

Evaluasi Pemilihan Teknologi *Co-firing* Biomassa Pada PLTU Batu Bara dengan Metode *Analytical Hierarchy Process* (Studi Kasus: PLTU XYZ)

Irwan Aufi^{1,*}, Joko Wintoko², Nur Aini Masrurroh³

¹Magister Teknik Sistem, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

³Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Article Info

Article history:

Received May 12, 2023

Accepted May 26, 2023

Published May 30, 2023

Keywords:

Proses Hierarki Analitik
Biomassa
Teknologi penembakan
bersama

ABSTRACT

Teknologi co-firing biomassa merupakan salah satu cara untuk mempercepat transisi menuju energi terbarukan di Indonesia. Co-firing saat ini digunakan untuk pembakaran campuran batubara dan biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap dengan blending rasio tertentu. Salah satu PLTU yang sudah menerapkan teknologi co-firing di Indonesia adalah PLTU XYZ. Namun seiring berkembangnya teknologi co-firing, PLTU XYZ mengalami sejumlah permasalahan, baik dari segi teknis maupun non teknis. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi teknologi co-firing yang paling tepat dapat digunakan untuk PLTU XYZ. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Analytical Hierarchy Process (AHP). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kriteria yang paling efektif adalah ekonomi dan lingkungan dengan bobot sebesar (0,4383) dan (0,3024) diikuti teknis (0,1904) dan sosial (0,0689). Teknologi co-firing biomassa yang paling tepat saat ini digunakan untuk PLTU XYZ adalah direct co-firing dengan bobot tertinggi (0,7080) disusul direct co-firing (0,1753) dan parallel co-firing (0,1165).



Corresponding Author:

Irwan Aufi,

Magister Teknik Sistem, Fakultas Teknik,

Universitas Gadjah Mada

Jl. Teknik Utara, No.3, Berek, Kocoran, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

Email: *irwanaufi21@gmail.com

1. PENGANTAR

Dewasa ini kebutuhan akan energi menjadi sangat penting terutama energi listrik. Energi listrik sebagian besar digunakan untuk keperluan esensial mulai dari sektor rumah tangga, perkantoran, bahkan industri. Indonesia merupakan negara berkembang yang sampai ini masih memanfaatkan sumber energi listrik dari energi fosil. Batubara merupakan bahan bakar fosil yang masih menjadi primadona karena dianggap mampu menopang ketahanan energi listrik di wilayah Jawa dan Bali melalui Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hal tersebut berbanding terbalik dengan pemanfaatan energi baru dan terbarukan di Indonesia yang masih terbilang rendah. Pada tahun 2025 mendatang cita-cita Indonesia terkait dengan target bauran energi nasional sebesar 23%, gas bumi sebesar 22%, minyak bumi sebesar 25% dan batubara sebesar 30% [1]. Sementara itu, pemerintah Indonesia telah menargetkan sampai akhir tahun 2022 target bauran energi nasional di Indonesia yaitu sebesar 15,7%. Namun, menurut data terakhir sampai juni tahun 2022 target bauran energi nasional di Indonesia baru tercapai sebesar 12,8%. Guna mewujudkan capaian target bauran energi nasional di tahun 2025 mendatang perlu adanya percepatan transisi pengembangan dibidang energi baru dan terbarukan. Biomassa

merupakan salah satu sumber daya energi baru dan terbarukan yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia. Biomassa juga bisa menjadi bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil seperti batubara dengan cara *co-firing*. Teknologi *co-firing* adalah proses pengolahan campuran atau kombinasi bahan bakar biomassa dengan batu bara pada *furnace boiler* di PLTU. Selain itu, *co-firing* juga dapat memangkas pemakaian bahan bakar fosil berupa batubara secara bertahap, pembakaran biomassa dengan batubara merupakan salah satu cara alternatif yang efisien untuk menurunkan emisi tanpa menyebabkan efisiensi [2]. Biomassa juga mampu meminimalisir dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara [3].

Co-firing merupakan metode atau teknologi pembakaran dua (atau lebih) jenis material yang berbeda pada saat bersamaan dan mengkombinasikannya dengan bahan bakar alternatif terbarukan yang lebih murah dengan kombinasi rasio tertentu sehingga dapat mengurangi pemakaian batubara dan menekan biaya pokok produksi listrik [4]. *Co-firing* biomassa pada PLTU XYZ sudah mulai diterapkan tahun 2022 dengan rasio pembakaran batu bara 95% dengan biomassa 5%. PLTU XYZ menggunakan jenis teknologi *direct co-firing* atau pembakaran bahan bakar batu bara dengan biomassa secara langsung karena dianggap paling mudah, biaya investasi yang murah dan juga minim terhadap penyediaan sarana pendukungnya dimana proses pencampurannya dilakukan pada sarana *fuel handling* yang terdapat di setiap fasilitas PLTU batu bara di Indonesia. Namun, *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ menimbulkan sejumlah risiko baik di area teknis maupun non teknis. Jenis risiko yang akan ditimbulkan pada pengoperasian *co-firing* dengan biomassa yaitu, menurunnya fleksibilitas pada pengoperasian dan ketersediaan pembangkit, dan juga dapat meningkatnya biaya modifikasi dan pemeliharaan mengenai pengelolaan biomassa dan instrumentasi pada proses pembakaran di *boiler*. Disisi lain juga terdapat risiko secara teknis pada area kerja *co-firing* dengan biomassa yaitu, masalah persiapan, pemrosesan dan penanganan bahan bakar, kemudian masalah terkait dengan pembakaran seperti stabilitas nyala api yang dapat mempengaruhi pengoperasian dan pengendalian pembangkit listrik, lalu masalah selanjutnya terkait dengan abu yang dapat menyebabkan *slagging*, *fouling*, korosi dan lain-lain, kemudian masalah terkait dengan emisi gas rumah kaca dan dampaknya terhadap lingkungan.

