

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN AKIBAT KEGIATAN *GEOTHERMAL* : STUDI LITERATUR HUBUNGAN *LIFE CYCLE COST* DENGAN KERUSAKAN LINGKUNGAN

Resti Dwi Utami ^{1*}, Adji Maulana Putra ¹, Latifa Mirzatika Al-Rosyid ¹

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49 Sumbersari Kabupaten Jember, Jawa Timur, Indonesia 68121
email: restiutm02@gmail.com

Abstrak

Energi panas bumi merupakan sumber energi terbarukan dengan potensi signifikan untuk mendukung upaya pengurangan emisi dan transisi menuju sistem energi yang lebih bersih. Setiap tahapan pengembangannya, mulai dari eksplorasi hingga penutupan, masih memiliki dampak lingkungan yang memerlukan pemahaman yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hubungan antara Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost/LCC*) dan dampak lingkungan berdasarkan ringkasan berbagai literatur tentang pembangkit listrik tenaga panas bumi. Penelitian dilakukan dengan pendekatan deskriptif-komparatif melalui telaah artikel yang diterbitkan antara tahun 2000 dan 2025 dari beberapa basis data, seperti Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fase pengeboran dan konstruksi tetap menjadi komponen biaya terbesar, masing-masing sekitar 20–30% dan 50–60% dari total biaya siklus hidup. Sementara itu, fase operasi merupakan penyumbang emisi utama, yaitu sekitar 41,94 g CO₂-eq/kWh atau 96,9% dari total emisi. Temuan ini menunjukkan bahwa investasi substansial pada tahap awal berperan penting dalam mengurangi dampak lingkungan pada fase operasi melalui peningkatan efisiensi teknologi dan pengelolaan fluida. Oleh karena itu, integrasi antara penilaian LCA dan LCC penting untuk mendukung perencanaan proyek panas bumi yang lebih berkelanjutan, baik dari perspektif ekonomi maupun lingkungan.

Kata Kunci: Geothermal; *Life Cycle Cost*; *Life Cycle Assessment*; *Environmental Impact*; Emisi GHG.

Abstract

Geothermal energy is a renewable energy source with significant potential to support emission reduction efforts and the transition to a cleaner energy system. Each stage of its development, from exploration to closure, still has environmental impacts that require a comprehensive understanding. This study aims to examine the relationship between Life Cycle Cost (LCC) and environmental impacts based on a summary of various literature on geothermal power plants. The study was conducted using a descriptive-comparative approach through a review of articles published between 2000 and 2025 from several databases, such as Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar. The results show that the drilling and construction phases remain the largest cost components, accounting for approximately 20–30% and 50–60% of the total life cycle cost, respectively. Meanwhile, the operation phase is the main contributor to emissions, at approximately 41.94 g CO₂-eq/kWh or 96.9% of total emissions. These findings suggest that substantial investment in the early stages plays a crucial role in reducing environmental impacts in the operation phase through improved technology efficiency and fluid management. Therefore, integration between LCA and LCC assessments is important to

support more sustainable geothermal project planning, both from an economic and environmental perspective.

Keywords: Geothermal; Life Cycle Costs; Life Cycle Assessment; Environmental Impact; GHG emissions.

1. PENDAHULUAN

Pada masa ini, energi merupakan kebutuhan primer bagi manusia di bumi. Dengan berjalananya waktu dan meningkatnya ancaman dari perubahan iklim serta perkembangan teknologi menyebabkan kebutuhan energi terus tinggi di Indonesia. Pemenuhan kebutuhan energi menjadi modal vital untuk terealisasinya pengembangan dan pembangunan di Indonesia. Dalam mengatasi tantangan vital sekaligus pemanasan global, permintaan energi terbarukan dan bersih seperti, energi angin, bioenergi, dan panas bumi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fossil yang lambat laun terus meningkat.

