

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. PLN Nusantara Power UP Cirata merupakan salah satu unit pembangkitan terbesar milik negara yang beroperasi di bawah naungan PT. PLN (Persero). Terletak di Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat, pembangkit listrik tenaga air (PLTA) ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 1.008 MW, menjadikannya PLTA terbesar di Indonesia (Bagaskara *et al.*, 2024). Energi listrik yang dihasilkan oleh PT. PLN Nusantara Power UP Cirata didistribusikan ke pulau Jawa, Madura, dan Bali. Sebagai pembangkit energi terbarukan berskala besar, PT. PLN Nusantara Power UP Cirata memiliki posisi strategis dalam mendukung ketahanan pasokan listrik nasional.

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan salah satu metode pembangkitan tenaga listrik berbasis EBT (energi baru terbarukan). Dari segi fisik, dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh PLTA memiliki risiko dampak yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik yang masih menggunakan bahan bakar fosil. Penelitian yang dilakukan oleh Triatmojo *et al.* (2024) pada PLTU di Sumatera Selatan menunjukkan bahwa proses pembangkitan menghasilkan nilai dampak *Global Warming Potential* sebesar 13,3 kg CO₂ ek/kWh. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Kjeld *et al.* (2024) pada PLTA di Islandia menunjukkan bahwa proses pembangkitan menghasilkan nilai dampak *Global Warming Potential* sebesar $1,4 \times 10^{-4}$ kg CO₂ ek/kWh. Perbandingan nilai *Global Warming Potential* antara PLTA dan PLTU tersebut menggambarkan secara umum kecenderungan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh PLTU memiliki kontribusi dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan pembangkit energi terbarukan seperti PLTA.

Namun begitu, pada proses operasional PLTA tetap timbul dampak lingkungan dari kegiatan pemeliharaan pada proses operasional yang masih menggunakan material seperti oli dan pelumas yang belum sepenuhnya ramah lingkungan. Masih ada potensi timbulnya limbah yang memerlukan pengumpulan dan pengangkutan ke fasilitas pengolahan limbah yang secara tidak langsung dapat

menimbulkan emisi gas rumah kaca (Pant *et al.*, 2016). Dampak lain yang mungkin timbul adalah emisi Gas Rumah Kaca (GRK), khususnya metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), yang berasal dari dekomposisi biomassa organik di waduk yang tergenang (Syahrizal, 2021). Selama pembangkitan listrik, konsumsi air yang signifikan dapat berdampak pada ekosistem, terutama di daerah dengan kelangkaan air yang disebabkan oleh proses evaporasi dari waduk dapat secara substansial mengurangi ketersediaan air bagi ekosistem akuatik di hilir, karena jumlah air yang dilepaskan dari bendungan berkurang (Magne *et al.*, 2023). Maka dari itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh proses pembangkitan di PLTA.

Salah satu pendekatan kajian dampak yang dapat digunakan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA merupakan metode analisis berbasis data untuk menilai dampak lingkungan dari suatu sistem atau teknologi selama seluruh siklus hidupnya mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, transportasi, penggunaan, hingga pembuangan akhir (Jung *et al.*, 2022). Metode ini mengintegrasikan berbagai *input* dan *output* lingkungan, seperti penggunaan energi, emisi ke udara, air, serta limbah yang dihasilkan, sehingga mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai kontribusi suatu sistem terhadap berbagai kategori dampak lingkungan.

Meskipun metode *Life Cycle Assessment* (LCA) telah banyak diterapkan dalam berbagai penelitian untuk mengevaluasi dampak lingkungan pada sektor pembangkitan listrik, khususnya pembangkit berbasis energi fosil dan energi terbarukan, kajian yang secara spesifik membahas penerapan LCA pada pembangkit listrik tenaga air berskala besar di Indonesia masih terbatas. Hingga saat ini, belum ditemukan penelitian yang secara khusus mengkaji potensi dampak lingkungan menggunakan pendekatan LCA pada PT PLN Nusantara Power UP Cirata. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada identifikasi dan kuantifikasi dampak lingkungan, tanpa dilanjutkan dengan penyusunan rekomendasi program penurunan dampak yang berbasis pada hasil analisis *hotspot*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah penelitian (*research gap*) tersebut dengan melakukan analisis dampak lingkungan

berbasis LCA pada PT PLN Nusantara Power UP Cirata, sekaligus merumuskan alternatif program penurunan dampak lingkungan yang aplikatif. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengelola pembangkit dalam meningkatkan kinerja lingkungan, serta memperkaya kajian LCA pada sektor pembangkit listrik tenaga air di Indonesia.

