

Dampak Lingkungan dan Biaya Siklus Hidup PLTA Berskala Besar

Aida Nurfaida Nur¹ Nugroho Adi Sasongko² M Sidik Boedoyo³

Program Studi Ketahanan Energi, Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan
Republik Indonesia, Kota Jakarta Pusat, Provinsi DKI Jakarta, Indonesia^{1,2,3}

Email: idthanur99@gmail.com¹ nugroho.sasongko@idu.ac.id² mohammad.boedoyo@idu.ac.id³

Abstrak

Pemanfaatan sumber daya air sebagai sumber energi primer terbarukan dapat dimanfaatkan secara sinergis untuk banyak manfaat. PLTA merupakan sumber energi terbarukan yang cadangannya besar di Indonesia. Pada prinsipnya, semua kegiatan pembangunan memiliki dampak lingkungan berupa dampak positif (menguntungkan) dan dampak negatif (merugikan) sehingga butuh analisis terhadap dampak lingkungan dan juga biaya siklus hidup. Tulisan ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan dan biaya siklus hidup pada pembangkit listrik tenaga air dengan menggunakan metode kajian pustaka/literature review untuk mencapai kesimpulan perihal dampak lingkungan yang mungkin terjadi dan biaya siklus hidup yang dibutuhkan sebuah pembangkit listrik tenaga air. Interaksi antara lokasi proyek pembangkit listrik tenaga air dan kawasan lingkungan menunjukkan bahwa pembangunan proyek pembangkit listrik tenaga air mungkin berdampak buruk terhadap habitat tertentu yang penting, dan dampaknya mungkin memburuk di masa depan. Dengan melakukan perencanaan biaya siklus hidup sebelum diadakannya sebuah PLTA maka biaya- biaya yang akan dikeluarkan menjadi terarah.

Kata Kunci: PLTA, Sumber Daya Air, Dampak Lingkungan, Biaya Siklus Hidup,



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan faktor yang sangat penting dalam pembangunan suatu bangsa. Penggunaan energi listrik yang benar merupakan alat yang efektif untuk mempercepat pertumbuhan ekonomi negara (Yanto & Hadi, 2016). Oleh karena itu, dapat dipahami bahwa permintaan pembangkit tenaga listrik akhir-akhir ini meningkat di negara-negara di seluruh dunia. Dalam Executive Summary: Sumber Energi Alternatif Menuju Ketahanan Energi Nasional, Lemhanas (Lembaga Pertahanan Nasional) mengindikasikan bahwa pada tahun 2006 kebutuhan listrik dunia diproyeksikan meningkat dari 14,275 miliar watt pada tahun 2002 meningkat tajam menjadi 26,018 miliar watt pada tahun 2025, dengan sebagian besar sumber tersebut untuk energi listrik yang akan digunakan diperoleh dari batubara (hampir 40%), diikuti oleh gas yang trennya sedang naik. Permintaan energi di Asia diperkirakan akan meningkat dua kali lipat dalam 23 tahun (2002-2025) (Ratnata et al., 2013) (Sudiby, 2023).

Indonesia memiliki jumlah air permukaan terbesar kelima di dunia sehingga peluang perluasan PLTA di Indonesia masih besar, apalagi Indonesia masih kesulitan ketersediaan bahan bakar minyak (BBM). Pemanfaatan sumber daya air sebagai sumber energi primer terbarukan dapat dimanfaatkan secara sinergis untuk meningkatkan ketahanan pangan. Selain itu, PLTA juga termasuk pembangkit listrik yang tidak menghasilkan karbon dioksida (Novitasari et al., 2023). Ada yang berpendapat bahwa peningkatan karbon dioksida di atmosfer disebabkan oleh pembangunan bendungan dan pengoperasian waduk seperti halnya pembangkit tenaga fosil (Sindang et al., 2022). Oleh karena itu, diharapkan pada target energi 10.000 MW mendatang, 7.000 diantaranya berasal dari PLTA.

PLTA merupakan salah satu teknologi ET yang bersih dan matang di antara teknologi ET lainnya yang memiliki potensi luar biasa secara global. Pada tahun 2020, Pembangkit Listrik Tenaga Air menyumbang 58,3% dari total ET lain di sektor pembangkitan. Sektor rumah tangga

merupakan permintaan listrik terbesar, diikuti oleh industri dan bisnis. Peningkatan yang terjadi pada tahun 2011 dibandingkan tahun 2020 sebesar 54,3% (Quaranta & Muntean, 2023). Pada tahun 2011, total kebutuhan listrik mencapai 156.289 GWh; pada tahun 2020, permintaan mencapai 241,41 GWh. Untuk memenuhi permintaan tersebut, kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia terus meningkat. Pembangkit listrik tenaga uap-batubara mendominasi pasokan listrik dengan 52% dari total kapasitas pembangkit pada tahun 2020 (Hanafi & Riman, 2015).