Pemerintah berupaya secara berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik, upaya tersebut dilakukan untuk mencegah keterbatasan cadangan fossil serta meningkatkan dukungan komitmen Indonesia dalam menurunkan emisi gas rumah kaca. Memutuskan langkah-langkah untuk mengurangi emisi sangat penting dalam tingkat kesejahteraan umat manusia karena dampak pemanasan global dan perubahan iklim selalu bepotensi mengakibatkan bencana alam seperti kekeringan, banjir besar, naiknya permukaan air laut, bahkan terganggunya pertumbuhan tanaman [1]. Komitmen pemerintah untuk mencapai target aturan energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2025 sesuai Rencana Umum Energi Nasional [2]. Berdasarkan data dari Badan Energi Terbarukan Internasional (IRENA), energi panas bumi diperkirakan mampu menyumbang sekitar 3,5% dari kebutuhan listrik dunia pada tahun 2050 [3].

Pemanfaatan energi *geothermal* adalah salah satu upaya untuk memenuhi sasaran energi baru yang dapat diperbarui (EBT) di Indonesia. Namun, saat ini penggunaan energi *geothermal* belum mencapai tingkat optimal. Indonesia menyimpan cadangan panas bumi yang cukup besar, yakni sekitar 40 persen dari total potensi

global setara 23.765,5 Megawatt (MW), akan tetapi energi ini baru mencapai 11 % dari total potensinya, maka Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan penambahan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebesar 90 MW di sisa tahun 2024. Tambahan ini sebagai bentuk komitmen pemerintah dalam mempercepat pemanfaatan energi panas bumi sebagai sumber energi bersih melalui penyederhanaan perizinan dan penguatan infrastruktur pendukung oleh PLN (Persero) [4].

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menargetkan penambahan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebesar 90 MW hingga akhir tahun 2024. Upaya ini menjadi bagian dari komitmen pemerintah untuk mempercepat pemanfaatan energi panas bumi sebagai sumber energi bersih, yang didukung melalui penyederhanaan perizinan serta penguatan infrastruktur oleh PLN (Persero). Sehingga, perencanaan energi dalam bidang ini harus diperhatikan sedemikian rupa sehingga pemanfaatannya dapat direalisasikan dengan maksimal [5].

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari hubungan kausalitas antara energi bersih geothermal dengan biaya seluruh siklus hidup (*life cycle cost*) dalam mencapai target KESDM. Memperhatikan dampak lingkungan terhadap biaya siklus hidup energi terbarukan (EBT) geothermal merupakan hal yang sangat penting dalam penelitian ini.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif dan komparatif. Pendekatan ini bertujuan untuk mengeksplorasi secara sistematis berbagai penelitian sebelumnya yang membahas hubungan antara LCC dan tingkat kerusakan lingkungan pada kegiatan panas bumi. Penelitian dilakukan dengan cara mengumpulkan, memilih, dan menganalisis berbagai sumber ilmu pengetahuan yang relevan, agar memahami bagaimana biaya yang terjadi pada setiap tahap siklus hidup proyek panas bumi mulai dari tahap eksplorasi,

konstruksi, operasi, hingga penutupan yang berhubungan dengan tingkat dampak lingkungan yang dihasilkan.

Data penelitian diperoleh dari sumber sekunder, termasuk artikel ilmiah, laporan penelitian, dan publikasi teknis yang diterbitkan di jurnal terkemuka dan lembaga energi dan lingkungan. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data terkemuka, seperti Google Scholar, Scopus dan Science Direct. Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan antara tahun 2000 dan 2025, dalam bahasa Inggris dan Indonesia.