Penelitian akan berfokus pada lingkup *Cradle-to-gate* (proses hulu dan inti proses). *Cradle-to-gate* mencakup tahapan ekstraksi bahan baku (*cradle*) hingga produk keluar dari pabrik (*gate*). Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Kjeld *et al.* (2024) menggunakan lingkup *cradle-to-gate* dengan membatasi analisis sampai energi listrik keluar dari sistem pembangkit agar kajian lebih spesifik terhadap kinerja lingkungan operasional pembangkit. Pendekatan ini lebih mampu merepresentasikan kondisi operasional aktual PLTA yang berlangsung secara rutin dan kontinu dibanding fase lainnya yang bersifat temporer, seperti pada fase konstruksi. Selain itu, data inventori pada fase operasional cenderung lebih tersedia, terukur, dan terdokumentasi dengan baik dalam aktivitas perusahaan, sehingga hasil analisis LCA dapat menggambarkan kontribusi dampak lingkungan secara lebih spesifik dan relevan terhadap kondisi eksisting operasional pembangkit.

Metode LCA ini dapat menganalisis berbagai kategori dampak lingkungan. Pada penelitian ini akan berfokus pada empat kategori dampak, yaitu *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), dan *Ozone Depletion Potential* (ODP). Berdasarkan Buku Pedoman Penyusunan Kajian Life Cycle Assessment (LCA) yang diterbitkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, ke-4 kategori dampak ini merupakan kategori dampak yang wajib dikaji. Kategori dampak yang dipilih dinilai mampu untuk menggambarkan isu lingkungan utama yang umum dikaji pada sektor energi dan pembangkit listrik.

Dari dampak lingkungan yang didapat, dilanjutkan dengan analisis isu penting (*hotspot*). Isu penting inilah yang akan menjadi dasar penentuan alternatif solusi yang lebih tepat sasaran dan efektif untuk menurunkan dampak lingkungan, baik melalui efisiensi proses, substitusi material, atau penerapan teknologi bersih. Dengan diterapkannya solusi yang tepat berdasarkan kajian LCA, PT PLN

Nusantara Power UP Cirata dapat menjadi industri pembangkit listrik yang berkelanjutan, ramah lingkungan dan turut serta dalam pencapaian target nasional untuk pengurangan emisi dan transisi energi bersih.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan pada kajian ini dirumuskan dalam bentuk pertanyaan penelitian (*research question*) sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi dampak lingkungan pada lingkup *Cradle-to-gate* (proses hulu dan proses inti) di PT PLN Nusantara Power UP Cirata, Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat?
2. Apa isu penting (*hotspot*) yang ditemukan pada lingkup *Cradle-to-gate* di PT PLN Nusantara Power UP Cirata, Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat?
3. Bagaimana solusi prioritas untuk reduksi dampak lingkungan berdasarkan isu penting (*hotspot*) di PT PLN Nusantara Power UP Cirata, Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka dapat diketahui tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menghitung potensi dampak lingkungan dengan kategori dampak *Global Warming Potential*, *Acidification Potential*, *Eutrophication Potential* dan *Ozone Depletion Potential*.
2. Mengidentifikasi isu penting (*hotspot*) di PT. PLN Nusantara Power UP Cirata.
3. Mendapatkan solusi prioritas untuk reduksi dampak lingkungan berdasarkan isu penting (*hotspot*) di PT. PLN Nusantara Power UP Cirata menggunakan analisis AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Bagi Peneliti

Manfaat penelitian ini bagi peneliti adalah mengembangkan pengetahuan dan keterampilan analisis lingkungan melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), khususnya dalam sektor industri pembangkit listrik tenaga air serta mengasah kemampuan menyusun rekomendasi berbasis data ilmiah. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi akademik dan dasar untuk studi lanjutan di bidang energi terbarukan dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan.

2. Bagi Perusahaan

Manfaat bagi perusahaan adalah mengetahui apa isu penting (*hotspot*) yang ada pada proses pembangkitan listrik untuk merancang strategi pengurangan dampak lingkungan yang lebih efektif sehingga dapat menjadi industri pembangkit listrik yang berkelanjutan, ramah lingkungan dan turut serta dalam pencapaian target nasional untuk pengurangan emisi dan transisi energi bersih.

3. Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan

Manfaat penelitian ini bagi perkembangan ilmu pengetahuan yaitu memperkaya literatur terkait *Life Cycle Assessment* (LCA) pada sektor PLTA khususnya di Indonesia yang masih tergolong terbatas, serta memberikan pendekatan metodologis yang dapat dikembangkan untuk studi sejenis di masa mendatang.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada industri sektor pembangkit listrik tenaga air tepatnya di PT. PLN Nusantara Power UP Cirata dengan ruang lingkup *Cradle-to-gate* yang meliputi proses pada *cradle* yaitu ekstraksi air dan material pendukung produksi dan transportasi, sedangkan proses pada *gate* yaitu proses utama pembangkitan listrik, namun tidak mencakup fase konstruksi awal, distribusi listrik dan penggunaan listrik oleh konsumen. Data inventori yang digunakan adalah data

tahun 2024 dengan unit fungsi sebesar 1 kWh listrik. Analisis dampak lingkungan dibatasi pada kategori *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), dan *Ozone Depletion Potential* (ODP) menggunakan metode CML-IA Baseline, sehingga dampak lain tidak dianalisis karena berada di luar batas sistem penelitian.

1.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 1.1 berikut.

Tabel 1. 1 Penelitian Terdahulu

No.	Judul, Nama Penulis, dan Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	Research Gap
1	Life Cycle Assessment of a Mini Hydro Power Plant in Indonesia: A Case Study in Karai River Penulis: Jessica Hanafi, Anthony Riman Tahun: 2015	Menilai siklus hidup PLTA mini di Simalungun, Indonesia, dengan fokus pada eksplorasi dampak lingkungan dari fase konstruksi hingga operasional	Menggunakan <i>Software</i> SimaPro dengan metode LCIA yang digunakan adalah CML-IA baseline (utama) & TRACI 2.1 (analisis sensitivitas). Kajian kategori dampak ekotoksistas laut, air tawar, karsinogenik	Dampak tertinggi dari konstruksi <i>rapid pipeline</i> (nickel dan steel)	Belum mengkaji solusi penurunan dampak, lingkup kajian mencakup fase konstruksi dan mengkaji kategori dampak sekunder
2	An Environmental Assessment of Small Hydropower in India: The Real Costs Of Dams' Construction Under a Life Cycle Perspective Penulis: Giorgio Bidoglio, Markus Berger, Matthias Finkbeiner Tahun: 2018	Mengevaluasi dampak lingkungan dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) kecil di India, dengan fokus pada dampak konstruksi dan operasi	Menggunakan <i>Software</i> GaBi dengan metode LCIA yang digunakan adalah CML 2001, LANCA, dan metode Chaudhary et al. (2015). Kajian kategori dampak mencakup kajian primer dan sekunder	Dampak utama teridentifikasi pada fase pra-konstruksi, konstruksi, dan operasi, dengan kontribusi besar dari beton, baja, dan konsumsi energi pada konstruksi.	Studi dilakukan di PLTA skala kecil, belum mengkaji solusi penurunan dampak, menggunakan <i>Software</i> GaBi, dan lingkup kajian mencakup fase konstruksi dan operasional
3	Environmental Life Cycle Assessment of a Hydropower Plant in Bolivia Penulis: Angelica Magne, Pablo Jimenez, Evelyn Cardozo Tahun: 2023	Mengevaluasi dampak lingkungan PLTA Ivirizu di Bolivia sepanjang siklus hidup	Menggunakan <i>Software</i> SimaPro dengan metode LCIA yang digunakan adalah ReCiPe 2016. Kajian kategori dampak mencakup 18 dampak <i>midpoint</i> dan 3 dampak <i>endpoint</i>	Dampak terbesar teridentifikasi pada fase konstruksi, dengan kontribusi utama dari penggunaan diesel dan konsumsi material. Dampak operasi berkaitan dengan penggunaan air dan emisi biogenik	Belum memberikan kajian solusi dampak dan kategori dampak yang dikaji cukup banyak dengan metode ReCiPe 2016

