3)

$$\text{A. Kualitas} = 1,4030/0,2647 = 5,2994$$

$$\text{A. Teknologi} = 0,5763/0,1101 = 5,2345$$

$$\text{A. Lingkungan} = 1,3664/0,2596 = 5,2696$$

$$\text{A. Ekonomi} = 1,2201/0,2317 = 5,2317$$

$$\text{A. Sosial} = 0,6947/0,1338 = 5,2003$$

3. Rata-rata ( $Z_{maks}$ )

Rumus perhitungan  $Z_{maks}$  adalah sebagai berikut:

$$Z_{maks} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Konsistensi Vektor}}{n} \quad (4)$$

$$Z_{maks} = \frac{5,2994+5,2324+5,2696+5,2655+5,1914}{5} = 5,2507$$

4. *Consistency Index* (CI)

Penilaian CI didasarkan pada penentuan tingkat konsistensi tanggapan responden, dengan rumus sebagai berikut [11]:

$$CI = \frac{Z_{maks} - n}{n-1} \quad (5)$$

$$CI = \frac{5,2507 - 5}{4-1} = 0,0627$$

5. *Consistency Ratio* (CR)

Langkah terakhir dalam pengujian konsistensi dengan perhitungan nilai CR dengan menggunakan rumus sebagai berikut [11]:

$$CR = \frac{CI}{\text{Random Consistency Index}} \quad (6)$$

Nilai random indeks untuk  $n = 5$  adalah 1,12, maka diperoleh nilai *consistency ratio* sebagai berikut:

$$CR = \frac{0,0627}{1,12} = 0,0560$$

Karena  $CR \leq 0,1$  , Maka jawaban responden konsisten.

Dengan menggunakan rumus dan langkah-langkah yang sama maka rekapitulasi perhitungan konsistensi ratio dari struktur hierarki pemilihan substitus bahan baku PLTU Batubara dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Konsistensi Rasio

Unsur	Nilai CR	Makna
Kriteria	0.0560	Konsisten
Aspek Kualitas Sumber Energi	0.0415	Konsisten
Aspek Teknologi	0.0022	Konsisten
Aspek Lingkungan	0.0358	Konsisten
Aspek Ekonomi	0.0143	Konsisten
Aspek Sosial	0.0266	Konsisten
Sustainability	0.0430	Konsisten
Ketersediaan Bahan	0.0508	Konsisten
Kualitas Bahan Bakar	0.0129	Konsisten
Efisiensi Energi	0.0008	Konsisten
Nilai Kalor Energi	0.0081	Konsisten
Inovasi Teknologi	0.0326	Konsisten
Emisi CO2	0.0087	Konsisten
Limbah Hasil Pembakaran	0.0256	Konsisten
Dampak Lingkungan	0.0287	Konsisten
Gas Radioaktif	0.0383	Konsisten
Nilai Pemanfaatan Limbah	0.0014	Konsisten
Biaya Bahan Baku	0.0454	Konsisten
Biaya Operasional	0.0547	Konsisten
Efisiensi Biaya	0.0370	Konsisten
Pemberdayaan Masyarakat	0.0212	Konsisten
Tenaga Kerja	0.0001	Konsisten
Dampak Kesehatan Manusia	0.0163	Konsisten

f. Menghitung Rata-rata Geometrik *Fuzzy* AHP

Perhitungan dengan menggunakan rata-rata geometrik dari penilaian yang diberikan oleh seluruh pakar ahli yakni sebanyak 3 pakar ahli.

Contoh perhitungan nilai rata-rata geometrik:

Pakar Ahli 1: X1

Pakar Ahli 2: X2

.....

