

Analisis dampak lingkungan dan *life cycle cost* pembangkit listrik tenaga panas bumi

***Dita Aprilia Istiqamah¹; Nugroho Adi Sasongko²; M. Sidik Boedoyo³**

^{1,2,3}Program Studi Ketahanan Energi, Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas
Pertahanan Republik Indonesia

²Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jakarta, Indonesia

*E-mail korespondensi : ditaapriliaistiqamah@gmail.com

Abstract

The demand for electrical energy continues to increase along with population growth and technological developments. The household, industrial and commercial sectors are the main sectors for the use of electrical energy. Electricity also plays a crucial role in supporting national defense so that the government continues to strive to meet the electrical energy needs. Aligned with Indonesia's commitment to reduce greenhouse gases to support achieving net-zero emissions, the government promotes the utilization of new renewable energy, one of which is geothermal energy. Indonesia is known to have the largest geothermal energy potential in the world. Geothermal power plants are environmentally friendly, the life cycle of the plant is associated with environmental impacts and typically requires substantial initial investment. The research methodology used in this article is a literature review to analyze the environmental impact and life cycle cost of geothermal power plants. The results show that the operational activities are the primary source of environmental impacts. GPP produces low emissions and are economically competitive when compared to solar photovoltaic (PV) energy.

Keywords: *electrical energy, new renewable energy, geothermal power plants, environmental impact, life cycle cost.*

Abstrak

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring pertambahan penduduk dan perkembangan teknologi. Sektor rumah tangga, industri, dan komersial merupakan sektor utama penggunaan energi listrik. Listrik juga memiliki peran sangat penting untuk mendukung pertahanan negara sehingga pemerintah terus berupaya memenuhi kebutuhan akan energi listrik. Sejalan dengan komitmen Indonesia mengurangi gas rumah kaca untuk mendukung tercapainya net zero emission, Pemerintah menggalakan pemanfaatan energi baru terbarukan salah satunya energi panas bumi. Diketahui, Indonesia memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia. Pembangkit listrik tenaga panas bumi yang ramah lingkungan, siklus hidup pembangkit tersebut juga terkait dengan dampak lingkungan dan cenderung membutuhkan modal awal yang besar. Metodologi penelitian yang digunakan dalam artikel ini adalah studi literatur untuk menganalisis dampak lingkungan dan life cycle cost pembangkit listrik tenaga panas bumi. Hasilnya menunjukkan bahwa proses yang menyebabkan dampak lingkungan terbesar adalah kegiatan operasional. PLTP menghasilkan emisi rendah dan kompetitif secara ekonomi jika dibandingkan energi surya photovoltaic (PV).

Kata kunci: energi listrik, energi baru terbarukan, pembangkit listrik tenaga panas bumi, dampak lingkungan, *life cycle cost*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi menjadi kebutuhan primer bagi manusia. Seiring laju pertumbuhan ekonomi yang telah berlangsung secara berkala, penambahan penduduk dan perkembangan teknologi menyebabkan kebutuhan terhadap energi terus meningkat di Indonesia. Pemenuhan kebutuhan energi menjadi modal penting untuk terealisasinya pembangunan dan pengembangan wilayah di Indonesia. Energi juga mempunyai peran penting dalam mendukung pertahanan negara mengingat berbagai alat pertahanan yang digunakan saat ini membutuhkan energi salah satunya energi listrik.

Pemerintah terus berupaya memenuhi kebutuhan akan energi listrik. Untuk mengantisipasi berkurangnya cadangan fosil dan sebagaimana komitmen Indonesia untuk melakukan penurunan emisi gas rumah kaca, Pemerintah menggalakan pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT). Komitmen Pemerintah untuk mencapai target bauran energi baru terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 sesuai Rencana Umum Energi Nasional.