Analisis data dilakukan dengan pendekatan deskriptif-komparatif, yaitu dengan memeriksa hasil penelitian sebelumnya untuk menemukan hubungan antara biaya sepanjang siklus hidup dan dampak lingkungan. Setiap penelitian yang dipilih dianalisis berdasarkan jenis teknologi geothermal, tahapan siklus hidup yang diteliti, metode (*life cycle assessment*) LCA dan LCC yang digunakan, serta temuan utama mengenai besaran biaya dan dampak ekologis. Hasil analisis kemudian digabungkan untuk mengidentifikasi hubungan antara biaya sepanjang siklus hidup dengan tingkat kerusakan lingkungan, serta menentukan apakah meningkatnya biaya pada tahapan tertentu dapat mengurangi dampak ekologis atau sebaliknya. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai keseimbangan antara aspek ekonomi dan keberlanjutan lingkungan dalam pengelolaan proyek geothermal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Potensi Energi Geothermal

Secara global, energi panas bumi memiliki kapasitas melebihi 100 GW, namun pertumbuhannya yang lambat yaitu 3–4% per tahun dan kontribusinya yang terbatas kurang dari 1% terhadap pembangkitan listrik disebabkan oleh tantangan seperti lokasi eksplorasi yang langka, lokasi terpencil, dan masalah emisi [6]. Untuk pemanfaatannya dilakukan kegiatan eksplorasi dan eksplorasi untuk memindahkan energi panas tersebut ke permukaan agar dapat menggunakannya untuk menggerakan

turbin dan memutar generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Selanjutnya energi panas berupa uap atau air panas dimasukan kembali ke reservoir melalui sumur reinjeksi dengan tujuan menjaga keseimbangan energi panas sehingga menghasilkan sistem energi panas bumi yang berkelanjutan [8]. Hingga tahun 2019, pemanfaatan energi panas bumi untuk pembangkitan listrik telah menghasilkan kapasitas terpasang sebesar 2130,7 MW atau sebesar 8.9% dari sumber daya panas bumi, yang terdapat pada 11 Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) seperti dijelaskan pada gambar 1. Sesuai dengan Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang Panas Bumi yang diturunkan melalui Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 2017 tentang Panas Bumi untuk Pemanfaatan Tidak Langsung dijelaskan bahwa proses pengusahaan panas bumi dimulai dari tahapan penyiapan wilayah kerja [7].

No	Pulau	No. Lokasi	Sumber Daya (MW)					Total	Kapasitas Terpasang (MW)		
			Spekulatif	Hipotetik	Cadangan						
					Mungkin	Terduga	Terbukti				
1	Sumatera	101	2.276	1.557	3.735	1.040,7	1.070,3	9.679	744,3		
2	Jawa	73	1.265	1.190	3.414	418	1.820	8.107	1.253,8		
3	Bali	6	70	21	104	110	30	335	0		
4	Nusa Tenggara	31	190	148	892	121	12,5	1.363,5	12,5		
5	Kalimantan	14	151	18	13	0	0	182	0		
6	Sulawesi	90	1.365	362	1.041	180	120	3.068	120		
7	Maluku	33	560	91	497	6	2	1.156	0		
8	Papua	3	75	0	0	0	0	75	0		
Total		351	5.952	3.387	9.696	1.875,7	3.054,8	23.965,5	2.130,6		
14.626,5					23.965,5						

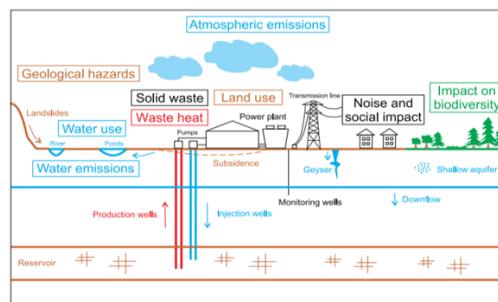
Gambar 1. Potensi Sumber Daya geothermal di Indonesia 2024 [4]

Pada gambar 1 dapat dilihat cadangan panas bumi di Indonesia begitu besar. Akan tetapi dikarenakan biaya pembangkit energi panas bumi relatif mempunyai modal awal yang tinggi terutama untuk biaya kegiatan eksplorasi dan eksplorasi sehingga terdapat hambatan dalam pengembangan energi panas bumi. Namun, untuk biaya perawatan pembangkit listrik tenaga panas bumi cenderung rendah [4].