Pakar Ahli n: Xn

Maka,rumus rata-rata geometriknya adalah sebagai berikut [11]:

$$\text{Rata-rata geometrik} = \sqrt[n]{X1 \times X2 \times X3 \times \dots \times Xn} \tag{7}$$

Perhitungan rata-rata geometrik untuk elemen level 2 antara A adalah Kualitas Sumber Energi terhadap A. Teknologi adalah sebagai berikut:

Pakar Ahli n: ( 1 ; m ; u )

Pakar Ahli 1: ( 5 ; 7 ; 9 )

Pakar Ahli 2: ( 5 ; 7 ; 9 )

Pakar Ahli 3: ( 1 ; 1 ; 3 )

Maka rata-rata geometriknya adalah

$$l = \sqrt[3]{5 \times 5 \times 1} = 2,9240$$

$$m = \sqrt[3]{7 \times 7 \times 1} = 3,6593$$

$$u = \sqrt[3]{9 \times 9 \times 3} = 6,2403$$

Dilakukan perhitungan pada keseluruhan aspek mulai dari aspek kualitas sumber energy, aspek teknologi, aspek lingkungan, aspek ekonomi dan aspek sosial. Hasil perhitungan rata-rata geometrik untuk aspek kualitas sumber energy dan aspek teknologi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perhitungan Rata-Rata Geometrik Kriteria (pada Level 2)

Elemen	Penjumlahan Matriks Banding Berpasangan Antar Level					
	A. Kualitas Sumber Energi			A. Teknologi		
A. Kualitas Sumber Energi	1.0000	1.0000	1.0000	2.9240	3.6593	6.2403
A. Teknologi	0.1602	0.2733	0.3420	1.0000	1.0000	1.0000
A. Lingkungan	0.8221	1.9129	2.0801	1.1856	2.7589	3.5569
A. Ekonomi	0.5228	0.7757	1.4422	1.1856	1.5726	2.0801
A. Sosial	0.3333	0.6934	0.7539	0.4807	1.0874	1.7100
Jumlah	2.8384	4.6552	5.6183	6.7760	10.0782	14.5872

g. Perhitungan *fuzzy syntethic extent value* /Defuzzifikasi.

Langkah-langkah perhitungan bobot lokal *Fuzzy* dengan menggunakan rumus *Chang's Analysis Extent* adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan nilai  $S_i$  dengan menggunakan rumus sebagai berikut [12]:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^1 \otimes [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1} \quad (8)$$

Pertama-tama dihitung terlebih dahulu

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j] = (2,8384+6,7760+2,6083+3,1794+5,4089; \\ 4,6552+10,0782+3,5786+4,6485+12,5254 \\ ;5,6183+14,5872+6,0962+6,5472+12,5254) \\ = ( 20,8110 ; 30,8793 ; 45,3742 )$$

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1} = (1/45,3742 ; 1/30,8793 ; 1/20,8110) \\ = ( 0,0220 ; 0,0323 ; 0,0480 )$$

Selanjutnya dilakukan penjumlahan nilai *fuzzy* setiap kriteria. Misalnya kriteria A. Kualitas:

$$\text{nilai fuzzy l} = 1 + 2,9240 + 0,4807 + 0,6934 + 1,3264 = 6,4245$$

$$\text{nilai fuzzy m} = 1 + 3.6593+ 0.5228+ 1.2892+ 1.4422 = 7,9135$$

$$\text{nilai fuzzy u} = 1 + 6.2403+ 1.2164+ 1.9129+ 3.0000 = 13,3696$$

dan seterusnya.

Tabel 7. Nilai *Fuzzy* Level 2 Kriteria

	l	m	u
A. Kualitas Sumber Energi	6.4245	7.9135	13.3696
A. Teknologi	2.5069	3.1913	5.1089
A. Lingkungan	4.3465	8.1141	11.3712
A. Ekonomi	5.0622	7.5985	9.8277
A. Sosial	2.4709	4.0619	5.6967