Pilihan untuk mengembangkan pembangkit listrik dari energi terbarukan diambil karena dikenal sebagai energi yang ramah lingkungan karena menghasilkan emisi CO₂ yang rendah. Salah satu energi terbarukan yang sangat potensial dimanfaatkan sebagai sumber energi adalah energi panas bumi. Diketahui, Indonesia memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia yang mencapai sekitar 40% dari potensi panas bumi di dunia (Gunawan *et al.*, 2021). Potensi energi panas bumi di Indonesia mencapai 29.452 MW yang tersebar di 324 lokasi, terdiri dari sumber daya sebesar 12.284 MW dan cadangan sebesar 17.192 MW (Khadijah, 2018). Potensi tersebut dapat meningkat dengan dilakukan kegiatan eksplorasi dan penemuan cadangan baru.

Pemanfaatan energi panas bumi merupakan salah satu usaha pemenuhan target energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia. Namun, pemanfaatan energi panas bumi saat ini belum optimal. Sumber energi panas bumi baru dimanfaatkan sebesar sebesar 2.355,4 MW hingga tahun 2022 yang berarti energi yang dimanfaatkan hanya sebesar 7,99% dari potensi energi (KESDM, 2023). Pengembangan energi panas bumi untuk pembangkit listrik diproyeksikan pada tahun 2025 sebesar 7,2 GW dan pada tahun 2050 sebesar 17,6 GW (RUEN, 2017). Energi panas bumi diperhitungkan diantara potensi energi terbarukan lainnya karena potensi yang besar untuk masa depan dan bersifat *sustainable*. Akan tetapi, semua pembangkit listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan, siklus hidup pembangkit tersebut juga mengakibatkan dampak lingkungan (Bayer *et al.*, 2013).

Deri segi biaya, biaya pengembangan energi panas bumi menjadi tantangan nyata bagi investor, yakni mencapai US\$4 juta per MW atau setara dengan Rp56 miliar per MW (PT Geo Dipa Energi, 2021). Dari perkiraan modal awal yang diperlukan, *drilling* menjadi tahapan yang paling banyak menelan biaya.

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini bertujuan untuk menganalisis dampak terhadap lingkungan dan *life cycle cost* pembangkit panas bumi dalam memenuhi kebutuhan energi dan mencapai target bauran energi baru terbarukan (EBT). Analisis dampak lingkungan dan *life cycle cost* pembangkit memiliki tujuan yang penting dalam pengembangan dan pengelolaan proyek pembangkit listrik tenaga panas bumi.

METODE

Metode yang digunakan dalam artikel ini yaitu metode kualitatif dengan pendekatan studi literatur. Studi literatur adalah proses mengumpulkan, menyusun, menganalisis, dan mensintesis literatur yang relevan dengan topik penelitian yang sedang diteliti (Sugiyono, 2019). Langkah-langkah dalam menggunakan metode

penelitian kualitatif dengan pendekatan studi literatur yaitu mencari literatur yang relevan dengan topik penelitian, mengevaluasi dan memilih sumber, mengorganisir literatur, membuat kerangka, menyusun literatur review (McCombes, 2023). Studi literatur bertujuan untuk membuat analisis dan sintesis terhadap pengetahuan yang sudah ada terkait topik yang akan diteliti untuk menemukan ruang kosong (gaps) dalam penelitian yang akan dilakukan (Carnwell & Daly, 2001).