Teknologi yang potensial merupakan elemen pendukung yang sangat penting dalam pengembangan energi baru dan terbarukan (*renewable energy*). Teknologi yang tidak sesuai ataupun kurang tepat dapat berdampak tidak baik yaitu berupa kerugian didalamnya. Dampak tidak baik tersebut seperti produk energi yang dihasilkan tidak optimal, proses operasional teknologi yang tengah dijalankan tidak berkelanjutan atau tidak akan bertahan lama, kerugian material dan immaterial bahkan berdampak pada kegagalan total kedepannya. Oleh karena itu perkembangan ilmu pengetahuan yang luas membuat banyak peneliti dibidang sains dan teknologi melakukan riset terkait pemilihan teknologi untuk terciptanya energi yang baru dan terbarukan.

Beberapa penelitian sebelumnya terkait pemecahan permasalahan dengan metode pendukung keputusan multikriteria dalam pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan masih belum banyak dilakukan, hal ini dapat dibuktikan dengan literasi yang digunakan pada penelitian ini. Salah satu metode pendukung keputusan multikriteria dalam pemecahan suatu permasalahan yaitu *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Metode AHP merupakan metode pendukung keputusan multikriteria yang efektif dan powerful untuk memecahkan suatu permasalahan yang sangat kompleks [5]. Selain itu, metode AHP mampu menjelaskan suatu permasalahan yang kompleks menjadi suatu struktur yang berhierarki sehingga akan lebih mudah untuk diselesaikan dengan baik [6]. Pada penelitian ini dipilih metode multikriteria AHP karena AHP merupakan metode pendukung keputusan multikriteria yang memiliki relevansi dengan permasalahan yang sedang diteliti, dimana metode AHP digunakan sebagai alat untuk melakukan evaluasi apakah teknologi *co-firing* biomassa yang digunakan saat ini sudah paling tepat untuk PLTU XYZ. Selain itu, metode AHP juga dapat menentukan masing-masing bobot prioritas kriteria dengan cara melakukan perhitungan tingkat rasio konsistensinya, dimana nantinya kriteria yang ditentukan dapat bersifat kualitatif dan kuantitatif.

Penelitian yang pernah dilakukan terkait pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan dengan menggunakan metode AHP adalah penelitian dari kheybari dkk [7] yaitu, evaluasi teknologi produksi energi dari biomassa menggunakan metode AHP dengan tujuan untuk mengidentifikasi kriteria yang berpengaruh dalam melakukan evaluasi teknologi konversi biomassa menjadi biofuel di Iran melalui pendekatan *multi-criteria decision-making* (MCDM). Dimana pada penelitian tersebut metode AHP digunakan untuk proses evaluasi dalam menentukan nilai bobot untuk setiap kriteria dan alternatif. Penelitian selanjutnya datang dari asakereh dkk [8] yaitu, evaluasi teknologi energi baru terbarukan untuk pembangkit listrik di salah satu provinsi di Iran menggunakan metode *fuzzy AHP* dengan tujuan untuk melakukan investigasi kriteria dan pengembangan metode *fuzzy AHP* dalam melakukan evaluasi teknologi terbarukan untuk pembangkit listrik. Sehingga dengan metode *fuzzy AHP* yang dipilih dapat membantu pemerintah dalam memilih teknologi terbarukan yang sesuai untuk pembangkit listrik di Iran. Penelitian yang sama juga pernah dilakukan oleh redfoot dkk [9] yaitu, pengembangan desain pada proses industri energi baru terbarukan berbasis nuklir sistem *hybrid* menggunakan metode *fuzzy AHP*. Tujuannya yaitu melakukan pengembangan metode *fuzzy AHP* untuk mengevaluasi komponen industri pada desain awal sistem *hybrid* energi baru terbarukan berbasis nuklir.

Dimana metode *fuzzy* AHP digunakan sebagai proses evaluasi dalam memberikan bobot pada setiap kriteria dan alternatif. Kemudian penelitian lainnya dari yadaf dkk [10] yaitu pemilihan teknologi up-gradasi biogas yang dilakukan di India dengan tujuan untuk memilih teknologi up-gradasi biogas yang tepat digunakan di India.

Berdasarkan uraian keterangan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa penelitian ini belum pernah ada yang melakukan sebelumnya. Namun, dari sisi substansi penelitian cenderung terdapat kesamaan akan tetapi hal yang menjadi perbedaan dengan penelitian sebelumnya yaitu terletak pada objek dan lokasi yang diteliti secara spesifik. Oleh karena itu, pada penelitian ini studi kasusnya yaitu pada bidang energi baru terbarukan di area pembangkit listrik tenaga batu bara di Indonesia dengan tujuan untuk melakukan evaluasi terkait teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ menggunakan sistem pengambilan keputusan multikriteria yaitu metode AHP berdasarkan kriteria yang tersedia. Adapun kriteria yang sudah ditentukan bersama dengan para responden PLTU XYZ yaitu terdiri dari 4 kriteria utama dengan masing-masing sub kriteria. Kriteria pertama yaitu ekonomi dengan 4 subkriteria, kriteria kedua yaitu teknis dengan 10 subkriteria. kriteria ketiga yaitu lingkungan dengan 4 subkriteria dan kriteria keempat yaitu sosial dengan 3 subkriteria. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat mengetahui faktor atau kriteria apa saja yang digunakan untuk melakukan evaluasi kesesuaian teknologi *co-firing* biomassa yang paling tepat digunakan saat ini pada PLTU XYZ menggunakan metode AHP.