B. Dampak lingkungan dari pengembangan Kegiatan Geothermal

Kegiatan eksplorasi geothermal merupakan tahap awal yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan, karena melibatkan pengeboran,

survei geofisika, dan pembangunan infrastruktur awal. Berdasarkan tinjauan pustaka, tahap ini menyebabkan gangguan fisik pada tanah dan vegetasi, perubahan morfologi lahan, dan peningkatan kebisingan akibat penggunaan alat berat. Pembukaan lahan dan pembangunan jalan akses juga dapat menyebabkan erosi dan sedimentasi di area sekitar lokasi proyek [6]. Meskipun dampak ini bersifat sementara, jika tidak dikelola dengan baik, tahap eksplorasi dapat menyebabkan degradasi tanah dan gangguan terhadap habitat lokal, terutama di kawasan konservasi atau kawasan dengan keanekaragaman hayati yang tinggi [2]. Berikut pada gambar 2 akan di ilustrasikan proses proses siklus hidup (*life cycle*) dari pembangkit listrik tenaga panas bumi (*geothermal power plant*).



Gambar. 2 proses siklus hidup *life cycle geothermal power plant* [8]

Pada tabel 1 menunjukkan bahwa fase operasi memberikan kontribusi dominan terhadap dampak lingkungan karena pelepasan gas alam dari fluida reservoir, sedangkan fase konstruksi dan pengeboran berkontribusi lebih kecil karena bersifat sementara.

Tabel.1 Analisis LCA dan LCC [9]

Tahapan	Emisi (g CO ₂ -eq/kWh)	Kontribusi (%)	Keterangan
<i>Drilling</i> (Pengeboran)	0,65 g CO ₂ -eq/kWh	1,49%	Bersumber dari konsumsi energi rig pengeboran, baja, dan semen untuk casing.
<i>Construction</i> (Konstruksi Pembangkit)	0,71 g CO ₂ -eq/kWh	1,63%	Akibat produksi material bangunan, alat berat, dan transportasi.
<i>Operation</i> (Operasi dan Pemeliharaan)	41,94 g CO ₂ -eq/kWh	96,9%	Emisi langsung dari gas CO ₂ dan H ₂ S dalam fluida

Tahapan	Emisi (g CO ₂ -eq/kWh)	Kontribusi (%)	Keterangan
			panas bumi serta kegiatan operasional.
<i>Decommissioning</i> (Penutupan)	<0,1 g CO ₂ -eq/kWh	<0,5%	Emisi dari proses pembongkaran dan transportasi limbah.
Total keseluruhan		$\approx 43,3$ g CO ₂ -eq/kWh	

Adapun tahap-tahap proses siklus hidup *geothermal* dengan hubungan emisi yang dikeluarkan adalah sebagai berikut:

B.1 Tahap Survey Lapangan

Tahap survei pendahuluan menjadi langkah awal dalam siklus hidup *life cycle* pengembangan proyek panas bumi yang berfungsi untuk mengenali potensi sumber panas bumi dan menilai kelayakan suatu wilayah sebelum kegiatan pengeboran dilakukan. Dalam jurnal [9], tahap ini termasuk dalam fase awal proyek (*pre-development stage*) yang menjadi bagian dari analisis (LCC) dan memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya investasi total[10]

Pada tahap ini, kegiatan utama mencakup pengumpulan data geologi, geofisika, dan geokimia, serta studi topografi dan lingkungan awal. Proses tersebut membutuhkan penggunaan alat survei, tenaga ahli, serta mobilisasi lapangan, yang semuanya menambah *cost component* pada fase awal proyek. Meskipun nilai biayanya lebih kecil dibandingkan pengeboran atau konstruksi, tahap survei pendahuluan berperan penting dalam mengurangi risiko ekonomi di tahap berikutnya, karena kesalahan dalam identifikasi area prospek dapat menyebabkan kerugian investasi yang besar saat pengeboran gagal menemukan reservoir yang produktif.