No.	Judul, Nama Penulis, dan Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	Research Gap
4	Life Cycle Assessment of a Pico Hydro Generator Made of E-Waste Components Based on Frugal Innovation Penulis: Abdulrahman Olaniyan, Caherine Azzaro-Pantel, Stephane Caux, Pascal Maussion Tahun: 2023	Menilai dampak lingkungan dari generator <i>pico-hydro</i> yang menggunakan komponen <i>e-waste</i>	Menggunakan <i>Software</i> SimaPro dengan metode LCIA yang digunakan adalah IMPACT 2002+. Kajian kategori dampak mencakup 15 dampak dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	Sistem generator berbasis komponen <i>e-waste</i> memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah, dengan dampak terbesar pada kategori <i>global warming</i>	Belum memberikan kajian solusi dampak, hanya fokus pada unit generator
5	Environmental Sustainability Assessment of Hydropower Plant in Europe Using Life Cycle Assessment Penulis: M.A.P. Mahmud, N. Huda, S.H. Farjana, C. Lang Tahun: 2018	Menilai dampak lingkungan dari sistem pembangkit listrik tenaga air (PLTA) berbasis reservoir di Eropa dengan menggunakan LCA	Menggunakan <i>Software</i> SimaPro dengan metode LCIA yang digunakan adalah ReCiPe dan CML-IA. Kajian kategori dampak mencakup dampak primer dan sekunder dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	PLTA di wilayah Alpine menunjukkan dampak lingkungan yang lebih baik dibandingkan dengan PLTA di wilayah Non-Alpine	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> dan kategori dampak yang dikaji mencakup kategori dampak <i>midpoint</i> dan <i>endpoint</i>
6	Life Cycle Assessment of Small Hydro Power Plants in Uttarakhand Penulis: Ruby Pantt, Saurabh Aggarwal, Kalpit Joshit Tahun: 2016	Melakukan LCA pada PLTA mikro, membandingkan dengan PLTA berbasis batu bara, dan menghitung emisi GRK	Metode LCIA yang digunakan adalah ReCiPe dan analisis <i>break-even</i> . Kajian kategori dampak mencakup dampak GWP dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	Emisi GRK meningkat dengan penurunan kapasitas dan peningkatan <i>head</i> (untuk <i>run-of-river</i>). Penelitian menunjukkan bahwa PLTA kecil memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan dengan PLTA besar atau pembangkit berbahan bakar fosil	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> dan kategori dampak yang dikaji mencakup kategori dampak GWP saja
7	A Life Cycle Assessment of The Construction Phase of Eleven Micro-Hydropower Installations in The UK Penulis: T. Ueda, E.S. Roberts, A. Norton C., D. Styles, A.P. Williams, H.M. Ramos, J. Gallagher Tahun: 2019	Mengkuantifikasi beban dampak lingkungan yang terkandung dalam fase konstruksi mikro-hidro (70-100 kW) di Inggris	Metode LCIA yang digunakan adalah CML-IA. Kajian kategori dampak mencakup dampak primer dan sekunder dengan ruang lingkup <i>cradle-to-gate</i>	Hasil menunjukkan bahwa penggunaan beton, agregat, logam, dan plastik memberikan kontribusi utama terhadap dampak lingkungan	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-gate</i> fase konstruksi
8	Acidification potential estimation for small hydropower using LCA methodology in India	Menilai potensi asidifikasi dari berbagai proyek <i>small hydro</i>	Metode LCIA yang digunakan adalah Economic Input-Output (EIO-LCA).	Emisi SO_2eq bervariasi antara 0,065-0,325 g/kWh tergantung tipe,	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-</i>