Selanjutnya dihitung nilai  $S_i$  dengan menggunakan rumus  $S_i$ . Misalnya Kriteria Kualitas:

$$\text{Nilai l} = 6,4245 \times 0,0220 = 0,1416$$

$$\text{Nilai m} = 7,9135 \times 0,0323 = 0,2563$$

$$\text{Nilai u} = 13,3696 \times 0,0480 = 0,6424$$

dan seterusnya

Tabel 8. Nilai  $S_i$  Level 2 Kriteria

	<b>l</b>	<b>m</b>	<b>u</b>
A. Kualitas Sumber Energi	0.1416	0.2563	0.6424
A. Teknologi	0.0553	0.1033	0.2455
A. Lingkungan	0.0958	0.2628	0.5464
A. Ekonomi	0.1116	0.2461	0.4722
A. Sosial	0.0545	0.1315	0.2737

2. Perhitungan *degree of possibility* dengan rumus[13]:

$$V(M_2 \geq M_1) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & \text{jika } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{jika } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{untuk kondisi lain} \end{array} \right\} \quad (9)$$

$V(M_2 \geq M_1)$

$V(\text{Kualitas} \geq \text{Kualitas}) = 1$

$V(\text{Kualitas} \geq \text{Teknologi}) = m_2 (0,2563) \geq m_1 (0,1033) = 1$  (Karena  $m_2 \geq m_1$ )

$V(\text{Kualitas} \geq \text{Lingkungan})$

$= m_2 (0,2563) \leq m_1 (0,2628)$  tidak memenuhi syarat pertama

$= l_1 (0,0958) \leq u_2 (0,6424)$  tidak memenuhi syarat kedua

$= \frac{0,0958 - 0,6424}{(0,2563 - 0,6424) - (0,2628 - 0,0958)} = 0,9883$

$V(\text{Kualitas} \geq \text{Ekonomi}) = m_2 (0,2563) \geq m_1 (0,2461) = 1$  (Karena  $m_2 \geq m_1$ )

$V(\text{Kualitas} \geq \text{Sosial}) = m_2 (0,2563) \geq m_1 (0,1315) = 1$  (Karena  $m_2 \geq m_1$ )

dan seterusnya dilakukan perhitungan pada setiap aspek.

Penentuan vektor bobot (V) dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Penentuan Vektor Terbobot (V)

	<b>A. Kualitas</b>	<b>A. Teknologi</b>	<b>A. Lingkungan</b>	<b>A. Ekonomi</b>	<b>A. Sosial</b>
A. Kualitas		0.4046	1.0000	0.9701	0.5144
A. Teknologi	1.0000		1.0000	1.0000	1.0000
A. Lingkungan	0.9883	0.4843		0.9575	0.5755
A. Ekonomi	1.0000	0.4841	1.0000		0.5861
A. Sosial	1.0000	0.8714	1.0000	1.0000	
Minimum	0.9883	0.4046	1.0000	0.9575	0.5144

h. Menghitung bobot prioritas

Perhitungan nilai bobot prioritas *fuzzy* AHP dilakukan dengan menormalisasikan nilai minimum vektor terbobot dari setiap elemen. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

Normalisasi vektor terbobot (W)

W Kualitas = Nilai Minimum Kualitas/Jumlah Nilai Minimum

W Kualitas =  $0.9883 / (0.9883 + 0.4046 + 1,0000 + 0.9575 + 0.5144) = 0,2557$

W Teknologi  $0.4046 / 3.8648 = 0,1047$

W Lingkungan =  $1,0000 / 3.8648 = 0,2587$

W Ekonomi =  $0.9575 / 3.8648 = 0,2478$

W Sosial =  $0.5144 / 3.8648 = 0,1331$

Tabel 10. Normalisasi Vektor Terbobot Level 2 (Kriteria)

<b>Elemen</b>	<b>W (Bobot Nilai)</b>	<b>Peringkat</b>
A. Kualitas Sumber Energi	0.2557	2
A. Teknologi	0.1047	5
A. Lingkungan	0.2587	1
A. Ekonomi	0.2478	3
A. Sosial	0.1331	4

i. Menghitung *super matrix* dan bobot masing-masing kriteria, sukriteria dan alternatif.