2. METODE PENELITIAN (10 PT)

Penelitian ini merupakan penelitian dengan studi kasus di salah satu anak perusahaan listrik negara yaitu PLTU XYZ. Tahap awal pada penelitian ini yaitu membuat struktur hierarki metode AHP. Tahap selanjutnya yaitu menentukan faktor atau kriteria apa saja yang menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan teknologi *co-firing* biomassa untuk pengolahan campuran biomassa dan batu bara. Asumsi yang digunakan pada metode AHP untuk menentukan faktor atau kriteria (sub kriteria) dapat dilakukan dengan studi literatur atau metode wawancara secara *forum group discussion* langsung dengan para *decision maker* terkait dengan masalah penelitian. Setelah menentukan faktor atau kriteria (sub kriteria), pada metode AHP dilakukan *pairwise comparison matrix* sebagai data utama untuk nantinya akan diolah dengan AHP nilai bobot dari setiap faktor atau kriteria (sub kriteria) yang telah diputuskan. Tahap yang terakhir yaitu dilakukan evaluasi terkait penilaian terhadap setiap alternatif teknologi *co-firing* biomassa. Kedepannya nanti dilakukan sintesis dalam pengambilan keputusan untuk mengevaluasi kesesuaian dalam pemilihan teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU batubara khususnya di PLTU XYZ berdasarkan nilai bobot tertinggi.

2.1. Data Penelitian

Data penelitian utama terbagi menjadi dua sumber data yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari data seperti wawancara dan kuesioner (*pairwise comparison*) yang diisi langsung oleh *decision maker*. Wawancara dilakukan secara diskusi berkelompok dengan tujuan untuk menyamakan persepsi terkait masalah penelitian dalam menentukan faktor atau kriteria (sub kriteria) apa saja yang menjadi dasar pertimbangan dalam melakukan evaluasi teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ. *Decision maker* atau responden disini berasal dari berbagai divisi atau departemen PLTU XYZ. Responden yang ikut berpartisipasi dalam penelitian ini berjumlah empat orang yang sudah profesional di bidang pembangkit listrik maupun energi dan memiliki pengalaman bekerja kurang lebih 5-10 tahun. Sehingga dengan pengalaman dan keahlian responden yang berkualitas diharapkan nantinya data yang diperoleh akan sesuai, handal dan dapat dipertanggungjawabkan dengan baik. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari kajian kepustakaan atau studi literatur yang memuat informasi tentang teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU batu bara.

2.2. Variabel Penelitian

Variabel pada penelitian ini yaitu tiga alternatif teknologi *co-firing* biomassa yang akan dievaluasi. Dalam melakukan evaluasi pemilihan *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ dengan metode AHP dibutuhkan suatu faktor atau kriteria (sub kriteria) yang menjadi dasar pertimbangan terkait dengan penelitian antara lain yaitu kriteria ekonomi, teknis, lingkungan dan sosial dengan sub kriteria masing-masing yang diperoleh dari studi literatur dan wawancara dengan pihak *decision maker* atau responden.

2.3. Analisis Data dengan AHP

Analisis data pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). AHP merupakan suatu sistem pendukung keputusan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty. Model sistem pendukung keputusan ini yaitu mengurai suatu masalah multi-kriteria yang kompleks menjadi suatu susunan hierarki. Hierarki diartikan sebagai suatu representasi dari sebuah permasalahan yang kompleks dalam bentuk suatu struktur multi-level. Level pertama yaitu tujuan. Level kedua yaitu faktor atau kriteria, Level ketiga yaitu sub kriteria (jika ada). Level keempat yaitu alternatif. Struktur hierarki dapat menguraikan suatu masalah yang kompleks menjadi suatu bentuk hierarki yang akan tampak lebih sistematis dan terstruktur [5]. Berikut di bawah ini tahapan metode AHP pada penelitian ini:

1. Membuat struktur hierarki terbagi menjadi 4 level yaitu, level 1 adalah tujuan, level 2 adalah kriteria, level 3 adalah sub kriteria (jika ada) dan level 4 adalah alternatif.
2. Membuat matriks perbandingan berpasangan yang memuat antar level 2 kriteria, level 3 sub kriteria (jika ada) dan level 4 alternatif.
3. Melakukan perhitungan pembobotan matriks perbandingan berpasangan untuk setiap level 2 kriteria, level 3 sub kriteria (jika ada) dan level 4 alternatif.
4. Melakukan perhitungan terhadap nilai *eigen value* dan *eigen vector* serta menguji konsistensi matriks perbandingan berpasangan yang sudah ditentukan dengan persamaan di bawah ini:

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

Keterangan, CI adalah *Consistency Index*, λ_{maks} adalah *eigen value*, dan n adalah jumlah orde matriks.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Keterangan, CR adalah *Consistency Ratio* dan RI adalah *Random Index*. Berikut di bawah ini ditunjukkan pada Tabel 1. Ketentuan nilai *random index*.

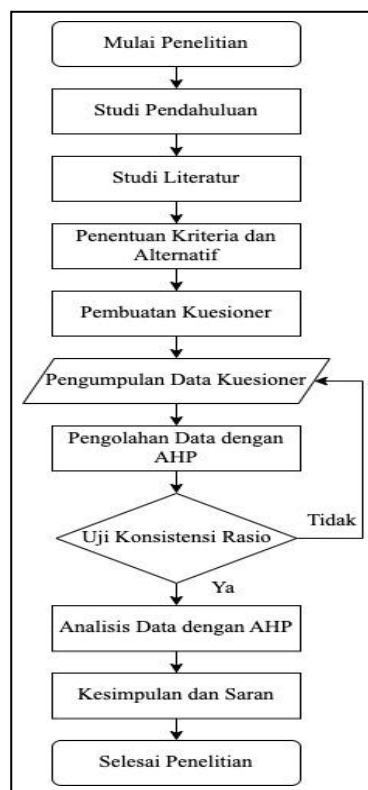
Tabel 1. Ketentuan Nilai *Random Index*

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

5. Melakukan perhitungan terhadap nilai bobot prioritas untuk setiap alternatif yang diperbandingkan sehingga akan didapatkan nilai bobot akhir untuk penentuan prioritas akhir.