No.	Judul, Nama Penulis, dan Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	Research Gap
	Penulis: Varun Goel, Himanshu Nautiyal, Janmejy Kumar, Munesh Sethi, Tabish Alam, Tej Singh, Rohit Khargotra Tahun: 2024	<i>powerplant</i> di India menggunakan teknik LCA untuk menilai emisi SO ₂ eq selama fase konstruksi, operasional, dan pemeliharaan	Kajian kategori dampak mencakup dampak <i>acidification potential</i> (AP) dengan ruang lingkup <i>cradle-to-gate</i>	kapasitas, dan <i>head</i> PLTA. <i>Hotspot</i> teridentifikasi pada material konstruksi (beton, logam) dan proses pemeliharaan	<i>gate</i> fase konstruksi dan operasional. Hanya mengkaji kategori dampak AP saja pada PLTA skala kecil
9	Study on Carbon Emissions of A Small Hydropower Plant in Southwest China Penulis: Caihong Tang, Yiling Leng, Pengyu Wang, Jian Feng, Shanghong Zhang, Yujun Yi, Hui Li, Shaoliang Tian Tahun: 2024	Menilai jejak karbon dari PLTA kecil di China, termasuk semua fase siklus hidup dari pra-konstruksi hingga fase dekomisioning	Metode LCIA yang digunakan adalah Economic Input-Output (EIO-LCA) dan P-LCA. Kajian kategori dampak mencakup dampak GWP dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	Emisi karbon terbesar berasal dari fase konstruksi (67.06%), dengan <i>hotspot</i> pada penggunaan semen dan baja pada fase konstruksi	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> fase pra-konstruksi sampai fase dekomisioning. Hanya mengkaji kategori dampak GWP saja
10	Accounting for GHG Net Reservoir Emissions of Hydropower in Ecuador Penulis: Andrei Briones Hidrovo, Javier Uche, Amaya Martínez-Gracia Tahun: 2017	Menilai emisi gas rumah kaca (GHG) dari dua proyek PLTA di Ekuador, fokus pada emisi dari reservoir dengan pendekatan LCA	Menggunakan <i>Software</i> SimaPro dengan metode LCIA yang digunakan adalah ReCiPe. Kajian kategori dampak mencakup dampak primer dan sekunder dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	Hasil menunjukkan bahwa proyek PLTA dengan dam menghasilkan emisi gas rumah kaca yang sangat tinggi, sebesar 547 Kg CO ₂ -eq/MWh. Emisi terbesar berasal dari reservoir	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> . Hanya mengkaji kategori dampak GWP saja
11	Life-Cycle Inventory of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Two Hydropower Projects in China Penulis: Qinfen Zhang, Bryan Karney, Heather MacLean, Jingchun Feng Tahun: 2007	Menilai penggunaan energi dan emisi gas rumah kaca untuk dua proyek PLTA di China, berfokus pada ekstraksi bahan, manufaktur, konstruksi, operasi & pemeliharaan	Metode LCIA yang digunakan adalah Economic Input-Output (EIO-LCA). Kajian kategori dampak mencakup dampak GWP dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>	Tahap operasional dan pemeliharaan diidentifikasi sebagai kontributor gas rumah kaca paling signifikan	Belum memberikan kajian solusi dampak, lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> . Hanya mengkaji kategori dampak GWP saja
12	Financial Appraisal of Small Hydro-Power Considering the Cradle-to-Grave Environmental Cost: A Case from Greece Penulis: Adamantia Z. Vougioukli, Eleni Didaskalou & Dimitrios Georgakellos Tahun: 2017	Menilai dampak lingkungan dan biaya investasi dari <i>small hydro powerplant</i> kecil di Yunani menggunakan pendekatan LCA, dengan fokus pada biaya lingkungan yang diintegrasikan	Screening LCA menggunakan NEEDS <i>framework</i> untuk menghitung emisi udara dan biaya eksternal per unit material (<i>concrete, steel, aggregates</i>)	Hotspot utama: emisi CO ₂ dari <i>steel</i> dan <i>concrete</i> selama manufaktur; biaya eksternal tertinggi dari NO _x pada tahap transportasi	Fokus pada perhitungan biaya investasi lingkungan berdasarkan analisis LCA, belum memberikan kajian solusi dampak