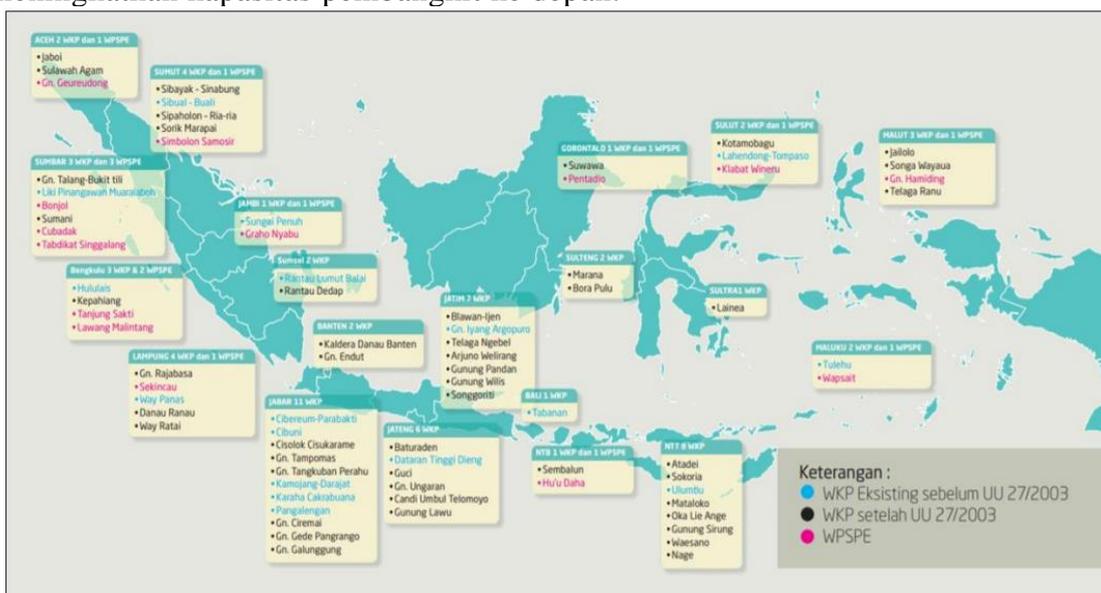
Dalam jurnal ini penulis menggunakan teknik pengumpulan data dari jurnal-jurnal ilmiah, artikel, kebijakan pemerintah dan publikasi yang relevan dengan topik penelitian. Beberapa data yang dikumpulkan dalam penelitian ini antara lain: potensi dan pemanfaatan energi panas bumi, limbah dan emisi yang dihasilkan, serta biaya siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Energi panas bumi

Panas bumi merupakan sumber energi panas yang terdapat dalam batuan yang berasal dari air hujan kemudian meresap ke dalam tanah mencapai batuan reservoir. Air tersebut kemudian di panaskan oleh magma dan berubah menjadi uap panas atau air panas dengan kisaran suhu 240 - 310°C. Untuk pemanfaatannya dilakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi untuk memindahkan energi panas tersebut ke permukaan agar dapat menggunakannya untuk menggerakkan 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 (Ditjen EBTKE, 2017).

Potensi energi panas bumi lebih banyak terdapat di wilayah barat Indonesia dibandingkan wilayah timur, dikarenakan jalur cincin api (*ring of fire*) yang melingkari Samudera Pasifik dari tenggara Australia hingga barat daya Amerika (Harefa & Harmoko, 2021). Indonesia yang membentang dari Pulau Sumatera, Jawa, Bali dan sebagian kecil wilayah Indonesia bagian timur memiliki potensi energi panas bumi mencapai 29,5 GW. Berdasarkan potensi energi ini, Pemerintah menetapkan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) dan Wilayah Penugasan Survey Pendahuluan & Eksplorasi (WPSPE) yang siap untuk dikembangkan guna meningkatkan kapasitas pembangkit ke depan.



Gambar 1. Peta Wilayah Kerja Panas Bumi (Khasmadin & Harmoko, 2021)

Pada Tabel 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 eksploitasi sehingga terdapat hambatan dalam pengembangan energi panas bumi (Ragimun, 2013). Namun, untuk biaya perawatan pembangkit listrik tenaga panas bumi cenderung rendah.

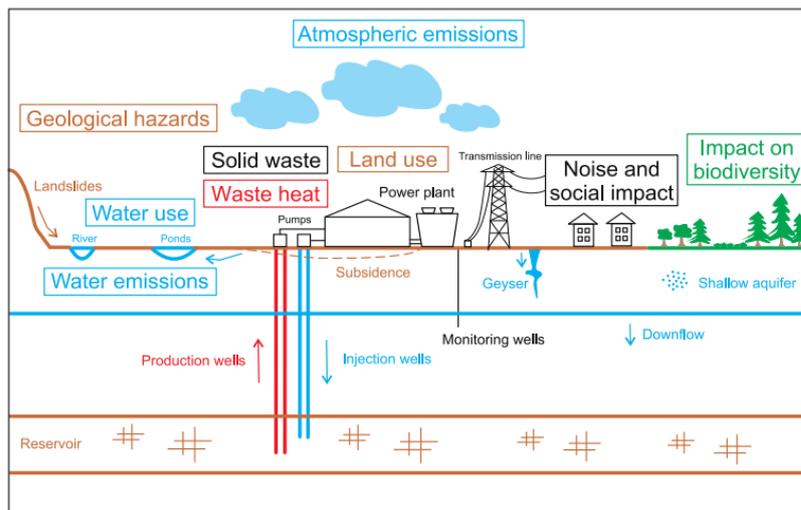
Tabel 1 . Potensi Panas Bumi di Indonesia