2.4. Diagram Alir Penelitian

Untuk mempersingkat pemahaman tentang isi daripada penelitian ini, berikut di bawah ini ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

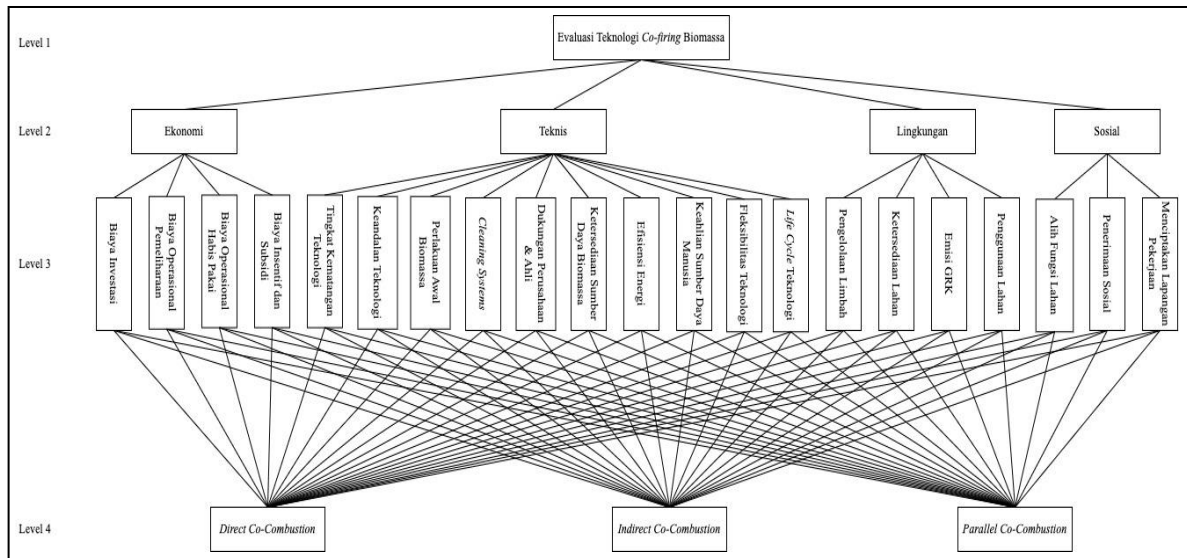
3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Struktur Hierarki

Pada penelitian ini langkah awal yang harus dilakukan adalah menyusun struktur hierarki. Struktur hierarki pada penelitian ini meliputi *goal* atau tujuan (level 1), kriteria (level 2), subkriteria (level 3) dan alternatif (level 4). Untuk menyusun struktur hierarki pada penelitian ini dapat dilakukan dengan melakukan studi literatur dan *forum group discussion*. Studi literatur bertujuan untuk memperoleh data atau informasi terkait permasalahan penelitian. Sedangkan *forum group discussion* bertujuan untuk memperoleh opini atau informasi dari responden yang ahli dan berkompeten pada penelitian yang sedang dilakukan. Berikut di

bawah ini ditunjukkan pada Gambar 2. Struktur hierarki lengkap penelitian yaitu, meliputi *goal* atau tujuan (level 1), kriteria (level 2), subkriteria (level 3) dan alternatif (level 4).

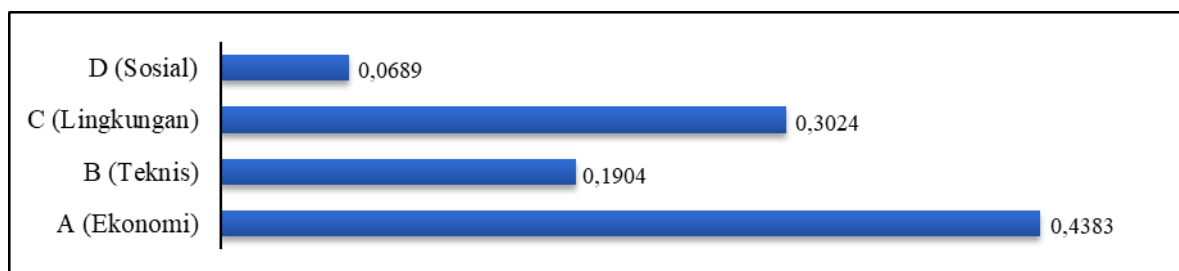
Struktur hierarki evaluasi pemilihan teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ meliputi 4 level yaitu, level pertama adalah *goal* atau tujuan untuk melakukan evaluasi terkait teknologi *co-firing* biomassa yang digunakan saat ini pada PLTU XYZ. Level kedua adalah kriteria utama, dimana kriteria ini akan menjadi dasar pertimbangan para responden untuk mengambil keputusan. Kriteria utama meliputi ekonomi, teknis, lingkungan dan sosial. Kemudian level ketiga adalah subkriteria yang diuraikan dari kriteria utama atas dasar kepentingan para responden selaku pengambil keputusan. Sub kriteria meliputi 4 sub kriteria ekonomi, 10 sub kriteria teknis, 4 sub kriteria lingkungan dan 3 sub kriteria sosial. Level keempat adalah teknologi *co-firing* biomassa yang diperbandingkan menjadi suatu alternatif pada penelitian ini.



