

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai pembangkit listrik tenaga air, baik PLTA reservoir, PLTA tipe *run of river* (RoR), PLTM dan PLTMH, telah dilakukan oleh berbagai peneliti dengan pendekatan yang beragam. Secara umum, kajian terdahulu mencakup aspek hidrologi, desain teknis, kelayakan finansial, sensitivitas proyek, hingga analisis kebijakan energi. Namun, setiap penelitian memiliki ruang lingkup dan fokus yang berbeda sesuai dengan tujuan dan karakteristik objek yang dikaji.

Beberapa penelitian lebih menitikberatkan pada analisis teknis seperti evaluasi debit sungai, perhitungan potensi energi, hingga telaah *Flow Duration Curve*. Sementara itu, sebagian lainnya menyoroti kelayakan finansial menggunakan indikator seperti NPV, IRR, PI, dan PP, atau mengkaji pengaruh perubahan variabel tertentu melalui analisis sensitivitas. Pada tingkat yang lebih makro, terdapat pula penelitian yang mengkaji kebijakan pengembangan PLTA dan peran energi terbarukan dalam bauran energi nasional.

Meskipun memberikan kontribusi penting, penelitian terdahulu umumnya masih berdiri dalam lingkup masing-masing dan belum sepenuhnya mengintegrasikan analisis teknis berbasis FDC, optimasi debit desain, evaluasi kelayakan finansial dua skenario (dengan dan tanpa kredit karbon), serta analisis sensitivitas terhadap beberapa variabel utama secara simultan.

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai posisi penelitian ini di antara studi-studi yang telah ada, rangkuman penelitian relevan disusun dalam tabel *state of the art* berikut sebagai dasar identifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) dan kontribusi kebaruan penelitian ini.