Pada pembangkit listrik tenaga air (Hydroelectric System), turbin merupakan peralatan utama bersama dengan generator. Sistem operasinya terdiri dari penggunaan air yang mengalir dari sungai, yang kemudian diarahkan ke bendungan, yang kemudian melewati rangkaian pipa sehingga energi potensial air diubah menjadi energi kinetik yang nantinya dapat diubah kembali ke energi mekanik untuk menggerakkan atau memutar turbin, sehingga generator berputar pada sumbu yang sama dengan turbin, setelah itu terjadi induksi elektromagnetik, menghasilkan energi listrik (Hidayat, 2019). Menurut kondisi alamnya, pengembangan PLTA dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu: Tipe waduk dan tipe aliran langsung. Jenis waduk dapat berupa kolam dan telaga danau, sedangkan jenis aliran langsung dapat berupa aliran langsung sungai dan luapan dengan bendungan dangkal (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Beberapa manfaat PLTA adalah:

- Masa pakai lebih dari 50 tahun dan dapat diperpanjang lagi dengan pembaharuan karena PLTA merupakan jenis energi terbarukan.
- Efisiensi bisa lebih dari 90%. Selain menggantikan energi panas, peran PLTA dalam jaringan listrik juga dapat berperan sebagai pembawa beban puncak, karena dapat dengan cepat mengikuti perubahan beban tanpa mengorbankan efisiensi (Mamberamo et al., 2015).

Meskipun PLTA memiliki banyak manfaat, akan membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mewujudkan manfaat tersebut jika pertimbangannya hanya berdasarkan pertumbuhan. Namun, potensi tersebut dapat segera dimanfaatkan jika dikembangkan industri padat energi di daerah tersebut. Hal ini sejalan dengan kebijakan pembangunan CTI pemerintah. Keterlibatan pihak swasta dalam investasi industri padat energi dan PLTA juga harus didukung dengan pemberian fasilitas dan insentif (Mamberamo et al., 2015).

Tabel-1. Potensi Energi Primer di Indonesia Berdasarkan RUEN Tahun 2017
Satuan: MTOE

Energi	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2040	2050
Panas Bumi	2.6	3.5	4.4	5.5	6.8	8.9	21.8	28	42.7	58.8
	13.0%	15.3%	17.4%	18.9%	20.7%	23.0%	23.6%	21.5%	20.1%	18.6%
Air	6.9	6.9	7.0	7.3	7.5	7.8	24.9	29.3	39.7	55.3
	33.8%	30.4%	27.6%	25.1%	22.7%	20.2%	27.0%	22.4%	18.75%	17,5%
Minihidro dan Mikrohidro	0.3	0.3	0.5	0.8	1.1	1.6	5.2	6.2	8.0	10.2
	1.3%	1.4%	1.8%	2.7%	3.4%	4.1%	5.7%	4.8%	3.8%	3.2%
Bioenergi	10.4	11.9	13.3	15.0	16.8	19.1	33.8	49.8	83.0	124.2
	51.5%	52.4%	52.1%	51.5%	50.9%	49.6%	36.6%	38.2%	39.0%	39.3%
Surya	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	4.3	9.1	18.5	29.6
	0.4%	0.5%	0.8%	1.1%	1.4%	1.9%	5.2%	7.7%	8.7%	9.4%
Angin	0	0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.8	6.7	16.4	27.6
	0%	0%	0%	0%	0%	1.2%	1.9%	5.2%	7.7%	8.7%
EBT Lainnya	0	0	0	0	0	0	0.5	1.3	4.3	9.9
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.5%	1%	2%	3.1%
Total	20.3	22.8	25.5	29	32.9	38.5	92.2	130.5	212.6	315.7
Listrik	11.6	12.9	14.6	16.8	19.3	23.3	69.2	98.4	160.4	236.3

Bahan bakar	8.7	9.9	10.9	12.2	13.6	15.2	23	32.1	52.2	79.4
-------------	-----	-----	------	------	------	------	----	------	------	------

Selama lebih dari satu dekade, pemerintah Indonesia telah berupaya mengurangi emisi CO₂ dari pembangkit listrik. Pada tahun 2015, Indonesia memiliki komitmen pada Nationally Recognized Contribution (NDC) untuk menanggapi konferensi United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) ke-21. Di dalamnya termasuk rencana untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 29% dalam skenario (Business-as-usual) dan sebesar 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030. Untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di sektor ketenagalistrikan, Indonesia memiliki energi baru dan terbarukan (EBT). Menurut Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), target energi primer gabungan minimal 23 persen pada tahun 2025 dan 31 persen pada tahun 2050. Sementara itu, pada tahun 2021, pemerintah Indonesia mencanangkan program net-zero emission/carbon neutrality yang lebih ambisius pada tahun 2060. Pada tahun 2014, Indonesia menjadi negara terbesar ke-7 untuk sumber air terbarukan (Hanafi & Riman, 2015).

Tahun 2020 menjadi tahun yang sulit bagi dunia akibat pandemi Covid-19. Upaya pengurangan emisi gas rumah kaca dan untuk pemulihan ekonomi akibat pandemi Covid-19 masih sangat terbatas. Hal ini memang sangat penting, karena intervensi pemerintah yang cepat diperlukan untuk menghindari eskalasi kerusakan ekonomi yang dapat menambah tragedi kemanusiaan yang sudah serius. Selain itu, rencana pemulihan ekonomi dengan sistem ekonomi hijau dapat menciptakan masa depan ekonomi yang baik bagi negara dan negara lain (Lahcen et al., 2020).