Tahap ini membutuhkan konsumsi energi dan bahan bakar untuk transportasi serta operasi alat ukur, sehingga menimbulkan emisi karbon (CO₂ dan NO_x) dalam jumlah kecil. Dari sudut pandang lingkungan, Bayer et al. menekankan bahwa meskipun tahap ini berdampak rendah terhadap emisi gas rumah kaca, ia menentukan

lokasi reservoir dan efisiensi energi sistem geothermal secara keseluruhan, sehingga secara tidak langsung memengaruhi hasil *LCA* dan *LCC* proyek [3].

B.2 Tahap Eksplorasi

Eksplorasi merupakan tahap pertama yang berfungsi untuk mengidentifikasi potensi sumber panas bumi melalui survei geologi, geofisika, dan geokimia. Kegiatan ini mencakup pemetaan struktur geologi, pengukuran suhu tanah, dan pengambilan sampel fluida alamiah [8]. Tahap ini membutuhkan konsumsi energi dan bahan bakar untuk transportasi serta operasi alat ukur, sehingga menimbulkan emisi karbon (CO_2 dan NO_x) dalam jumlah kecil. Dari sudut pandang lingkungan, Sondakh menekankan bahwa meskipun tahap ini berdampak rendah terhadap emisi gas rumah kaca, ia menentukan lokasi reservoir dan efisiensi energi sistem geothermal secara keseluruhan, sehingga secara tidak langsung memengaruhi *LCA* dan *LCC* proyek [9].

B.3 Tahap Pengeboran

Tahap eksplorasi dan pengeboran dalam kegiatan panas bumi merupakan fase awal yang memiliki potensi dampak lingkungan paling besar sebelum proyek beralih ke tahap konstruksi dan operasi. Berdasarkan hasil kajian kegiatan eksplorasi melibatkan survei geofisika, pengeboran sumur eksplorasi, serta pembangunan infrastruktur dasar yang menyebabkan gangguan langsung terhadap lahan dan vegetasi di sekitar lokasi proyek. Aktivitas pembukaan lahan dan pemasangan rig pengeboran menimbulkan perubahan penggunaan lahan, hilangnya vegetasi alami, serta gangguan terhadap habitat satwa liar di kawasan tersebut. Selain itu, proses pengeboran menghasilkan tingkat kebisingan dan getaran yang tinggi, yang dapat memengaruhi kesejahteraan masyarakat lokal dan fauna di sekitarnya.

Tahap pengeboran dan eksplorasi dalam proyek panas bumi merupakan fase dengan biaya modal tertinggi (*capital cost*) dalam keseluruhan siklus hidup proyek geothermal. Berdasarkan hasil analisis *LCC* yang disajikan oleh [9], kedua tahap ini memberikan kontribusi signifikan terhadap total biaya karena memerlukan penggunaan

energi, bahan, dan teknologi yang intensif. Aktivitas pengeboran satu sumur eksplorasi geothermal memerlukan baja (steel) dan semen (*cement*) dalam jumlah besar untuk pipa casing, semenisasi, serta pembangunan fondasi sumur. Penggunaan bahan-bahan ini tidak hanya menambah beban biaya, tetapi juga berkorelasi dengan peningkatan *embedded energy* dan *carbon footprint* selama proses pembuatan material tersebut [9].