Gambar 2. Struktur Hierarki Lengkap

3.2. Evaluasi Teknologi *Co-firing* Biomassa

Pada penelitian ini, kriteria yang digunakan untuk melakukan evaluasi teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ berdasarkan kriteria ekonomi, teknis, lingkungan dan sosial. Menurut opini para responden atau ahli (*decision maker*) dari kriteria yang sudah ditentukan tersebut, aspek ekonomi menjadi urutan pertama kriteria yang paling penting, kemudian diikuti oleh kriteria lingkungan, teknis dan sosial. Berikut di bawah ini ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik nilai bobot kriteria pada level 2.

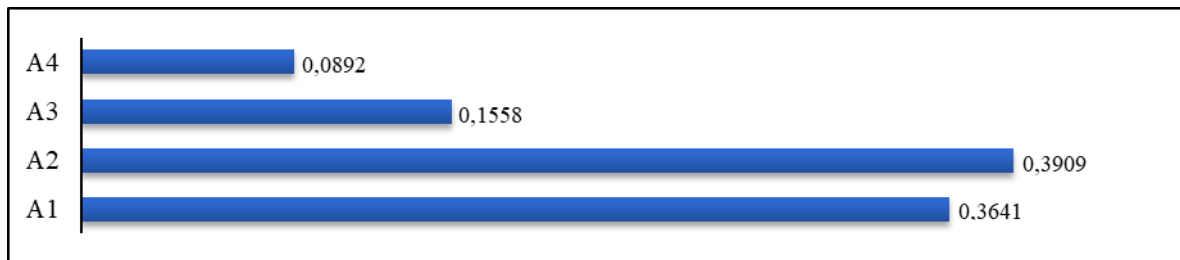


Gambar 3. Grafik nilai bobot kriteria pada level 2

Alasan kriteria ekonomi dan juga lingkungan menjadi aspek yang paling penting pada penelitian ini adalah karena dalam hal ini kriteria ekonomi mempertimbangkan biaya investasi dan biaya operasional dan pemeliharaan teknologi. Kedua biaya tersebut menjadi tolak ukur seberapa mahal dan murah untuk implementasi teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ jika dibandingkan dengan teknologi terbarukan dan tidak terbarukan lainnya [11]. Kemudian kriteria lingkungan juga tidak kalah pentingnya pada penelitian ini, karena masalah lingkungan dalam hal ini terkait polusi (emisi gas rumah kaca) yang disebabkan oleh suatu aktivitas atau kegiatan industri pembangkit listrik berbahan bakar batu bara untuk menghasilkan energi listrik seperti pada PLTU XYZ.

Adapun pembahasan selanjutnya yaitu terkait dengan sub kriteria yang digunakan pada penelitian ini. Sub kriteria digunakan sebagai bahan untuk menguraikan permasalahan yang terdapat pada kriteria utama (level 2). Menurut pendapat para responden selaku *decision maker* (pengambil keputusan) terdapat empat sub kriteria ekonomi yang digunakan pada penelitian ini yaitu (A1) biaya investasi, (A2) biaya operasional dan

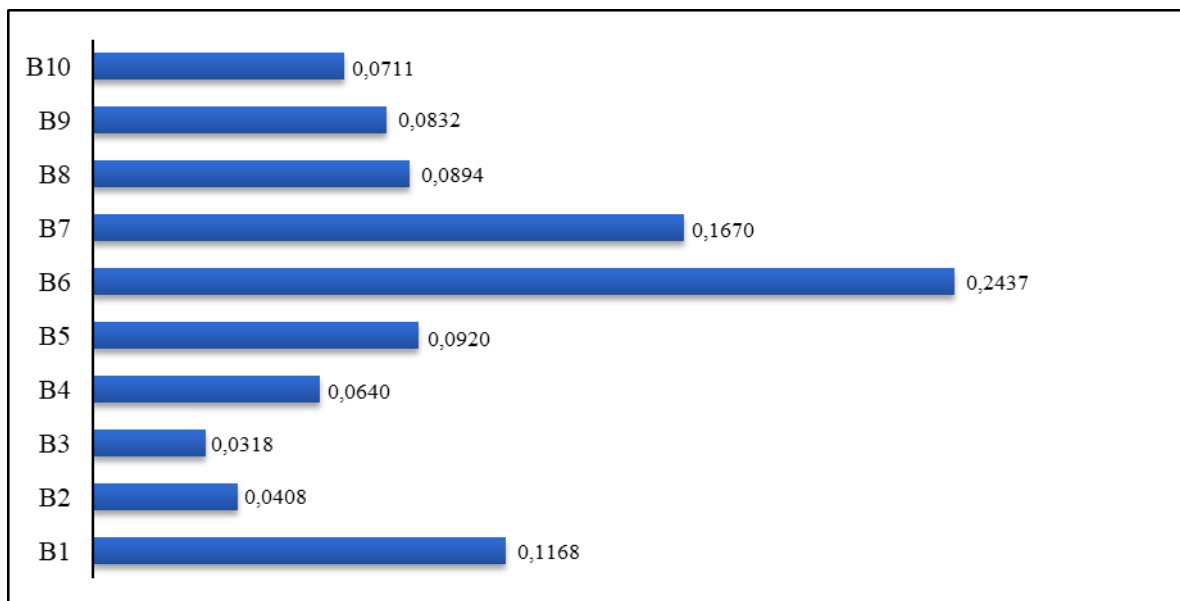
pemeliharaan, (A3) biaya operasional habis pakai (*consumable*) dan juga (A4) biaya insentif dan subsidi. Berikut di bawah ini ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik nilai bobot sub kriteria ekonomi pada level 3.