UNEP 2011 menyatakan bahwa ekonomi hijau adalah sistem ekonomi yang meningkatkan kesejahteraan dan kesetaraan sosial manusia dan secara signifikan mengurangi risiko lingkungan dan kelangkaan ekologis. Dalam ekonomi hijau, pertumbuhan pendapatan dan pekerjaan didorong oleh investasi publik dan swasta yang mengurangi emisi karbon dan polusi, meningkatkan efisiensi energi dan sumber daya, serta mencegah hilangnya keanekaragaman hayati dan ekosistem. Oleh karena itu, pengembangan energi baru terbarukan harus dikembangkan sesuai dengan konsep green economy (Nasriyah et al., 2022). Pengembangan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dianggap sebagai sumber energi yang kompetitif dalam arti ekonomi hijau, oleh karena itu studi ini mengkaji dampak lingkungan dan siklus biaya hidup pembangkit listrik tenaga air besar sebagai bantuan implementasi tentang ekonomi hijau.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam artikel ini yaitu metode kualitatif dengan pendekatan studi literatur. Kajian pustaka merupakan penelitian yang dilakukan oleh peneliti dengan mengumpulkan beberapa buku dan majalah yang berkaitan dengan masalah dan tujuan penelitian. Teknik ini mengungkap berbagai teori yang relevan dengan permasalahan yang dihadapi/diteliti sebagai bahan acuan dalam pembahasan hasil penelitian. Tinjauan literatur dapat dilakukan dari beberapa sumber, seperti jurnal nasional dan internasional, dan buku teks atau buku pegangan yang relevan tentang penelitian dampak lingkungan dan siklus biaya hidup dari pembangkit listrik tenaga air berskala besar.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Potensi PLTA Skala Besar di Indonesia

Tenaga air berkontribusi dalam mencapai target energi terbarukan dan mendukung keamanan pasokan air/energi. Di sisi lain, tenaga air ikut bertanggung jawab atas kerusakan ekosistem, terutama ketika penghalang menghalangi aliran sungai alami dengan konsekuensi

ekologis, hidrologis dan morfologis(Fakhriansyah et al., 2022). Reservoir tenaga air dapat menyebabkan emisi metana dan karbon akibat dekomposisi bahan organik. Oleh karena itu, standar yang ketat dan undang-undang terkait telah diberlakukan untuk melindungi ekosistem dan lingkungan, yang berarti bahwa pembangunan pembangkit listrik tenaga air baru harus memenuhi persyaratan keberlanjutan yang tinggi, dan solusi yang lebih ramah lingkungan harus dipenuhi(Ratnata et al., 2013). Potensi tenaga air Indonesia diperkirakan mencapai 74,9 GW yang tersebar di seluruh Indonesia. Sepertiga dari potensi tenaga air ada di Irian Jaya dan sebagian besar di Kalimantan dan Sumatera. Apabila dibandingkan dengan energi terbarukan yang lain, PLTA merupakan sumber energi terbarukan yang cadangannya besar di Asia Tenggara. Oleh karena itu, pengembangan pemanfaatan sumber daya tenaga air akan mengurangi kekurangan pasokan energi dan pencemaran lingkungan di negara-negara Asia Tenggara termasuk Indonesia(Hanafi & Riman, 2015). Sampai saat ini pemanfaatan PLTA untuk PLTA kurang lebih 5,3% atau 3.529 MW, atau 14,2 persen dari total daya yang dihasilkan oleh PT PLN, yang digunakan(Mamberamo et al., 2015). Sebagai perbandingan, potensi pembangkit listrik tenaga air di negara-negara bekas Uni Soviet yang dikenal dengan Commonwealth of Independent States (CIS) adalah sebesar 98.000 MW dengan total sekitar 500 bendungan, dengan total kapasitas pembangkit listrik tenaga air sebesar 66.000 MW atau sekitar 67 persen dari total kapasitas pembangkit listrik tenaga air serta potensi yang ada(Quaranta & Muntean, 2023). Dengan tingkat utilisasi yang rendah ini, pengembangan ke depan harus ditingkatkan dengan mengembangkan proyek terpadu untuk berbagai tujuan, tidak hanya PLTA.

Analisis Dampak Lingkungan

Pada prinsipnya, semua kegiatan pembangunan memiliki dampak lingkungan berupa dampak positif (menguntungkan) dan dampak negatif (merugikan). Menurut (UU No. 32 Tahun 2009), lingkungan hidup adalah kesatuan ruang dengan semua benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup, termasuk manusia dan perilakunya, yang mempengaruhi alam itu sendiri, kelangsungan hidup, dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lainnya(Doni Prasetyo & Alimuddin, 2018). Studi di belahan dunia lain juga menunjukkan bahwa jumlah proyek yang lebih tinggi atau kapasitas proyek yang lebih besar di area sensitif lingkungan memiliki dampak merugikan yang lebih tinggi di area tersebut. Selain itu, jumlah dan kapasitas proyek pembangkit listrik tenaga air di kawasan keanekaragaman hayati akan meningkat seiring dengan semakin banyaknya proyek yang diajukan(Sudiby, 2023). Interaksi antara lokasi proyek pembangkit listrik tenaga air dan kawasan lingkungan terestrial yang sensitif menunjukkan bahwa pembangunan proyek pembangkit listrik tenaga air mungkin berdampak buruk terhadap habitat terestrial yang penting, dan dampaknya mungkin memburuk di masa depan. Ini juga memberikan gagasan tentang daerah yang sangat terpengaruh dan habitat darat yang penting dengan menyediakan distribusi relatif dari proyek dan kapasitas pembangkit listrik tenaga air(Ghimire & Phuyal, 2022). Berikut disajikan tabel perbandingan dari berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan lokasi dan metode yang berbeda.