Proses pengeboran dilakukan untuk membuat sumur produksi (*production wells*) dan sumur injeksi (*reinjection wells*) yang berfungsi menyalurkan fluida panas bumi dari dalam reservoir ke permukaan dan mengembalikannya setelah energi termal diekstraksi. Setiap sumur dibor hingga kedalaman antara 1.500 – 3.000 meter, menggunakan *rig* pengeboran besar, *casing* baja (*steel casing*), dan semen (*cementing*) untuk memperkuat struktur dinding sumur. Selama proses ini, digunakan lumpur pengeboran (*drilling mud*) untuk mendinginkan mata bor, menstabilkan tekanan, dan membawa material potongan batuan ke permukaan. Pekerjaan ini menghasilkan limbah lumpur pengeboran dan potensi pelepasan gas (CO₂ dan H₂S) dari fluida bawah permukaan. Setelah pengeboran selesai, dilakukan uji alir (*well testing*) untuk menilai tekanan, suhu, dan debit fluida panas bumi guna memastikan produktivitas sumur [11].

B.4 Tahap Konstruksi

Barasa kaberi, menyatakan bahwa penggunaan material seperti baja, tembaga, aluminium, dan beton pada tahap ini memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon terinkorporasi (*embedded carbon*). Selain itu, kegiatan transportasi material dan penggunaan alat berat menghasilkan polusi udara dan kebisingan local [6]. Kebisingan dari kegiatan konstruksi dan reklamasi lahan dianggap sebagai kebisingan standar. Tingkat kebisingan yang tinggi sekitar 120 dB (teredam sekitar 85 dB) yaitu kegiatan pengeboran. Selama pengujian sumur, uap bertekanan tinggi dilepaskan melalui peredam dengan tingkat kebisingan 70 – 110 dB (teredam). Sedangkan kebisingan konstruksi dan pembongkaran yang disebabkan oleh *truk*, *bulldozer*, dan *crane* pada kegiatan konstruksi jalan dan pembangkit. Selama operasional rutin menara pendingin, transformator dan pembangkit merupakan sumber utama kebisingan. Akan

tetapi dampak dari kebisingan dapat diminimalisir dengan menggunakan *safety earplug* pada saat bekerja dan kebisingan tidak menyebabkan dampak yang signifikan terhadap penduduk dikarenakan lokasi pembangkit yang jauh dari pemukiman [2].

Dampak lingkungan utamanya adalah pelepasan CO₂ tidak langsung dari proses industri bahan bangunan. Namun, tahap ini bersifat sementara, dan setelah konstruksi selesai, emisi turun drastis pada fase operasi. Secara ekonomi, fase ini merupakan komponen biaya modal (*capital cost*) terbesar dalam *life cycle cost* proyek *geothermal*.

B.5 Tahap Operasi Dan Maintenance

Tahap operasi merupakan fase terpanjang dan paling berpengaruh terhadap dampak lingkungan total. Pada fase ini, fluida panas bumi diambil dari reservoir melalui sumur produksi untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik, kemudian dikembalikan ke bawah tanah melalui sumur injeksi. [8] menunjukkan bahwa emisi pada fase operasi bervariasi antara 10–80 g CO₂-eq/kWh, tergantung sistem yang digunakan (*dry steam, flash steam, atau binary*). [9] melaporkan bahwa di sistem *binary cycle*, nilai emisinya sebesar 41,94 g CO₂-eq/kWh (96,9%), dengan sumber utama berasal dari gas CO₂ dan H₂S alami pada fluida *reservoir*.

Dari perspektif biaya, tahap operasi membutuhkan 10–15% dari total biaya proyek, yang digunakan untuk perawatan pompa, sistem injeksi, dan pemantauan kinerja reservoir [12]. Fase ini menunjukkan bahwa biaya operasional yang relatif kecil dapat menghasilkan dampak lingkungan besar bila gas panas bumi tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, investasi tambahan dalam teknologi pengendalian emisi (*gas scrubbing, re-injection*) dapat menurunkan dampak lingkungan secara signifikan.