Gambar 4. Grafik nilai bobot sub kriteria pada level 3

Berdasarkan Gambar 4 di atas, sub kriteria ekonomi yaitu, biaya operasional dan pemeliharaan dan biaya investasi terpilih menjadi sub kriteria terpenting pada penelitian ini diikuti oleh biaya operasional habis pakai (*consumable*) dan biaya insentif dan subsidi. Alasannya, karena kedua sub kriteria tersebut identik dan mendapatkan nilai bobot tertinggi oleh para responden. Biaya operasional dan pemeliharaan merupakan biaya variabel (tidak tetap) yang meliputi dua bagian utama yaitu biaya pengoperasian termasuk didalamnya biaya upah, biaya energi, biaya layanan dan input dari operasi sistem energi tersebut. Kemudian, biaya pemeliharaan yang terdiri dari biaya pengeluaran untuk mencegah terjadinya kerusakan dan meningkatkan keandalan operasional pembangkit listrik [7]. Selanjutnya biaya investasi, pada penelitian ini biaya investasi menjadi pertimbangan penting kedua setelah biaya operasional dan pemeliharaan oleh para responden karena keberhasilan dan kelangsungan hidup suatu teknologi baru terbarukan seperti *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ dipengaruhi juga oleh biaya investasi [12].

Pada penelitian ini sub kriteria selanjutnya yang digunakan untuk melakukan evaluasi terkait teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ oleh para responden (*decision maker*) yaitu teknis. Sub kriteria teknis terdiri dari 10 sub kriteria.

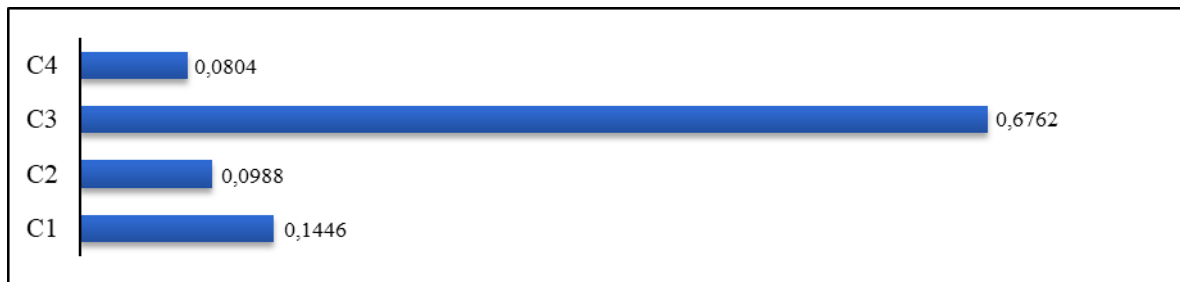


Gambar 5. Grafik nilai bobot sub kriteria teknis pada level 3

Berdasarkan Gambar 5 di atas, pada penelitian ini ketersediaan sumber daya biomassa menempati urutan pertama dengan nilai bobot tertinggi. Serupa dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Kheybari dkk [7] yaitu sub kriteria (B6) ketersediaan sumber daya biomassa mendapatkan nilai bobot tertinggi dibandingkan dengan sub kriteria lainnya. Adapun alasannya mungkin perlunya proporsi (keseimbangan) antara penawaran dan permintaan bahan baku biomassa. Dimana, penawaran dan permintaan dapat mempengaruhi biaya transportasi yang meningkat dan juga berpengaruh terhadap ketidakseimbangan pasokan dan permintaan bahan baku untuk pembangkit listrik. Pada penelitian lainnya yang serupa dilakukan oleh Amer dan Daim [13] dan Cutz [14], membuktikan bahwa ketersediaan sumber daya biomassa merupakan faktor kunci untuk menerapkan teknologi berbasis energi baru dan terbarukan. Sub kriteria lainnya seperti (B7) efisiensi energi, (B1) tingkat kematangan teknologi, (B5) dukungan perusahaan dan ahli, (B8) keahlian sumber daya manusia, (B9) fleksibilitas teknologi, (B10) *life cycle* teknologi, (B4) *cleaning*

systems, (B2) keandalan teknologi dan (B3) perlakuan awal biomassa menempati urutan kedua hingga kesepuluh.

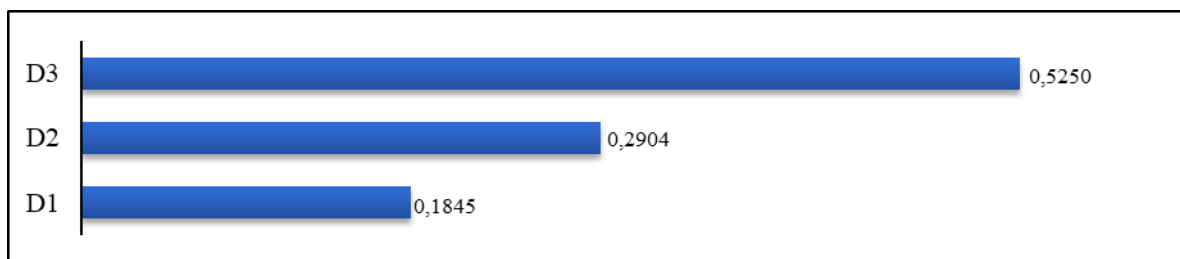
Kemudian sub kriteria lainnya yaitu sub kriteria lingkungan menjadi pertimbangan dalam penelitian ini. Sub kriteria tersebut terdiri dari (C1) pengelolaan limbah, (C2) ketersediaan lahan, (C3) dampak lingkungan (emisi gas rumah kaca) dan (C4) penggunaan lahan.