Tabel-2. Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Analisis Dampak Lingkungan

Penulis	Judul	Lingkup penelitian	Metode	Hasil Penelitian
Emanuele Quaranta, Maria Dolores Bejarano, Claudio Comoglio, Juan	Wasted and excess energy in the hydropower sector: A European assessment of	Eksplorasi SustHydro di bawah proyek Water4EU di Pusat Penelitian	Digitalization, information, communication and real-time control (DICC) di sektor PLTA untuk	Dalam jaringan distribusi air DICC memungkinkan untuk mengurangi kebocoran dan untuk mengontrol tekanan pada node hidrolik, dan dalam jaringan saluran

Francisco Fuentes-Pérez, Juan Ignacio Pérez-Díaz, Francisco Javier Sanz-Ronda, Martin Schletterer, Marcell Szabo-Meszaros, Jeffrey A. Tuhtan	tailrace hydrokinetic potential, degassing-methane capture and waste-heat recovery. (Quaranta et al., 2023)	Bersama Komisi Eropa.	peningkatan efisiensi di sektor Operasi dan Pemeliharaan.	pembuangan gabungan DICC memungkinkan untuk mengurangi luapan saluran pembuangan.
Doni Prasetyo, dan Alimuddin	Kajian Dampak Lingkungan Terhadap Proyek Konstruksi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (Pltm) Pongkor (Doni Prasetyo & Alimuddin, 2018)	Sungai Cikaniki, PT ANTAM	Metode observasi dan metode skala dalam menganalisis dampak yang ditimbulkan selama konstruksi.	Komponen fisik kimia seperti kualitas udara, kualitas air permukaan, kebisingan terus dipantau agar meminimalisir dampak dengan mengacu terhadap aturan tolak ukur yang telah ditetapkan agar konstruksi yang ramah lingkungan dapat terwujud.
Ehsan Inam Ullah, Shakil Ahmad, Muhammad Fahim Khokhar, Muhammad Azmat, Umer Khayyam, Faizan ur Rehman Qaiser.	Hydrological and ecological impacts of run off river scheme; a case study of Ghazi Barotha hydropower project on Indus River, Pakistan.(Inam Ullah et al., 2023)	Pembangkit Listrik Tenaga Air Ghazi Barotha, di provinsi Khyber Pakhtunkhwa di Pakistan.	Daerah studi diklasifikasikan ke dalam kelas utama berikut: Pertanian (termasuk tanaman musim panas dan musim dingin), tanah kosong, vegetasi (termasuk rerumputan, semak dan pohon), dan air.	Tingkat air tanah turun hingga 50%. Area pertanian berkurang masing-masing sebesar 1,69% dan 9,11% selama musim panas dan musim dingin, sedangkan lahan di bawah tanah kosong meningkat.
Hemant R Ghimire, Sunita Phuyal.	Spatiotemporal analysis of hydropower projects with terrestrially sensitive areas of Nepal (Ghimire & Phuyal, 2022)	Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Air Nepal, yang terletak di wilayah Himalaya Tengah,	Perangkat lunak Arc Map 10.3 GIS untuk analisis spasial. Peta diubah menjadi UTM 84 yang dimodifikasi	Proyek PLTA berinteraksi dengan lebih dari separuh kawasan keanekaragaman hayati di Nepal, dan proyek pembangkit listrik tenaga air yang memiliki kapasitas lebih dari lima ribu megawatt sepenuhnya berada di dalam kawasan keanekaragaman hayati.
Jessica Hanafi and Anthony Riman	Life cycle assessment of a mini hydro power plant in Indonesia: A case study in Karai River (Hanafi & Riman, 2015)	Sungai Karai, Simalungun, Sumatera Utara	Penilaian dampak dilakukan dengan menggunakan metodologi baseline CML-IA.	Dalam tahap konstruksi, tahap pembangunan jalur pipa cepat merupakan sumber utama dampak lingkungan.

Pembangunan proyek pembangkit listrik tenaga air di habitat kritis dapat berdampak parah pada keanekaragaman hayati, sehingga pembangunan harus direncanakan dengan hati-hati, dan kebijakan harus dibentuk untuk menghindari kawasan yang kritis sebanyak mungkin. Dalam hal pengembangan proyek pembangkit listrik tenaga air, rencana pengelolaan keanekaragaman hayati terestrial yang sesuai harus disertakan dalam studi lingkungan proyek pembangkit listrik tenaga air dan diterapkan secara ketat untuk meminimalkan ancaman (Novitasari et al., 2023). Selain itu, penelitian tentang bagaimana integritas ekologis dan pembangunan ekonomi dapat diseimbangkan untuk pengembangan proyek pembangkit listrik tenaga air baiknya dilakukan (Song et al., 2016). Demikian pula, studi lebih lanjut harus dilakukan untuk mengukur dampak proyek pembangkit listrik tenaga air terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati (Inam Ullah et al., 2023). Pengembangan proyek pembangkit listrik tenaga air saat ini telah banyak berkembang mengingat potensi air yang dimiliki Indonesia, sehingga penelitian tentang dampak proyek pembangkit listrik tenaga air terhadap keanekaragaman hayati terestrial dan mitigasinya sangat penting, bersamaan dengan peningkatan penilaian kualitas lingkungan dari proyek pembangkit listrik tenaga air untuk meminimalkan ancaman tersebut.