No.	Pulau	Potensi (MW)			Cadangan	
		Speculative	Hypothetical	Possible	Probable	Proven
1.	Sumatera	3.191	2.334	6.992	15	380
2.	Jawa	1.560	1.739	4.023	658	1.815
3.	Bali	70	22	262	0	0
4.	Nusa Tenggara	226	409	917	0	15
5.	Kalimantan	153	30	0	0	0
6.	Sulawesi	1.221	318	1.441	150	78
7.	Maluku	560	91	800	0	0
8.	Papua	75	0	0	0	0
Total		7.055	4.943	14.435	823	2.288
		11.998			17.546	
		29.544				

Sumber: RUEN, 2017

Dampak lingkungan dari pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi

Berikut adalah dampak lingkungan dari pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi (Bayer *et al.*, 2013):



Gambar 2. Dampak lingkungan siklus hidup dari pembangkit tenaga panas bumi (Bayer *et al.*, 2013)

Penggunaan lahan

Penggunaan lahan mengakibatkan perubahan bentang alam. Permukaan tanah dibutuhkan selama tahap siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi dan bisa

bersifat sementara (selama eksplorasi dan konstruksi) dan jangka panjang (selama operasional). Produksi energi panas bumi berfokus pada sumber daya di bawah tanah. Kegiatan produksi ini menyebabkan perubahan dan penipisan pada reservoir bawah tanah. Setara dengan penilaian tambang terbuka, kegiatan ini tidak dianggap sebagai masalah lingkungan yang kritis.

Sebagian lahan yang digunakan untuk kegiatan eksplorasi hanya digunakan sementara dan dalam jangka panjang untuk operasi pabrik penggunaan lahan diperkirakan tidak begitu luas. Akan tetapi dapat dilihat dari pembangkit listrik tenaga panas bumi di Indonesia dan Jepang, seringkali memiliki relevansi yang tinggi dikarenakan banyak cadangan panas bumi terletak di kawasan hutan lindung dan taman nasional sehingga dipandang sebagai masalah yang cukup serius. Gangguan visual dari instalasi di permukaan dapat mengganggu dan merusak lokasi dengan kualitas pemandangan serta mengakibatkan penebangan hutan. Sementara model yang dibangun pada masa-masa awal sangat besar, tetapi saat ini pemasangan lebih kecil dan tidak mencolok. Namun, terdapat keterbatasan fleksibilitas dalam menyesuaikan konstruksi permukaan di lokasi area panas bumi.

Bahaya geologi

Medan vulkanik yang curam dimana pembangkit listrik biasanya dibangun merupakan faktor yang sering terjadi reruntuhan atau tanah longsor. Deformasi tanah sering diamati sebagai akibat dari penurunan reservoir setelah pemindahan fluida. Pelepasan ditekan oleh formasi batuan yang kompresibel yang menutupi reservoir yang mengalir dan memadat setelah tekanan air pori berkurang. Umumnya di bidang yang didominasi cairan, sering terletak di bantuan vulkanik muda yang tidak terkonsolidasi.

Jika terjadi gempa bumi akan terjadi ledakan hidrotermal dan semburan sumur. Ketika bantalan uap terbentuk di atas air tanah atau pelepasan tekanan *overburden* secara tiba-tiba. Singkatnya, produksi energi panas bumi biasanya terkonsentrasi di lingkungan yang muda dan aktif secara geologis, rapuh dan sensitif seringkali tidak tersentuh dan sulit di akses. Akan tetapi saat ini hal ini jarang terjadi karena adanya akumulasi dari pengalaman dan peningkatan teknologi sehingga pengembangan energi panas bumi membutuhkan investasi yang relatif besar.