B.6 Tahap Pemulihan

Tahap terakhir dalam siklus hidup *geothermal* adalah penutupan fasilitas dan pemulihan lahan setelah umur proyek berakhir. Kegiatan ini meliputi penutupan sumur (*well sealing*), pembongkaran bangunan pembangkit, dan rehabilitasi lingkungan untuk mengembalikan fungsi lahan [8]. Dampak lingkungan yang muncul terutama berasal

dari limbah konstruksi dan penggunaan energi selama pembongkaran. Walaupun emisi tahap ini relatif kecil dibandingkan tahap operasi, proses rekultivasi penting untuk mencegah kontaminasi residu logam berat dan bahan kimia dari sumur panas bumi.

Secara ekonomi, tahap dekomisioning hanya berkontribusi sebagian kecil terhadap total *life cycle cost*, namun perlu diperhitungkan dalam perencanaan jangka panjang proyek agar keberlanjutan lingkungan tetap terjaga.

C. *Life cycle cost*

Biaya siklus hidup LCC adalah perkiraan total biaya yang terkait dengan suatu proyek atau *sistem* sepanjang masa pakainya. Untuk pembangkit tenaga panas bumi, *life cycle cost* meliputi biaya yang terkait dengan biaya awal (pengembangan, pembangunan), biaya operasional dan biaya pemeliharaan serta biaya pembongkaran fasilitas pembangkit. Perkiraan *life cycle cost* pembangkit tenaga panas bumi akan bervariasi tergantung pada faktor-faktor seperti kapasitas pembangkit, teknologi yang digunakan, kondisi geologi, kebijakan energi, dan biaya bahan bakar [2].

Tabel. 2 Struktur *Life cycle cost* proyek geothermal Patuha [9]

Tahapan	Biaya (%)	Keterangan
Eksploaration & Drilling	20-30%	Termasuk biaya pengeboran sumur eksplorasi pengeboran produktif, dan uji alir sumur
Construction & Commissioning	50-60%	Pembangunan fasilitas pembangkit, sistem pipa, Jaringan listrik, dan infrastruktur pendukung.
Operation & Maintenance	10-15%	Biaya tahunan untuk pemeliharaan pompa, injeksi, dan perawatan sistem
Decommissioning	<1%	Biaya penutupan dan pemeliharaan lahan di akhir umur proyek

Evaluasi *life cycle cost* pada literatur bervariasi mulai dari yang hanya menyajikan biaya pada setiap tahapan siklus hidup sampai menyertakan indikator yang lebih luas seperti total biaya *tahunan* atau *Total Annualised Cost* (TAC) dan biaya rata-rata (*levelized cost*). TAC terdiri dari biaya modal tahunan, biaya tetap, biaya variabel serta biaya bahan bakar [2]. Sehingga melihat dari tabel 2 tahap dengan intensitas

energi dan material tertinggi (*drilling & construction*) adalah tahap dengan biaya terbesar dan juga dampak lingkungan terbesar, sedangkan fase operasi memiliki biaya dan emisi rendah [9].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kegiatan pengembangan energi panas bumi (geothermal) memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, namun juga menimbulkan dampak ekologis pada setiap tahap siklus hidupnya. Berdasarkan hasil tinjauan literatur, tahap operasi memberikan kontribusi terbesar terhadap emisi gas rumah kaca, yaitu sekitar 96,9% dengan nilai rata-rata 41,94 g CO₂-eq/kWh, sementara tahap konstruksi dan pengeboran berkontribusi lebih kecil namun membutuhkan biaya modal tertinggi.

Analisis LCC memperlihatkan bahwa sekitar 70–90% total biaya proyek geothermal berasal dari fase eksplorasi, pengeboran, dan konstruksi, sedangkan fase operasi dan pemeliharaan hanya sekitar 10–15% dari total biaya. Hubungan antara biaya dan dampak lingkungan menunjukkan bahwa investasi yang lebih besar pada tahapan awal (*drilling dan construction*) dapat mengurangi potensi kerusakan lingkungan pada fase operasi melalui penerapan teknologi mitigasi seperti *gas scrubbing* dan sistem *re-injection*.