Analisis Biaya Siklus Hidup

Life Cycle Cost Analysis (LCA) adalah analisis yang mempertimbangkan aspek lingkungan dan kemungkinan efek yang terkait dengan suatu produk dengan memeriksa daftar input dan output dari keseluruhan sistem, efek lingkungan yang terkait dengan input dan output tersebut, dan akhirnya menentukan keberlanjutan dari produk. Analisis lingkungan ini terkait dengan siklus hidup produk dimulai dengan pemilihan bahan dan diakhiri dengan pembuangan akhir (Sayed & Sawant, 2015). Total cost of ownership (biaya kepemilikan keseluruhan) yang mencakup semua biaya yang terkait dengan suatu produk atau sistem selama masa pakainya. Ini mencakup biaya produksi, operasional, perawatan, dan pembuangan (Tanasa et al., 2020).

Biaya modal adalah biaya yang dikeluarkan untuk membeli, mengangkut, menangani, dan membangun/memasang komponen tenaga listrik. Biaya siklus hidup adalah metode untuk meminimalkan biaya dan mewujudkan manfaat jangka panjang melalui analisis aset terkini. Arus kas adalah biaya yang terkait dengan penggunaan, pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian komponen daya (Manurung & Boedoyo, 2022). Potensi arus kas dari penghematan biaya energi operasional karena kinerja komponen energi. Biaya operasi terdiri dari biaya sumber daya, yaitu energi, air, tenaga kerja dan bahan kimia yang diperlukan untuk mengoperasikan komponen daya. Biaya perawatan terdiri dari perawatan preventif, seperti Pelumasan bagian mekanik, pembersihan, pemeriksaan rutin sambungan, pemantauan pengoperasian komponen daya yang benar dan pencatatan kinerja secara teratur sebagai pemeriksaan kinerja (Pérez-Díaz & Wilhelmi, 2010). Jika terjadi kegagalan, ketika komponen hijau tidak dapat diperbaiki secara ekonomis, diperlukan prosedur penggantian. Penggantian suku cadang kecil pada BMP dipertimbangkan dalam pekerjaan pemeliharaan sipil dan listrik dan mekanik tahunan (Liun, 2016). Biaya siklus hidup (LCC) diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$LCC = A + BP + BPN \text{ (Sayed \& Sawant, 2015)}$$

Dimana:

(LCC) Life Cycle Cost : Biaya Siklus Hidup

A (Biaya investasi) : biaya awal yang dikeluarkan untuk pembelian komponen-komponen PLTA, biaya instalasi dan biaya lainnya misalnya biaya untuk turbin.

BP (Biaya pemeliharaan): Biaya nilai sekarang untuk total biaya pemeliharaan dan operasional selama n tahun atau sepanjang umur pembangkit.

BPN (Biaya penggantian): Biaya nilai sekarang untuk biaya penggantian yang harus dikeluarkan selama umur pembangkit.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, berikut disajikan beberapa metode yang berbeda dan dengan lokasi yang berbeda.

Tabel-3. Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Analisis Biaya Siklus Hidup

Penulis	Judul	Lingkup penelitian	Metode	Hasil Penelitian
Ignacio Guisández, Juan.Pérez-Díaz, José.Wilhelmi	Assessment of the economic impact of environmental constraints on short-term hydropower plant operation (Pérez-Díaz & Wilhelmi, 2010)	Short-term hydropower plant operation, pembangkit listrik tenaga air, yang terletak di daerah barat laut Spanyol	pemrograman linear bilangan bulat campuran	efek ekonomi dari pembatasan lantai aliran ekologi adalah fungsi linear dari lantai aliran ekologi; sedangkan dampak finansial dari batasan laju maksimum adalah fungsi parabola dari laju ramping dan meningkat tajam ketika besarnya batasan di bawah nilai tertentu.
C. Tanasa, D. Dan, C.Becchio, S.P. Corgnati, V. Stoian	Cost-optimal and indoor environmental quality assessment for residential buildings towards EU long-term climate targets (Tanasa et al., 2020)	bangunan semi-terpisah seluas 140 m2, dibangun di dekat kota Timisoara di Rumania sebagai proyek percontohan	Biaya dibagi menjadi: membangun sistem struktural, insulasi termal, jendela, sistem teknis. Selanjutnya, biaya ini diadaptasi agar sesuai dengan masing-masing paket efisiensi energi lainnya.	Biaya energi menurun secara proporsional dengan konsumsi energi, artinya paket bangunan dengan konsumsi energi terendah dari jaringan, biaya energinya paling rendah.
Shagufta Sajid Mumtaaz Sayed, Priyadarshi H. Sawant	Life-cycle cost and financial analysis of energy components in mass housing projects - A case project in sub-urban India (Sayed & Sawant, 2015)	Sektor perumahan perkotaan perumahan di Mumbai, India. Aplikasi fotovoltaik surya untuk energi berkelanjutan.	membandingkan total biaya siklus hidup rumah standar dengan rumah hemat energi dan konvensional dengan perlengkapan yang efisien.	Dalam kasus pabrik bio-metanas, bagian biaya operasi tertinggi karena biaya tenaga kerja adalah 57,57% dari biaya siklus hidup kumulatif. Biaya pemeliharaan pekerjaan kelistrikan dan pemipaan minimal untuk aplikasi tenaga surya (SPP dan SWH = 10,91% dan SSL = 23,32%) termasuk biaya tenaga kerja.
Elanda Fikri, P. Purwanto,, Henna Rya Sunnoko	Kajian siklus hidup pilihan pengelolaan limbah berbahaya rumah tangga untuk Kota Semarang, Indonesia(Novitasari et al., 2023)	Pusat limbah industri di kota Semarang, Indonesia	Metodologi LCA digunakan untuk melakukan perbandingan lingkungan dari skenario alternatif dengan sistem HHWM saat ini.	skenario 2 menunjukkan skenario terbaik berdasarkan dampak lingkungan (GRK) dan biaya pengelolaan limbah. Walaupun skenario kedua membutuhkan