Limbah panas

Pada pembangkit panas bumi, limbah panas dilepaskan ke lokasi produksi, atmosfer, kolam atau badan air. Ketika limbah panas langsung digunakan untuk pemanasan (misalnya disalurkan ke jaringan pemanas distrik) maka keuntungan ekonomi dari pengembangan panas bumi tidak hanya meningkat tetapi juga memberikan manfaat terhadap lingkungan yang signifikan karena mengurangi limbah panas ke sekitar.

Emisi

Selama siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi, emisi yang dihasilkan berasal dari gas buang yang terkait dengan penggunaan diesel pada saat konstruksi jalan, sumur, transportasi dan pembangkit listrik. Akan tetapi, emisi gas buang relatif kecil. Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan seperti H₂S, CO₂ dan CH₄ yang mengakibatkan dampak lingkungan.

Beberapa publikasi terkait dengan intensitas emisi CO₂ dari pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) oleh beberapa peneliti. Bertani & Thain

dalam penelitiannya terhadap 85 PLTP di 11 negara menemukan bahwa intensitas emisi rata-rata dari PLTP adalah sekitar 122 g/kWh. Bloomfiel *et al.* melakukan penelitian terhadap beberapa PLTP di Amerika Serikat menyatakan bahwa intensitas emisi PLTP sekitar 90 g/kWh. Selain itu, Hondo yang melakukan kajian terhadap intensitas emisi berbagai jenis pembangkit listrik di Jepang menyimpulkan bahwa intensitas emisi PLTP sekitar 15 g/kWh. Sullvian *et al.* yang melakukan penelitian terhadap beberapa PLTP menyatakan bahwa intensitas emisi PLTP sekitar 103 g/kWh. Terakhir, Skone yang juga melakukan studi melaporkan bahwa intensitas emisi PLTP adalah sekitar 245,2 g/kWh. Perbedaan nilai intensitas emisi ini disebabkan karena asumsi dan ruang lingkup yang digunakan juga berbeda (Susila *et al.*, 2014).

Intensitas emisi CO₂ pada pengembangan PLTP di Indonesia berkisar antara 19,5–130,6 g/kWh dengan rata-rata sekitar 45 g/kWh. Intensitas emisi yang dihasilkan jauh lebih kecil dibandingkan intensitas emisi pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Hal ini menunjukkan bahwa PLTP lebih ramah dari sisi pemanasan global (Susila *et al.*, 2014).

Limbah Padat dan Limbah Cair

Dampak negatif dari produksi energi panas bumi adalah menghasilkan limbah. Limbah yang dihasilkan berupa limbah padat dan limbah cair. Limbah padat yang dihasilkan berupa lumpur (*sludge*). Lumpur ini dihasilkan dari endapan ketika proses pengolahan limbah cair (*brine*) dan kerak silika dari pipa-pipa instalasi PLTP. Limbah padat juga berasal dari lumpur bor dan serbuk bor yang berbahan dasar *synthetic oil* pada kegiatan pemboran eksplorasi panas bumi. Komponen utama limbah *sludge* adalah air, minyak, padatan dan beberapa logam berat (Trianto & Sulistyono, 2019).

Limbah cair merupakan air kondensasi dari PLTP dan *brine* yang tidak diinjeksikan kembali ke dalam reservoir maka akan menjadi limbah cair. Limbah cair dari industri PLTP biasanya mengandung berbagai mineral tersuspensi dan terlarut dengan kandungan total padatan terlarut yang cukup tinggi. Limbah padat maupun limbah cair yang berpotensi mengandung limbah B3 memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan membahayakan Kesehatan makhluk hidup sekitarnya, sehingga limbah tersebut harus dilakukan pengelolaan sesuai dengan regulasi yang mengatur lingkungan hidup (Trianto & Sulistyono, 2019).