No.	Judul, Nama Penulis, dan Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	Research Gap
		dalam analisis keuangan			
13	Quantifying Net Water Consumption of Norwegian Hydropower Reservoirs Penulis: Martin Dorber, Kim Rainer Mattson, Odd Terje Sandlund, Roel May, Francesca Verones Tahun: 2019	Menilai konsumsi air bersih dari reservoir PLTA di Norwegia dan dampaknya terhadap keanekaragaman hayati air melalui LCA	Kategori dampak yang dikaji <i>Species-Discharge Relationships</i> dengan ruang lingkup kajian <i>cradle-to-gate</i> mencakup ekstraksi, konstruksi reservoir, operasi (evaporasi)	Hasil menunjukkan konsumsi air bersih berkisar antara 0 hingga 0,012 m ³ /kWh, dengan dampak terbesar berasal dari perubahan habitat air tawar dan pengurangan aliran sungai	Kajian berfokus pada penggunaan air dan dampaknya terhadap keanekaragaman hayati, belum memberikan kajian solusi dampak
14	Empirical Characterization Factors To Be Used in LCA and Assessing The Effects of Hydropower on Fish Richness Penulis: Katrine Turgeon, Gabrielle Trotter, Christian Turpin, Cécile Bulle, Manuele Margni Tahun: 2021	Mengembangkan faktor karakterisasi empiris untuk digunakan dalam LCA yang mengukur dampak <i>hydropower</i> terhadap keragaman spesies ikan	LCA menggunakan data empiris tentang perubahan kekayaan spesies ikan sebagai faktor karakterisasi dan dampak ekologis dari perubahan aliran sungai akibat pembangunan PLTA	Dampak PLTA terhadap kekayaan ikan bervariasi secara regional	Kajian berfokus pada pengembangan nilai CF
15	Life Cycle Assessment of Closed-Loop Pumped Storage Hydropower in the United States Penulis: Timothy R. Simon, Daniel Inman, Rebecca Hanes, Gregory Avery, Dylan Hettinger, Garvin Heath Tahun: 2023	Menilai dampak lingkungan dari sistem <i>Closed-Loop Pumped Storage Hydropower</i> di Amerika Serikat, fokus pada GWP	Ruang lingkup kajian: <i>cradle-to-grave</i> mencakup konstruksi, operasional, pemeliharaan, hingga dekomisioning fasilitas	Beton dan sumber <i>grid mix</i> menyumbang mayoritas GWP	Belum memberikan kajian solusi dampak, hanya fokus pada kategori dampak GWP, dan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i> dari fase konstruksi-dekomisioning
16	Life Cycle Assessment of Hydropower Utilization in Iceland as a Driving Force For Climate Strategy and Decarbonization Penulis: Alexandra Kjeld, Helga Jóhanna Bjarnadóttir, Ragnheiður Ólafsdóttir Tahun: 2025	Menilai dampak lingkungan dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di Islandia, sebagai bagian dari strategi iklim dan dekarbonisasi	Menggunakan <i>Software GaBi</i> dengan metode LCIA yang digunakan adalah PEF. Kajian kategori dampak mencakup dampak primer dan sekunder dengan ruang lingkup <i>cradle-to-gate</i>	Emisi karbon dari empat PLTA di Islandia berkisar antara 0.5 hingga 21.1 g CO ₂ -eq/kWh. Reservoir dengan kandungan bahan organik tinggi menghasilkan dampak signifikan pada pemanasan global, eutrofikasi, dan ozon fotokimia	Belum memberikan kajian solusi dampak
17	Midpoint Characterization Factors to Assess Impacts	Mengembangkan CF untuk <i>in-stream water use</i> (TWU)	Menggunakan pendekatan <i>midpoint</i>	Identifikasi dampak utama pada perubahan aliran	Kajian berfokus pada pengembangan nilai CF