				biaya investasi yang cukup mahal di awal.
Edwaren Liun	Perhitungan Biaya Eksternal Pembangkit Listrik Dengan Model <i>Simpacts</i> (Liun, 2016)	PLTU Suralaya	perhitungan melibatkan persamaan konsentrasi, <i>depletion factor</i> , model dispersi, dan penggunaan tabel data ERF, parameter ekonomi yang terkait dengan GDP penduduk terkena dampak.	Sumbangan dari NOX lebih bersifat polutan sekunder yang dihasilkan dari reaksi NO menjadi NO2 dan berikutan nitrat pada penghujung rantai reaksi dan umur polutan.

Hasil penelitian yang telah dilakukan peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa metode LCA secara umum digunakan untuk mengetahui biaya siklus hidup berdasarkan siklus lingkungan yang diperoleh (Tanasa et al., 2020). Penentuan biaya siklus hidup menjadi hal yang sangat penting dalam sebuah rencana pembangunan suatu proyek dalam hal ini kasus PLTA, apalagi jika berbicara perihal PLTA berskala besar yang dari segi lingkungan dan ekonomi harus dipertimbangkan dengan baik. Dengan melakukan perencanaan biaya siklus hidup sebelum diadakannya sebuah PLTA maka biaya-biaya yang akan dikeluarkan menjadi terarah, dengan terarahnya biaya, maka pemeliharaan tidak akan menjadi kendala dimana biaya pemeliharaan dalam suatu proyek itu menjadi tulang punggung bertahan nya sebuah proyek dalam hal ini PLTA. Biaya siklus hidup PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) meliputi biaya konstruksi, pemeliharaan operasi, dan penggantian peralatan yang telah rusak atau usang. Menurut Studi yang dilakukan oleh PT PLN (Persero), biaya siklus hidup PLTA terdiri dari:

1. Biaya Konstruksi: biaya ini terdiri dari biaya perencanaan, desain, konstruksi bangunan, instalasi peralatan listrik, pembangunan jalan, dan infrastruktur akses, dan biaya lainnya seperti biaya tanah, biaya pengadaan bahan, dan peralatan, dan biaya tenaga kerja. Biaya konstruksi dapat mencapai ratusan juta hingga triliunan rupiah, tergantung pada ukuran dan kapasitas PLTA.
2. Biaya Pemeliharaan: Biaya ini terdiri dari pemeliharaan dan perawatan bendungan, pengoperasian dan perawatan pintu air, perbaikan dan penggantian peralatan infrastruktur, pemeliharaan dan pengembangan vegetasi, pemantauan lingkungan, dan kualitas air, dan biaya operasional lainnya. Biaya pemeliharaan biasanya mencapai beberapa persen dari biaya konstruksi.
3. Biaya Operasional: biaya ini untuk menjalankan PLTA seperti biaya bahan bakar, biaya listrik, biaya pengelolaan sumber daya manusia, biaya administrasi dan pengendalian, dan biaya lainnya. Biaya Operasi biasanya cukup signifikan tergantung kapasitas dan efisiensi PLTA.
4. Biaya Penggantian: biaya ini terdiri dari biaya penggantian peralatan dan infrastruktur yang telah rusak atau usang, atau peralatan yang perlu ditingkatkan atau diperbarui. Biaya penggantian akan bervariasi tergantung pada kebutuhan dan kondisi PLTA (Tanasa et al., 2020).

Biaya pembangunan dan operasional sebuah waduk dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dapat ditentukan oleh beberapa faktor yang meliputi:

1. Ukuran dan kapasitas: Biaya pembangunan dan operasional sebuah waduk dan PLTA akan tergantung pada ukuran dan kapasitasnya. Waduk yang lebih besar dan PLTA dengan kapasitas yang lebih tinggi biasanya memerlukan investasi yang lebih besar. Sebagai contoh, waduk Cirata dan waduk Jatiluhur yang merupakan waduk pembangkit listrik tenaga air merupakan 2 waduk yang berbeda ukurannya sehingga kapasitas listrik yang terpasang juga

berbeda. Waduk Cirata yang merupakan waduk terbesar di Indonesia dengan biaya pembangunan ±250M dan kapasitas yang terpasang mencapai 1000 MW (Hasannuddin et al., 2019).