Dengan demikian, pengelolaan proyek geothermal yang berkelanjutan memerlukan keseimbangan antara efisiensi ekonomi dan perlindungan lingkungan. Pendekatan LCA dan LCC perlu diterapkan secara terpadu agar pengambilan keputusan dalam proyek energi panas bumi dapat mendukung tujuan pembangunan rendah karbon dan keberlanjutan lingkungan di Indonesia.

4.2 Saran

Penelitian berikutnya dianjurkan untuk memanfaatkan data lapangan yang lebih komprehensif, membandingkan beragam teknologi pembangkit, meningkatkan

penggunaan teknologi pengendalian emisi, mengimplementasikan integrasi LCA dan LCC sejak awal perencanaan, serta mempertimbangkan pemakaian material konstruksi yang lebih ramah lingkungan supaya analisis biaya dan dampak lingkungan dapat dilakukan dengan lebih tepat dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] G. M. Idroes, I. Hardi, I. S. Hilal, R. T. Utami, T. R. Noviandy, and R. Idroes, “Economic growth and environmental impact: Assessing the role of geothermal energy in developing and developed countries,” *Innov. Green Dev.*, vol. 3, no. 3, 2024, doi: 10.1016/j.igd.2024.100144.
- [2] D. A. Istiqamah, A. N. Sasongko, and ; M Sidik Boedoyo, “Analisis dampak lingkungan dan life cycle cost pembangkit listrik tenaga panas bumi,” *e-Jurnal Ekon. Sumberd. dan Lingkung.*, vol. 11, no. 1, pp. 39–48, 2023.
- [3] KESDM, “Dirjen EBTKE: Kapasitas Terpasang Pembangkit EBT 2022 Lebih..Target.,” 2023. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/dirjen-ebtke-kapasitas-terpasang-pembangkit-ebt-2022-lebih-target>
- [4] KESDM, “Panas Bumi jadi Andalan Capaian Bauran EBT Hingga Akhir 2024,” 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/panas-bumi-jadi-andalan-capaian-bauran-ebt-hingga-akhir-2024>
- [5] D. S. Nurwahyudin and U. Harmoko, “Pemanfaatan dan Arah Kebijakan Perencanaan Energi Panas Bumi di Indonesia Sebagai Keberlanjutan Maksimalisasi Energi Baru Terbarukan,” *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 111–123, 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.10032.
- [6] M. J. Barasa Kabeyi, “Geothermal Electricity Generation, Challenges, Opportunities and Recommendations,” *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.*, vol. 5, no. 8, pp. 53–95, 2019, doi: 10.31695/ijasre.2019.33408.
- [7] N. laras Agustina, “Rencana Strategis Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan Dan Konservasi ENergi,” ペインクリニック学会治療指針 2 , pp. 1–9, 2019.
- [8] R. (2013). Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, “Review on life cycle environmental effects of geothermal pow,” vol. 26, pp. 446–463, 2013, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>
- [9] G. G. Sondakh, “Life Cycle Assessment of The Geothermal Power Plant in The Patuha Geothermal Field, Indonesia,” no. March, pp. 1–79, 2022, [Online]. Available: <https://en.ru.is/ise/research/research-projects/life-cycle-assessment->

of-the-geothermal-power-plant-in-the-patuha-geothermal-field-indonesia

- [10] A. Taryana, M. R. El Mahmudi, and H. Bektı, “Analisis Kesiapsiagaan Bencana Banjir Di Jakarta,” *JANE - J. Adm. Negara*, vol. 13, no. 2, p. 302, 2022, doi: 10.24198/jane.v13i2.37997.
- [11] A. Kjeld, H. J. Bjarnadottir, and R. Olafsdottir, “Life cycle assessment of the Theistareykir geothermal power plant in Iceland,” *Geothermics*, vol. 105, 2022, doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102530.
- [12] S. Aliyu and M. M. . Garba, “Review on Current Global Geothermal Energy Potentials and the Future Prospects,” *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 133–140, 2019, doi: 10.31695/ijasre.2019.33153.