PLTP PT Geo Dipa Energi Unit 1 Dieng merupakan industri panas bumi yang menghasilkan mineral terlarut cukup besar baik material padat berupa silika hasil *scaling* dan material *sludge* yang berasal dari pengendapan di kolam pengendapan maupun saluran terbuka yang belum dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, harus segera dilakukan bagaimana pemanfaatan limbah (Yuniati *et al.*, 2011).

Untuk mengatasi masalah limbah yang dihasilkan dari industri PLTP, dilakukan pengelolaan dan pemanfaatan berdasarkan karakteristik limbah. Limbah padat dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan (batako atau *paving block*), beton atau bata ringan, silika gel yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri lain (Yuniati *et al.* 2011). Sedangkan limbah cair yang mengandung berbagai jenis mineral berupa silika, kalium, magnesium bisa dimanfaatkan menjadi produk yang bernilai tinggi yaitu pupuk *multinutrien phosphate-base* seperti MgKPO₄ dan Mg₃(PO₄) (Trianto & Sulistyono, 2019). Limbah cair (*brine*) hasil pemisahan yang masih memiliki energi panas dapat dimanfaatkan kembali. Pemanfaatan kembali *brine* digunakan dalam berbagai bidang seperti bidang pertanian, agroindustri, perikanan, pariwisata, green house, pemanas ruangan dan lain-lain (Pandey *et al.*, 2022).

Penggunaan Air

Pada instalasi dan operasional pembangkit listrik tenaga panas bumi membutuhkan air yang cukup besar. Air dibutuhkan sejak awal kegiatan eksplorasi dalam jumlah yang besar hingga mencapai 1000 m³/hari untuk pengeboran. Diperkirakan total konsumsi air untuk konstruksi sumur 1 m sekitar 5–30 m³ tergantung pada litologi, teknologi, jumlah lapisan dan kedalaman. Hal ini berarti untuk sumur sepanjang 2 km, penggunaan air mencapai 8.000–55.000 m³.

Selama operasional, air dibutuhkan dalam jumlah kecil untuk meminimalkan *scaling* dan mengelola padatan terlarut. PLTP membutuhkan lebih banyak air daripada pembangkit uap berbahan bakar fosil karena efisiensi konversi listrik panas lebih rendah (8–15%). Dibutuhkan sekitar 0,75 – 1,15m³/MWh dari total volume air yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati

Penggunaan lahan dan penebangan hutan dapat mengurangi jumlah spesies dan populasi di dalamnya. Kegiatan eksplorasi panas bumi di daerah hulu dapat mengganggu distribusi aliran sungai karena memerlukan air tanah. Jika air tanah dimanfaatkan secara terus menerus, dalam jangka panjang kegiatan ini akan menyebabkan hulu sungai akan menjadi kering jika musim kemarau.

Contoh kasus yang terjadi di sekitar Sungai Cikaro, diduga salah satu penyebabnya karena kegiatan eksplorasi panas bumi yang mempengaruhi keanekaragaman hayati ikan di aliran Sungai Cikaro. Ikan merupakan organisme sensitif dan rentan terhadap perubahan lingkungan. Ada salah satu lokasi yang terkena dampak langsung dari kegiatan PLTP Komajang yang mana terdapat pipa buangan limbah yaitu air panas yang langsung masuk ke dalam Danau Cikaro dan diketahui terdapat kandungan logam Cd dan Pb sehingga menghambat pertumbuhan ikan dan keanekaragaman ikan rendah (Permana *et al.*, 2015).

Kebisingan

Selama siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi, sumber kebisingan yang potensial disebabkan dari kegiatan konstruksi dan pengeboran, pengoperasian pembangkit dan kegiatan pembongkaran selama reklamasi lahan. 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.

Life Cycle Cost

Biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost/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.