Gambar 6. Grafik nilai bobot sub kriteria lingkungan pada level 3

Berdasarkan Gambar 6 di atas, dampak lingkungan merupakan sub kriteria yang paling efektif di antara lainnya. Karena dampak lingkungan terkait dengan emisi gas rumah kaca pada proses pembangkit listrik tenaga batubara memiliki pengaruh yang signifikan. Oleh karena itu, emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh PLTU XYZ dengan kapasitas pembangkit yang besar dapat meningkatkan pemanasan global. Sub kriteria dampak lingkungan merupakan faktor strategis bagi keberhasilan teknologi terbarukan. Pada sub kriteria lingkungan, ketersediaan lahan, pengelolaan limbah dan penggunaan lahan menempati urutan kedua hingga keempat.

Selanjutnya, pada penelitian ini terdapat sub kriteria sosial digunakan sebagai faktor yang menjadi pertimbangan dalam melakukan evaluasi teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ. Faktor sosial meliputi (D1) alih fungsi lahan, (D2) penerimaan sosial dan (D3) menciptakan lapangan pekerjaan.



Gambar 7. Grafik nilai bobot sub kriteria sosial pada level 3

Berdasarkan Gambar 7 di atas, menciptakan lapangan pekerjaan ditunjukkan sebagai sub kriteria yang paling berpengaruh dengan bobot tertinggi. Salah satu alasan pentingnya sub kriteria ini adalah sistem pasokan bahan baku biomassa untuk pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dapat menciptakan lapangan pekerjaan selama siklus hidup pembangkit listrik tenaga uap. Dengan demikian proyek energi terbarukan dapat memberikan kontribusi bagi pembangunan dan meningkatkan kesejahteraan bagi masyarakat lokal di sekitar PLTU XYZ. Sub kriteria ini juga menunjukkan potensi untuk penciptaan lapangan kerja oleh sistem *power supply* pada pembangkit listrik dan juga dalam banyak penelitian digunakan untuk melakukan evaluasi teknologi energi terbarukan. Sub kriteria penerimaan sosial dan alih fungsi lahan menempati urutan kedua dan ketiga pada penelitian ini.

Tingkat rasio konsistensi (CR) gabungan dari kriteria dan sub kriteria dalam tiga level pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2, 3 dan 4. Terbukti bahwa nilai rasio konsistensi (CR) untuk semua matriks perbandingan berpasangan dapat diterima (CR kurang dari 0,1).

3.3. Evaluasi Bobot Perhitungan Kriteria, Sub Kriteria dan Alternatif

Untuk menentukan peringkat teknologi *co-firing* biomassa yang paling tepat digunakan PLTU XYZ saat ini yaitu dengan melakukan perhitungan untuk masing-masing bobot dari alternatif dikalikan dengan bobot kriteria utama kemudian dilakukan penjumlahan setiap barisnya. Adapun terdapat 4 kriteria utama pada level 2 yang diperbandingkan yaitu, ekonomi, teknis, lingkungan dan sosial. Berikut di bawah ini ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil perhitungan *weight score* kriteria pada level 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan *Weight Score* Kriteria Pada Level 2

Kriteria	Weight Score (w)	Eigen Value (λ)	CR	Peringkat
Ekonomi	0,4383	4,2369	0,0877	1
Teknis	0,1904			3

Lingkungan	0,3024	2
Sosial	0,0689	4

Selanjutnya, pada sub kriteria (level 3) dilakukan perhitungan nilai bobot untuk membandingkan masing-masing sub kriteria (level 2) yang digunakan. Sub kriteria pada masing-masing kriteria memiliki jumlah yang berbeda-beda. Berikut di bawah ini ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil perhitungan *weight score* sub kriteria pada level 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Weight Score* Sub Kriteria Pada Level 3

Sub Kriteria	Weight Score (<i>w</i>)	Eigen Value (λ)	CR	Peringkat
Biaya Investasi	0,3641			4
Biaya Operasioanal & Pemeliharaan	0,3909			3
Biaya Operasional Habis Pakai	0,1558	4,2437	0,0902	9
Biaya Insentif & Subsidi	0,0892			15
Tingkat Kematangan Teknologi	0,1168			11
Keandalan Teknologi	0,0408			20
Perlakuan Awal Biomassa	0,0318			21
<i>Cleaning Systems</i>	0,0640			19
Dukungan Perusahaan & ahli	0,0920			13
Ketersediaan Biomassa	0,2437	10,8570	0,0639	6
Efisiensi Energi	0,1670			8
Keahlian Sumber Daya Manusia	0,0894			14
Fleksibilitas Teknologi	0,0832			16
<i>Life Cycle</i> Teknologi	0,0711			18
Pengelolaan Limbah	0,1446			10
Ketersediaan Lahan	0,0988			12
Dampak Lingkungan	0,6762	4,1416	0,0524	1
Penggunaan Lahan	0,0804			17
Alih Fungsi Lahan	0,1845			7
Penerimaan Sosial	0,2904	3,0251	0,0216	5
Menciptakan Lapangan Pekerjaan	0,5250			2

Pada Tabel 3 di atas menunjukkan bahwa sub kriteria yang paling signifikan dalam melakukan evaluasi pemilihan teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU XYZ yaitu, dampak lingkungan (emisi gas rumah kaca). Hal ini menunjukkan bahwa PLTU XYZ berfokus untuk mengurangi penggunaan batu bara secara bertahap dan menggantikan dengan biomassa untuk menurunkan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembangkit listrik.