Tabel 2.1 *State of the art*

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
1	Tinjauan Potensi Teknis dan Kelayakan Ekonomi PLTA Pada Proyek Kerjasama Pemerintah Dengan Badan Usaha Bendungan Merangin	(Larasari et al., 2021),	2021	Analisis ekonomi PLTA dengan reservoir	Merangin, Jambi	PLTA Reservoir	<i>Social Cost Based Analysis</i> (SCBA)	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, Kelayakan teknis hdirologi, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
2	Studi Kelayakan PLTM Cianten I Kabupaten Bogor Dari Segi Hidrologi dan Ekonomi	(Susilo Adhi, 2024)	2024	Analisis hidrologi dan Analisis finansial PLTM	Cianten, Bogor	PLTM	NPV, IRR, dan BCR	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial indikator PI dan PP, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan C kredit karbon <i>Article 6</i>
3	Financial Feasibility Sebagai Langkah Strategis Dalam Pengambilan Keputusan Investasi Pada Proyek PLTA Tamboli (Studi Kasus Pada PT Tamboli Energy di Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara)	(Nurmala Anik, 2021),	2021	Analisis finansial, Analisis sensitivitas, Analisis SWOT PLTA <i>RoR</i>	Kolaka, Sulawesi Tenggara	PLTA RoR	NPV, IRR, MIRR, PI, PP, analisis sensitivitas, Discounted Payback, dan Analisis SWOT	Ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, perubahan faktor kapasitas pembangkit, kelayakan proyek kredit karbon <i>Article 6</i>
4	Tinjauan Potensi dan Kebijakan Pengembangan PLTA dan PLTMH di Indonesia	(Rahayu & Windarta, 2022),	2022	Kajian kebijakan dan analisis program pengembangan PLTA, PLTM, dan PLTMh	Semarang, Jawa Tengah	PLTA dan PLTMH	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, Analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
5	<i>Techno-economic optimization of pumped hydro storage plants integrated with floating photovoltaic</i>	(Bamoshmoosh et al., 2025)	2025	Analisis teknis dan finansial <i>Floating Photovoltaics</i> (FPV) dengan sistem PLTA dengan <i>Pumped Storage Hydro</i>	Milan, Italy	Hybrid PLTA <i>Pumped Storage</i> dan <i>Floating PV</i>	Model optimasi berupa <i>mixed-integer linear programming</i> (MILP)	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
6	<i>A literature review on the Net Present Value (NPV) valuation method</i>	(Shou, 2022)	2022	Kajian literatur (<i>literature review</i>) tentang metode valuasi investasi proyek, khususnya NPV	Sidney, Australia	Tidak ada	NPV, IRR, MIRR, PP, <i>Discounted Payback Period</i>	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial indikator PI, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
7	<i>Small hydropower as a source of clean and local energy in Nigeria: Prospects and challenges</i>	(Ugwu et al., 2022)	2022	Aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan dari penerapan PLTA skala kecil.	Nigeria	PLTM	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
8	Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Air untuk Media Pembelajaran di Laboratorium	(Setiawan et al., 2024).	2024	Pembuatan alat prototype PLTA untuk kebutuhan pembelajaran dan pengganti sumber energi listrik yang lain seperti minyak bumi, gas dan batubara	Indonesia	PLTA	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
9	Analisis Kinerja Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro Terapung (Studi Kasus Irigasi Sipogas)	As'ari et al., 2021).	2021	Analisis kinerja prototipe pembangkit listrik tenaga piko hidro yang terapung	Riau, Indonesia	PLT Pico Hidro Terapung	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
										dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
10	Kajian Kelayakan Finansial Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Skala Besar Di Pulau Jawa	(Saputra, 2021)	2021	Menilai kelayakan finansial proyek PLTB jika dikelola langsung oleh PLN	Banten, Indonesia	PLTB	NPV, IRR, BCR, PP, analisis sensitivitas, <i>Clean Development Mechanism</i>	Ada	Ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, analisis finansial indikator PI dan PLTA RoR
11	Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan <i>Variable Renewable Energy</i> (VRE) Pada Sistem Ketenagalistrikan Di Indonesia	(Aprilianto & Ariefianto, 2021)	2021	Evaluasi terhadap penghapusan pembangkit listrik berbahan bakar fosil (PLTU dan pengembangan pembangkit yang memanfaatkan sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT)	Indonesia	PLTU	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
12	<i>Technical performance evaluation and optimization of a run of river hydropower facility</i>	(Nedaci & Walsh, 2022a)	2022	Pengembangan pendekatan analisis baru untuk evaluasi kinerja dan optimasi PLTA tipe RoR.	Italia	PLTA RoR	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
13	<i>The financialization of rivers: Clean Development Mechanism (CDM) subsidized hydropower in the Mekong Region's basins at risk</i>	(Motta et al., 2025)	2025	Pembangunan PLTA skala besar (<i>large-scale hydropower dams</i>) yang didanai oleh CDM dan dampak (CDM) terhadap ketegangan hidropolitik di sistem sungai lintas negara akibat pembangunan bendungan skala besar yang didanai CDM.	Thailand	PLTA Reservoir	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial dan analisis sensitivitas

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
14	<i>Small hydropower as a source of clean and local energy in Nigeria: Prospects and challenges</i>	(Ugwu et al., 2022)	2022	Pemanfaatan potensi <i>small hydropower</i> (SHP) sebagai solusi peningkatan kebutuhan energi	Nigeria	PLTM	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
15	Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Pada Bendungan Lubuk Ambacang Kabupaten Kuantan Singingi Profinsi Riau	(Azmi et al., 2018)	2018	Penelitian ini secara lengkap menganalisis kelayakan teknis dan finansial pembangunan PLTA Bendungan Lubuk Ambacang.	Riau, Indonesia	PLTA Reservoir	NPV, IRR, BCR, dan <i>Payback Period</i>	Ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial indikator PI, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
16	<i>Flexibility definition and improvement of pumped hydro storage: A techno-economic analysis</i>	(Wu et al., 2024)	2024	Pengembangan <i>flexibility</i> (fleksibilitas operasional dan strategis) <i>Pumped Hydro Storage</i> untuk meningkatkan kinerja teknis dan ekonominya.	China	PLTA <i>Pumped Storage</i>	Ada perhitungan finansial, tapi parameternya bukan NPV, IRR, BCR dan <i>Payback Period</i>	Ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
17	Rancang Bangun Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Pada Kali Sangaji Kabupaten Halmahera Timur	(Zulkarnain K Misbah et al., 2023)	2023	Analisis ekonomi PLTMH	Halmahera Timur, Indonesia	PLTMH	NPV, IRR, BCR, dan <i>Break Even Point</i> (BEP)	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial indikator PI dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
18	Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Berdasarkan Debit Air dan Kebutuhan Energi Listrik	(Sofyan & Made Sudana, 2022)	2022	Analisis teknis dan potensi daya pembangkitan PLTMH	Pekalongan, Indonesia	PLTMH	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
19	<i>Feasibility Study of a Micro Hydro Power Plant for Rural</i>	(Rumbayan & Rumbayan, 2023)	2023	Analisis teknis dan finansial PLTMH	Sulawesi Utara, Indonesia	PLTMH	NPV, IRR, dan PP	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial evaluasi