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. Total biaya tahunan digunakan untuk membandingkan teknologi pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan energi terbarukan lainnya dan bahan bakar fosil untuk mengestimasi dimana bahan bakar fosil mendominasi TAC. Selain menggunakan indikator tersebut, juga disarankan menggunakan *Net Present Value* (NPV). NPV dapat digunakan sebagai salah satu metode evaluasi keuangan dalam menghitung nilai ekonomi dari proyek panas bumi. Perhitungan NPV mempertimbangkan biaya eksplorasi dan perizinan, peralatan bawah permukaan dan pembuatan sumur, pendapatan tahunan dari pembangkit listrik, biaya operasional dan pemeliharaan tahunan, tingkat diskon, dan umur pembangkit. NPV positif merupakan persyaratan krusial untuk melaksanakan proyek (Li *et al.*, 2022). Analisis yang cermat dan perencanaan yang baik diperlukan untuk memperkirakan biaya siklus hidup secara akurat sebelum memulai proyek pembangunan pembangkit tenaga panas bumi.

Sebuah studi menyebutkan biaya siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi menemukan rata – rata USD 0,06/kWh, lebih tinggi dari nuklir rata-rata USD 0,03/kWh, batubara rata-rata USD 0,04/kWh dan gas alam rata-rata USD 0,05/kWh. Tetapi masih lebih murah dibandingkan solar PV rata-rata USD 0,3/kWh. Namun, diketahui bahwa biaya telah berubah secara signifikan selama 10 tahun terakhir, termasuk penurunan drastis biaya solar PV, saat ini sekitar USD 0,07/kWh (Li *et al.*, 2022).

Faktor utama yang mempengaruhi ekonomi pembangkit listrik tenaga panas bumi dari aspek teknis adalah gradien panas dari lokasi produksi, efisiensi konversi panas selama produksi dan operasi. Meskipun biaya modal seringkali relatif tinggi, hal ini dapat diimbangi oleh faktor eksternal seperti pembiayaan pemerintah dan sistem insentif.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Semua opsi pembangkit listrik energi baru terbarukan yang ramah lingkungan, siklus hidup pembangkit tersebut juga mengakibatkan dampak lingkungan. Limbah dari kegiatan produksi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan membahayakan kesehatan makhluk hidup. Untuk meminimalisir dampak yang ditimbulkan maka harus dilakukan pengelolaan limbah yang sesuai dengan regulasi yang mengatur. Limbah industri panas bumi yang berupa limbah *sludge* dan *brine* dapat dimanfaatkan sebagai material baru. Limbah *sludge* dapat dimanfaatkan untuk pembuatan batako (*paving block*) dan bahan baku industri lain. Sedangkan limbah *brine* yang mengandung berbagai jenis mineral dapat digunakan sebagai pupuk *multinutrien phosphate-base*. Nilai intensitas emisi yang kecil dengan jelas menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan panas bumi sebagai pembangkit listrik dapat membantu Pemerintah dalam upaya penurunan emisi CO₂, terutama dari sektor pembangkit listrik.

Sedangkan untuk *life cycle cost* pembangkit listrik tenaga panas bumi menemukan nilai rata-rata USD 0,06/kWh yang dihasilkan, yang menunjukkan bahwa panas bumi kompetitif secara ekonomi jika dibandingkan dengan energi surya *photovoltaic* (PV).