Berdasarkan perhitungan *weight score* pada kriteria dan sub kriteria untuk masing-masing alternatif pada Tabel 4 di bawah ini menunjukkan bahwa teknologi *co-firing* biomassa yang sudah paling tepat digunakan saat ini untuk PLTU XYZ adalah *direct co-firing* (pembakaran langsung) diikuti oleh *indirect co-firing* dan *parallel co-firing*. Alasan teknologi *direct co-firing* dipilih karena salah satu metode *co-firing* yang paling umum digunakan di pembangkit listrik tenaga uap di Indonesia untuk pengolahan campuran batu bara dengan limbah biomassa saat ini meskipun terlepas dari risiko atau permasalahan pada area teknis dan non teknis yang ditimbulkan. Selain itu juga, jenis biomassa yang digunakan tertentu dan rasio pencampuran antara batu bara dengan biomassa yang sedikit. Rasio pencampuran biomassa kedepannya dapat ditingkatkan seiring dengan kebutuhan PLTU XYZ dalam memangkas penggunaan batu bara dan menggantikan sepenuhnya dengan biomassa. Hal ini juga berpengaruh terhadap jenis teknologi *co-firing* yang digunakan apabila rasio pembakaran pada pembangkit listrik ditingkatkan menjadi lebih besar.

Tabel 4. Hasil Rekapitulasi Perhitungan *Weight Score* Alternatif Pada Level 4

Alternatif	Total Weight Score	Peringkat
<i>Direct Co-firing</i>	0,7080	1
<i>Indirect Co-firing</i>	0,1753	2
<i>Parallel Co-firing</i>	0,1165	3

4. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan pada penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor atau kriteria apa saja yang digunakan dalam melakukan evaluasi apakah teknologi *co-firing* biomassa yang digunakan PLTU XYZ saat ini sudah paling tepat dengan menggunakan metode AHP. Kriteria yang digunakan sebagai bahan evaluasi kesesuaian pemilihan teknologi *co-firing* PLTU XYZ saat ini secara berurutan adalah ekonomi (0,4383) lingkungan (0,3024) teknis (0,1904) dan sosial (0,0689). Kemudian berdasarkan hasil analisis dengan metode

AHP yang telah dilakukan bahwa evaluasi perbandingan terhadap 3 alternatif yang ada yaitu *direct co-firing*, *indirect co-firing* dan *parallel co-firing* maka teknologi *co-firing* yang saat ini digunakan sudah tepat dan sesuai dengan kondisi eksisting PLTU XYZ adalah *direct co-firing* dengan rasio pembakaran biomassa 5% dan mendapatkan total bobot 0,7080 terlepas dari risiko atau permasalahan teknis dan non teknis yang ada. Sehingga saran penelitian yang harus dilakukan kedepannya adalah melakukan evaluasi lebih detail terkait dengan aspek teknis dan non teknis pada teknologi *co-firing* biomassa yang saat ini digunakan PLTU XYZ.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pribadi, "Forum Kehumasan Dewan Energi Nasional: Menuju Bauran Energi Nasional Tahun 2025," *Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan Dan Konservasi Energi*. doi, vol. 10, 2021.
- [2] P. R. Wander, F. M. Bianchi, N. R. Caetano, M. A. Klunk, and M. L. S. Indrusiak, "Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity," *Energy*, vol. 203, p. 117882, 2020.
- [3] J. H. Miedema, R. M. J. Benders, H. C. Moll, and F. Pierie, "Renew, reduce or become more efficient? The climate contribution of biomass co-combustion in a coal-fired power plant," *Appl Energy*, vol. 187, pp. 873–885, 2017.
- [4] Y. Xu, K. Yang, J. Zhou, and G. Zhao, "Coal-biomass co-firing power generation technology: Current status, challenges and policy implications," *Sustainability*, vol. 12, no. 9, p. 3692, 2020.
- [5] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International journal of services sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008.
- [6] A. E. Munthafa and H. Mubarak, "Penerapan metode analytical hierarchy process dalam sistem pendukung keputusan penentuan mahasiswa berprestasi," *Jurnal Siliwangi Seri Sains dan Teknologi*, vol. 3, no. 2, 2017.
- [7] S. Kheybari, F. M. Rezaie, S. A. Naji, and F. Najafi, "Evaluation of energy production technologies from biomass using analytical hierarchy process: The case of Iran," *J Clean Prod*, vol. 232, pp. 257–265, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.357.
- [8] A. Asakereh, M. Soleymani, and S. M. Safieddin Ardebili, "Multi-criteria evaluation of renewable energy technologies for electricity generation: A case study in Khuzestan province, Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102220.
- [9] E. K. Redfoot, K. M. Verner, and R. A. Borrelli, "Applying analytic hierarchy process to industrial process design in a Nuclear Renewable Hybrid Energy System," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 145, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.pnucene.2021.104083.
- [10] P. Yadav, S. Yadav, D. Singh, R. M. Kapoor, and B. S. Giri, "An analytical hierarchy process based decision support system for the selection of biogas up-gradation technologies," *Chemosphere*, vol. 302, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134741.
- [11] L. B. Zhang and Y. Tao, "The evaluation and selection of renewable energy technologies in China," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 2554–2557. doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.044.
- [12] T. Ali, A. J. Nahian, and H. Ma, "A hybrid multi-criteria decision-making approach to solve renewable energy technology selection problem for Rohingya refugees in Bangladesh," *J Clean Prod*, vol. 273, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122967.
- [13] M. Amer and T. U. Daim, "Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan," *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, no. 4, pp. 420–435, 2011, doi: 10.1016/j.esd.2011.09.001.
- [14] L. Cutz, P. Haro, D. Santana, and F. Johnsson, "Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58. Elsevier Ltd, pp. 1411–1431, May 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.322.