Setelah semua nilai bobot untuk setiap level diperoleh maka ditentukan nilai bobot prioritas masing-masing mulai dari level 2 kriteria/aspek yang menjadi prioritas dalam pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara. Level 3 subkriteria yang menjadi prioritas dalam pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara. Serta Level 4 alternatif yang menjadi prioritas dalam pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara.

Hasil perhitungan bobot pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara masing-masing kriteria, sukriteria dan alternatif dapat dilihat pada Tabel 11, Tabel 12 dan Tabel 13.

**Tabel 11. Perhitungan Total Bobot Level 2 Kriteria**

<b>Unsur</b>	<b>Bobot Nilai</b>	<b>Peringkat</b>
Aspek Kualitas Sumber Energi	0.2557	2
Aspek Teknologi	0.1047	5
Aspek Lingkungan	0.2587	1
Aspek Ekonomi	0.2478	3
Aspek Sosial	0.1331	4

**Tabel 12. Perhitungan Total Bobot Level 3 Sub-Kriteria**

<b>Unsur</b>	<b>Bobot Nilai</b>	<b>Peringkat</b>
Sustainability	0.1290	2
Ketersediaan Bahan	0.0638	6
Kualitas Bahan Bakar	0.0629	7
Efisiensi Energi	0.0622	8
Nilai Kalor Energi	0.0298	12
Inovasi Teknologi	0.0127	16
Emisi CO <sub>2</sub>	0.0996	4
Limbah Hasil Pembakaran	0.0287	14
Dampak Lingkungan	0.0844	5
Gas Radioaktif	0.0287	13
Nilai Pemanfaatan Limbah	0.0174	15
Biaya Bahan Baku	0.1389	1
Biaya Operasional	0.0031	17
Efisiensi Biaya	0.1058	3
Pemberdayaan Masyarakat	0.0487	9
Tenaga Kerja	0.0371	11
Dampak Kesehatan Manusia	0.0473	10

**Tabel 13. Perhitungan Total Bobot Level 4 Alternatif**

<b>Alternatif</b>	<b>Bobot Nilai</b>	<b>Peringkat</b>
Limbah Padat Kelapa sawit	0.3564	2
Pelet Kayu	0.3914	1
Arang Briket	0.2522	3

Dapat dilihat berdasarkan Tabel 13. bahwa yang menjadi prioritas dalam pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara adalah yang memiliki bobot nilai paling tinggi yaitu pellet kayu dengan bobot nilai 0,3914, diikuti oleh limbah padat kelapa sawit dengan nilai 0,3564 dan terakhir arang briket dengan bobot nilai 0,2522.

Pelet kayu merupakan bahan baku substitusi PLTU Batubara yang menjadi prioritas dari dua bahan baku lainnya. Pemerintah seperti dinas ESDM, PLN dan lembaga terkait lainnya diharapkan memberikan perhatian terhadap pemanfaatan pelet kayu sebagai bahan baku substitusi PLTU Batubara. Penggunaan batubara sebagai bahan baku energy dapat mengalami pengurangan dan dapat memberikan dampak lingkungan menjadi lebih baik kedepannya.

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pengolahan data adalah sebagai berikut:

1. Kriteria pemilihan bahan baku substitusi PLTU Batubara yang digunakan dalam penelitian terdiri dari 5 kriteria yakni aspek kualitas sumber energi, aspek teknologi, aspek lingkungan, aspek ekonomi, dan aspek sosial yang dikembangkan menjadi 17 subkriteria yaitu Sustainability, Ketersediaan Bahan, Kualitas Bahan Bakar, Efisiensi Energi, Nilai Kalor Energi, Inovasi Teknologi, Emisi CO<sub>2</sub>, Limbah Hasil Pembakaran, Dampak Lingkungan, Gas Radioaktif, Nilai Pemanfaatan Limbah, Biaya Bahan Baku, Biaya Operasional, Efisiensi Biaya, Pemberdayaan Masyarakat, Tenaga Kerja dan Dampak Kesehatan Manusia.
2. Bobot prioritas alternatif bahan baku substitusi PLTU Batubara masing-masing diperoleh limbah padat kelapa sawit (0,3564), pelet kayu (0,3914), dan arang briket (0,2522). berdasarkan bobot prioritas, pelet kayu unggul dibandingkan kedua alternatif lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sutarno, *Sumber Daya Energi*. Yogyakarta : Graha Ilmu. 2012, pp. 50-53.
- [2] Bahagia, dan M. Nizar, “Kajian Produksi CO<sub>2</sub> Pada Pembangkit Listrik dan Kendaraan Bermotor di Kota Banda Aceh,” *Serambi Saintia*, Vol. II, No.2. ISSN: 2337-9952. Okt 2014.
- [3] R. F. S. Budi, Suparman, “Perhitungan Faktor Emisi CO<sub>2</sub> PLTU Batubara dan PLTN”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vol.15 No.1, pp 1-8, Juni 2013.
- [4] Badan Pusat Statistik, “Neraca Energi Indonesia 2016-2020,” 2021, Sumber: <https://www.bps.go.id/publication/2021/12/16/349e26e73429084dc3c0663d/neraca-energi-indonesia-2016-2020.html> [diakses 22 November 2021]
- [5] Greenpeace, “Kita, Batubara dan Polusi Udara,” 2015, Sumber: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-indonesia-stateless/2019/02/605d05ed-605d05ed-kita-batubara-dan-polusi-udara.pdf> [diakses 25 November 2021]
- [6] Putri, Adinda Aisyah, “Perizinan Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Terkait Izin Analisis Mengenai Dampak Lingkungan,” 2019, Sumber: [https://www.researchgate.net/publication/336739053\\_PERIZINAN\\_PROYEK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PLTU TERKAIT IZIN ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN AMDAL](https://www.researchgate.net/publication/336739053_PERIZINAN_PROYEK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PLTU TERKAIT IZIN ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN AMDAL) [diakses 25 November 2021]
- [7] P. F. Ferdinant, A. Bahauddin, F. A. Salma, H. Setiawan, B. Kurniawan, “Usulan pemilihan green supplier dengan metode fuzzy AHP dan fuzzy TOPSIS,” *Journal Industrial Servicess* Vol. 7, No. 1. Pp 113-119, Okt 2021.
- [8] M. H. P. Swari, “Sistem Pendukung Keputusan Penerima Beasiswa Bidikmis dengan Metode AHP dan Fuzzy AHP,” *Seminar Nasional Informatika Bela Negara (SANTIKA)*, Vol. 2, ISSN: 2747-0563, pp 106-111, Nov 2021.
- [9] A. Tasri, A. Susilawati, “Selection Among Renewable Energi Alternatives Based on a Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Indonesia,” 2013, Sumber: [https://www.researchgate.net/publication/261715097\\_Selection\\_among\\_renewable\\_energy\\_alternatives\\_based\\_on\\_a\\_fuzzy\\_analytic\\_hierarchy\\_process\\_in\\_Indonesia](https://www.researchgate.net/publication/261715097_Selection_among_renewable_energy_alternatives_based_on_a_fuzzy_analytic_hierarchy_process_in_Indonesia) [diakses 27 November 2021]
- [10] M. E. Lestiani, “Faktor-faktor Dominan Promosi yang Mempengaruhi Motivasi Konsumen dalam Membeli Suatu Produk dengan Menggunakan Metode AHP,” *INDEPT* Vol 1 ISSN 2087-9245, pp 15-20, Februari 2011.
- [11] T. L. Saaty, Thomas L, *Pengambilan Keputusan*, Jakarta : PT Pustaka Binaman Pressindo. pp 62-70.

- [12] D. Y. Chang, "Application of The Extent Analysis Method on Fuzzy AHP". *European Journal of Operational Research* 95, pp 649-655. Desember 1996.
- [13] K. J. Zu, Y. Jing, D. Y. Chang, "A discussion on Extent Analysis Method and applications of fuzzy AHP". *European Journal of Operational Research* 116, pp 450-456. Juli 1998.