Saran

Salah satu metode efektif untuk mengurangi emisi gas CO₂ adalah dengan memanfaatkan sifat alami pohon sebagai penyerap CO₂. Menggunakan vegetasi pada lahan bekas operasi sebagai penyerap emisi dapat membantu menyerap kelebihan CO₂ di atmosfer. Oleh karena itu, penting untuk segera melakukan reklamasi dan revegetasi setelah lahan tidak digunakan. Hal ini dikarenakan setiap tahunnya terjadi penurunan kondisi hutan yang diakibatkan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446-463.
- Bertani, R., & Thain, I. (2002). Geothermal power generating plant CO₂ emission survey. *IGA news*, 49, 1-3.
- Bloomfield, K. K., Moore, J. N., & Neilson, R. N. (2003). Geothermal energy reduces greenhouse gases. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 32(2), 77-79.
- Carnwell, R., & Daly, W. (2001). Strategies for the construction of a critical review of the literature. *Nurse education in practice*, 1(2), 57-63.
- Ditjen EBTKE. (2017). Energi Panas Bumi Ramah Terhadap Lingkungan Sekitar. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2017/08/22/1733/energi.panas.bumi.ramah.terhadap.lingkungan.sekitar>
- Gunawan, I., Windarta, J., & Harmoko, U. (2021). Overview Potensi Panas Bumi di Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(2), 60-73.
- Harefa, J. C., & Harmoko, U. (2021). Maksimalkan Potensi Geothermal dengan Pembentukan Holding BUMN Geothermal. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(3), 144-153.
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30(11-12), 2042-2056.
- KESDM. (2023). Dirjen EBTKE: Kapasitas Terpasang Pembangkit EBT 2022 Lebih Target. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/dirjen-ebtke-kapasitas-terpasang-pembangkit-ebt-2022-lebih-target>
- KESDM. (2018). Kini Indonesia Menjadi Produsen Listrik Panas Bumi Terbesar Kedua Dunia. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kini-indonesia-menjadi-produsen-listrik-panas-bumi-terbesar-kedua-dunia>
- Khadijah, N. S. (2018). Analisis Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Melalui Insentif Fiskal dalam Mendukung Ketahanan Energi Indonesia. *Ketahanan Energi*, 3(2).
- Khasmadin, M. F. I., & Harmoko, U. (2021). Kajian Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi Patuha Ciwidey. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 101-113.
- Li, J., Tarpani, R. R. Z., Stamford, L., & Gallego-Schmid, A. (2022). Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants. *Sustainable Production and Consumption*.
- McCombes, S. (2023). How to Write a Literature Review | Guide, Examples, &

- Templates. Scribbr. <https://www.scribbr.com/dissertation/literature-review/>
- Pambudi, N. A. (2018). Geothermal Power Generation in Indonesia, a Country within the Ring of Fire: Current Status, Future Development and Policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Pandey, F., Kuntjoro, Y. D., & Uksan, A. (2022). Perancangan Sistem Pemanas Ruangan dengan Memanfaatkan Energi Panas dari Brine di Lapangan Panas Bumi Wayang Windu. *Jurnal Kewarganegaraan*, 6(2), 2836-2846.
- Peraturan Presiden RI No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN).
- Ragimun, R. (2013). Revitalisasi Investasi Pengembangan Energi Panas Bumi di Indonesia. *Kajian Ekonomi dan Keuangan*, 17(1), 1-23.
- Undang-Undang No. 30 Tahun 2007 tentang Energi.
- Permana, M. S., Hamdani, H., & Junianto (2015). Pengaruh Kegiatan Geothermal Terhadap Keanekaragaman Ikan Di Aliran Sungai Cikaro, Kabupaten Bandung. *Jurnal Perikanan Kelautan*, 6(2 (1)).
- PT Geo Dipa Energi. 2021. Sinergi dan Integrasi yang Berlandaskan Aspek Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola (ESG) untuk Meraih Pertumbuhan Berkelanjutan. Laporan Tahunan.
- Skone, T. J., Littlefield, J., Eckard, R., Cooney, G., & Marriott, J. (2012). *Role of alternative energy sources: Geothermal technology assessment* (No. NETL/DOE-2011/1531). National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV, and Albany, OR (United States).
- Sugiyono. (2019). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Alfabeta.
- Sullivan, J. L., Clark, C. E., Han, J., & Wang, M. (2010). *Life-cycle analysis results of geothermal systems in comparison to other power systems* (No. ANL/ESD/10-5). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States).
- Susila, I. M. A. D., Sihombing, A. L., Magdalena, M., & Adila, I. (2014). Jejak Karbon Pengembangan Pembangkit Listrik Panas Bumi Di Indonesia; Carbon Footprint Of Geothermal Power Plant Development In Indonesia. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, 13(2), 123-138.
- Trianto, W. M., & Sulistyono. (2019). Sumber Limbah dan Potensi Pencemaran Penggunaan Sumber Daya Alam Panas Bumi (Geothermal) pada Industri Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 9(2), 52–62.
- Yuniati, M. D., Agustinus, E. T. S., Hadi, I., & Marganingrum, D. (2011). Konsep Pengelolaan Lingkungan Kawasan Industri Panas Bumi Guna Mendukung Pembangunan Berkelanjutan: Aspek Pemanfaatan Limbah Padat. *PROSIDING GEOTEKNOLOGI LIPI*.