2. Desain dan konstruksi: biaya juga dipengaruhi oleh desain dan konstruksi waduk dan PLTA. Faktor seperti tipe konstruksi, material yang digunakan, dan teknologi yang diterapkan akan mempengaruhi biaya keseluruhan proyek.
3. Kondisi geografis dan lingkungan: jika proyek waduk dan PLTA berlokasi di daerah yang sulit diakses atau memiliki kondisi geografis yang kompleks, biaya pembangunan dan operasional dapat lebih tinggi. Selain itu, jika ada kebutuhan khusus untuk perlindungan lingkungan dan mitigasi dampak, biaya tambahan juga mungkin diperlukan.
4. Analisis ekonomi: penentuan biaya juga melibatkan analisis ekonomi yang komprehensif. Ini mencakup perkiraan pendapatan yang dihasilkan dari penjualan energi listrik yang dihasilkan PLTA, biaya produksi, dan tingkat pengembalian investasi yang diharapkan.
5. Infrastruktur pendukung: biaya pembangunan waduk dan PLTA juga dapat dipengaruhi oleh kebutuhan infrastruktur pendukung seperti jalan akses, sistem transportasi, dan fasilitas pendukung lainnya (Yanto & Hadi, 2016).

Biaya perencanaan waduk dan PLTA di Indonesia tergantung pada beberapa faktor seperti kompleksitas proyek, lokasi geografis, serta kebijakan pemerintah dan biaya konsultan yang terlibat. Namun, dapat diperkirakan bahwa biaya perencanaan waduk Cirata cukup besar dibanding yang lainnya, mengingat skala dan kompleksitas proyek tersebut. Selain itu, manfaat energi dan air yang dihasilkan oleh waduk Cirata dapat memberikan dampak positif yang besar bagi masyarakat dan perekonomian secara keseluruhan. Secara umum, biaya operasional waduk dan PLTA di Indonesia mencakup biaya pemeliharaan peralatan, biaya listrik untuk mengoperasikan pompa dan peralatan lainnya, biaya untuk mengelola air, serta biaya untuk mengelola limbah dan dampak lingkungan. Biaya operasional waduk dan PLTA juga dapat bervariasi tergantung pada kebutuhan dan jenis operasi yang dilakukan. Sebagai contoh, jika waduk digunakan untuk tujuan produksi energi listrik, biaya operasional akan termasuk biaya bahan bakar dan biaya perawatan peralatan yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Sedangkan jika waduk digunakan untuk tujuan irigasi atau pengendalian banjir, biaya operasional akan lebih banyak terkait dengan pengelolaan air dan pemeliharaan struktur bendungan. Meskipun biaya operasional waduk Cirata cukup besar dibandingkan dengan yang lain, manfaat yang dihasilkan oleh waduk tersebut juga sangat signifikan. Waduk Cirata dapat memberikan pasokan energi yang andal dan terjangkau, serta air untuk irigasi dan pengendalian banjir yang penting bagi sebagian besar wilayah di Jawa Barat. Oleh karena itu, biaya operasional waduk Cirata harus dilihat sebagai investasi jangka panjang yang dapat memberikan manfaat besar bagi masyarakat dan perekonomian secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Pemanfaatan untuk PLTA kurang lebih 5,3% atau 3.529 MW, atau 14,2 persen dari total daya yang dihasilkan oleh PT PLN, yang digunakan. Hal ini menjadi alasan PLTA punya potensi yang besar diantara Teknologi terbarukan yang lain. Interaksi antara lokasi proyek pembangkit listrik tenaga air dan kawasan lingkungan menunjukkan bahwa pembangunan proyek pembangkit listrik tenaga air mungkin berdampak buruk terhadap habitat tertentu yang penting, dan dampaknya mungkin memburuk di masa depan. Ini juga memberikan gagasan tentang daerah yang sangat terpengaruh dan habitat darat yang penting dengan menyediakan distribusi relatif dari proyek dan kapasitas pembangkit listrik tenaga air. Penentuan biaya siklus hidup menjadi hal yang sangat penting dalam sebuah rencana pembangunan suatu proyek dalam hal ini kasus PLTA, apalagi jika berbicara perihal PLTA berskala besar yang dari