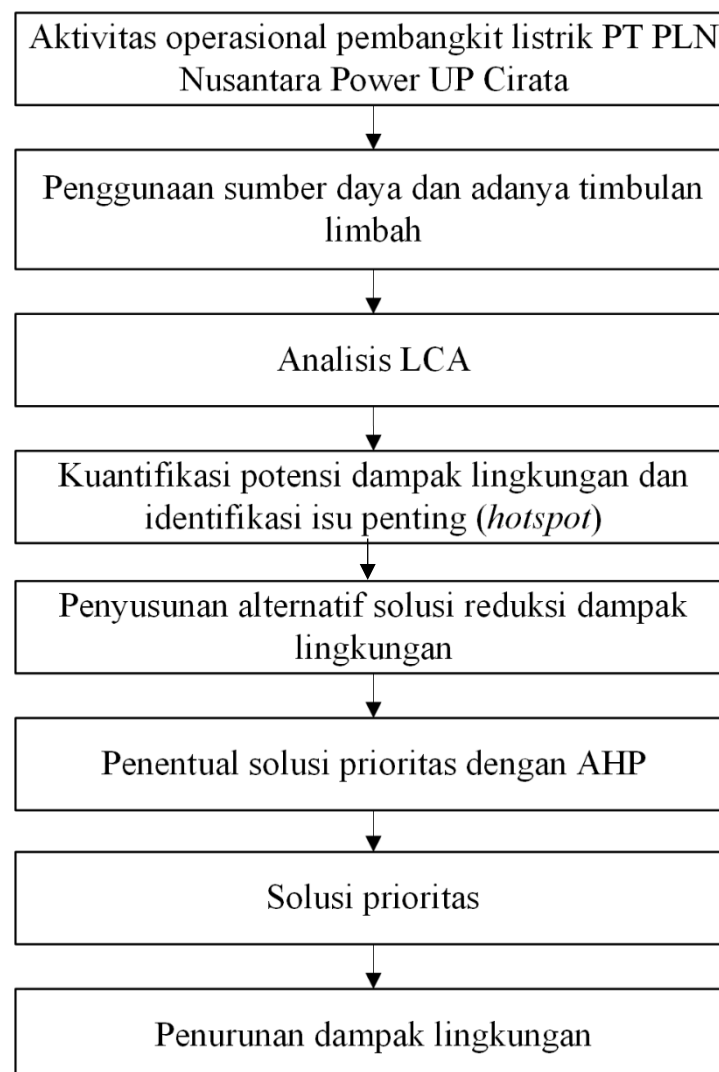
No.	Judul, Nama Penulis, dan Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	Research Gap
	of Turbine Water Use From Hydropower Production Penulis: Martin Dorber, Laura Scherer, Francesca Verones Tahun: 2024	pada <i>storage & pumped storage hydropower</i>		sungai dan potensi gangguan ekosistem air tawar	
18	Can Hydropower Still Be Considered a Clean Energy Source? Penulis: Xuerong Li, Faliang Gui, Qingpeng Li Tahun: 2019	Menilai dampak lingkungan dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di China, dengan fokus pada emisi gas rumah kaca (GHG)	Lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> dengan IPCC 2006 Guidelines untuk kategori dampak GWP	<i>Hotspot</i> emisi terbesar dari fase operasi (70,49%) didominasi emisi reservoir (81,11%)	Belum memberikan kajian solusi dampak, hanya fokus pada dampak GWP dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>
19	Indirect GHG emissions in hydropower plants: a review focused on the uncertainty factors in LCA studies Penulis: Marla T. B. Geller, Jacqueline L. Bailão, Maria E. L. Tostes, Anderson A. de M. Meneses Tahun: 2020	Menilai dampak emisi gas rumah kaca (GHG) dari berbagai PLTA, dengan fokus pada emisi tidak langsung yang dihasilkan selama fase konstruksi dan operasional	Ruang lingkup kajian <i>cradle-to-grave</i> mencakup tahap konstruksi, operasi, dekomisioning	Hasil menunjukkan bahwa fase konstruksi berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca tidak langsung, dengan penggunaan beton dan baja sebagai faktor utama	Belum memberikan kajian solusi dampak, hanya fokus pada dampak GWP dengan ruang lingkup <i>cradle-to-grave</i>
20	Life cycle assessment: A perspective of improvement of hydro-plants for intensifying “green electricity” Penulis: Debapratim Goswami, Ananya Bhattacharjee, Puja Basak, Uttara Das, Champa Nandi Tahun: 2023	Menilai dampak lingkungan dari PLTA, dengan fokus pada peningkatan dampak ramah lingkungan dan pemanfaatan energi hijau yang lebih besar	Menggunakan <i>Software</i> openLCA dengan metode CL 2001. Kajian mencakup fase konstruksi dan operasi	Kase konstruksi dan fase operasi memiliki dampak yang lebih besar pada ekosistem. Emisi utama berasal dari operasi mesin konstruksi, produksi peralatan operasional, dan pengisian waduk	Belum memberikan kajian solusi dampak, hanya fokus pada dampak GWP

Pada tabel 1.1 di atas dapat diketahui posisi penelitian ini, yaitu untuk melengkapi penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian terdahulu membahas dampak lingkungan yang ditimbulkan pada fase konstruksi dan operasi sedangkan kategori dampak yang dibahas di antaranya adalah kategori dampak primer dan sekunder. Pada penelitian terdahulu juga belum ada yang melakukan kajian alternatif untuk mereduksi dampak yang dihasilkan pada *hotspot*

yang didapatkan. Maka dari itu, penelitian ini akan menambahkan kajian alternatif solusi untuk pengurangan dampak lingkungan dari *hotspot* yang didapatkan pada kajian LCA.

1.7 Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir penelitian disusun untuk menjadi dasar alur penyusunan penelitian ini. Alur penelitian yang bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari kegiatan pembangkitan pada PT. PLN Nusantara Power UP Cirata dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Kerangka Pikir Penelitian