segi lingkungan dan ekonomi harus dipertimbangkan dengan baik. Dengan melakukan perencanaan biaya siklus hidup sebelum diadakannya sebuah PLTA maka biaya- biaya yang akan dikeluarkan menjadi terarah.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air. *Sni 8396:2019*, 11.
- Doni Prasetyo, & Alimuddin. (2018). Kajian Dampak Lingkungan Terhadap Proyek Konstruksi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (Pltm) Pongkor. *Badan Intelijen Negara*, 1–11.
- Fakhriansyah, M., Fathimahhayti, L. D., & Gunawan, S. (2022). Strategi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Mini/Mikro Hidro di Indonesia. *G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan*, 6(2), 295–305.
- Ghimire, H. R., & Phuyal, S. (2022). Spatiotemporal analysis of hydropower projects with terrestrial environmentally sensitive areas of Nepal. *Environmental Challenges*, 9(August), 100598. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100598>
- Hanafi, J., & Riman, A. (2015). Life cycle assessment of a mini hydro power plant in Indonesia: A case study in Karai River. *Procedia CIRP*, 29, 444–449. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.160>
- Hasannuddin, T., Maimun, M., Radhiah, R., & ... (2019). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Krueng Lhok Gob Desa Kumba Kabupaten Pidie Jaya. *Prosiding Seminar ...*, 3(1), 182–187. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/semnaspnl/article/view/1679%0Ahttp://e-jurnal.pnl.ac.id/index.php/semnaspnl/article/download/1679/1445>
- Hidayat, W. (2019). Prinsip kerja dan komponen - komponen pembangkit listrik tenaga air (PLTA). *Prinsip Kerja Dan Komponen - Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), March*, <https://osf.io/preprints/inarxiv/drv58/>. <https://doi.org/10.31227/osf.io/drv58>
- Inam Ullah, E., Ahmad, S., Khokhar, M. F., Azmat, M., Khayyam, U., & Qaiser, F. ur R. (2023). Hydrological and ecological impacts of run off river scheme; a case study of Ghazi Barotha hydropower project on Indus River, Pakistan. *Heliyon*, 9(1), e12659. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12659>
- Lahcen, B., Brusselaers, J., Vrancken, K., Dams, Y., Da Silva Paes, C., Eyckmans, J., & Rousseau, S. (2020). Green Recovery Policies for the COVID-19 Crisis: Modelling the Impact on the Economy and Greenhouse Gas Emissions. *Environmental and Resource Economics*, 76(4), 731–750. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00454-9>
- Liun, E. (2016). Perhitungan Biaya Eksternal Pembangkit Listrik Dengan Model Simpacts. *Digilib.Batan.Go.Id, March*. <https://digilib.batan.go.id/ppin/katalog/file/0853-9812-2012-307.pdf>
- Mamberamo, I., Ii, M., & Jaya, I. (2015). *Prospek Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Skala Besar Laporan Teknis Pebruari 1999 Direktorat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi Deputi Bidang Teknologi Informasi , Energi , Material dan Lingkungan. May*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1705.6161>
- Manurung, J. P., & Boedoyo, M. S. (2022). Life Cycle Assessment pada Solar Photovoltaics: Review. *Jurnal Penelitian Sains Teknologi*, 13(1), 20–27. <https://doi.org/10.23917/saintek.v13i1.560>
- Nasriyah, N., Malik, M., & Aji, S. (2022). Dampak Investasi Pembangunan Plta Batang Toru Terhadap Potensi Pemulihan Perekonomian Indonesia: Analisis Inter Regional Input-Output. *Parameter*, 7(14), 64. <https://doi.org/10.17632/jwkp8r58cd.1>
- Novitasari, D., Sarjiya, Hadi, S. P., Budiarto, R., & Deendarlianto. (2023). The climate and land-

- use changes impact on water availability for hydropower plants in Indonesia. *Energy Strategy Reviews*, 46(December 2022), 101043. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101043>
- Pérez-Díaz, J. I., & Wilhelmi, J. R. (2010). Assessment of the economic impact of environmental constraints on short-term hydropower plant operation. *Energy Policy*, 38(12), 7960–7970. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.020>
- Quaranta, E., Dolores, M., Comoglio, C., Fuentes-pérez, J. F., Pérez-díaz, J. I., Sanz-ronda, F. J., Schletterer, M., Szabo-meszaros, M., & Tuhtan, J. A. (2023). Digitalization and real-time control to mitigate environmental impacts along rivers : Focus on artificial barriers , hydropower systems and European priorities. *Science of the Total Environment*, 875(March), 162489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162489>
- Quaranta, E., & Muntean, S. (2023). Wasted and excess energy in the hydropower sector: A European assessment of tailrace hydrokinetic potential, degassing-methane capture and waste-heat recovery. *Applied Energy*, 329(June 2022), 120213. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120213>
- Ratnata, I. W., Surya S, W., & Somantri, M. (2013). Analisis Potensi Pembangkit Energi Listrik Tenaga Air Di Saluran Air Sekitar Universitas Pendidikan Indonesia. *FPTK Expo - UPI, November 2002*, 254–261.
- Sayed, S. S. M., & Sawant, P. H. (2015). Life-cycle cost and financial analysis of energy components in mass housing projects – A case project in sub-urban India. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 202–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.07.001>
- Sindang, K. C., Mukhlis, B., Arifin, Y., Maryantho, M., & Agustinus, K. (2022). Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Eksitasi Generator Sinkron Sf 33 . 065 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Poso 1 *Energy*. 393–397.
- Song, D., Yang, J., Chen, B., Hayat, T., & Alsaedi, A. (2016). Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. *Applied Energy*, 164, 916–923. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.003>
- Sudiby, H. (2023). *Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Dalam*. 5, 267–273.
- Tanasa, C., Dan, D., Becchio, C., Corgnati, S. P., & Stoian, V. (2020). Cost-optimal and indoor environmental quality assessment for residential buildings towards EU long-term climate targets. *Energy for Sustainable Development*, 59, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.09.002>
- Yanto, N. P., & Hadi, M. P. (2016). *Kajian Potensi Sumberdaya Air Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Kali Suci, Dusun Jetis, Semanu, Gunungkidul*. 1–9.