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
	<i>Electrification in Lalumpe Village, North Sulawesi, Indonesia</i>									BCR, dan PI Analisis Sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
20	<i>LCOE-Based Optimization for the Design of Small Run-of-River Hydropower Plants</i>	(Amougou et al., 2022)	2022	Analisis teknis dan finansial PLTM	Kamerun	PLTM	NPV, dan PP	Ada, tetapi tidak menghitung perubahan biaya investasi awal dan tarif jual listrik	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial evaluasi IRR BCR dan PI, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
21	<i>Investigating the hydropower plants production and profitability using system dynamics approach</i>	(Daneshgar & Zahedi, 2022)	2022	Analisis finansial dengan pendekatan <i>system dynamics</i> (SDM) berbasis software STELLA PLTA Karun	Iran	PLTA Reservoir	Model ekonometrik dengan regresi ARMA dan ARIMA untuk prediksi harga listrik dan debit air masuk dan Monte Carlo	Ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial evaluasi NPV, IRR, BCR, PI, dan PP, kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
22	Kajian Efektifitas Investasi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro Way Sekampung Dari Segi Operasional Kelistrikan dan Finansial	(Anggatara E, 2021)	2021	Analisis teknis dan finansial PLTM	Lampung, Indonesia	PLTM	NPV, IRR, BCR dan PP	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, PLTA RoR, analisis finansial indikator PI, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
23	Kajian Kritis Terhadap Beberapa Studi Kelayakan Potensi Pembangkit Listrik	(Azhiimah et al., 2019)	2019	Kajian literatur penggunaan potensi sumber daya air di Indonesia dalam	Buleleng, Tasikmalaya, Aceh Besar, Bolaang Mongondow,	PLTMH	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, PLTA RoR, analisis sensitivitas dan

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
	Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Indonesia			rangka pembangunan PLTMH	Lampung Barat, Papua Barat, Aceh Barat Daya, Seram Bagian Timur, Sulawesi Tenggara, Kotabobagu, Batang, Lebak, Indonesia					kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
24	<i>Levelised cost of energy – A theoretical justification and critical assessment</i>	(Aldersey-Williams & Rubert, 2019)	2019	Memberikan dasar teoritis, justifikasi, dan penilaian kritis terhadap penggunaan <i>Levelised Cost of Energy</i> (LCOE) sebagai ukuran pembandingan biaya pembangkitan listrik selama masa hidup pembangkit pada pembangkit PLTGU dan PLTB <i>Offshore</i>	Glasgow, United Kingdom	PLTGU dan PLTB <i>Offshore</i>	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, PLTA RoR, analisis sensitivitas dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
25	<i>Levelized Cost of Electricity Generation by Small Hydropower Projects under Clean Development Mechanism in India</i>	(Patro et al., 2022)	2022	Menghitung <i>Levelized Cost of Electricity (LCOE)</i> pada PLTA skala kecil (<i>Small Hydropower Plants - SHP</i>) dengan menggunakan pendekatan <i>Life Cycle Costing (LCC)</i> .	India	<i>Small Hydropower Power</i> (PLTM, PLTA RoR)	Ada tapi tidak ada parameter evaluasi finansial seperti NPV, IRR, BCR dan PP	Tidak ada	Ada, tetapi dengan CDM	Lokasi, kelayakan teknis hidrologi, analisis finansial indikator NPV, IRR, BCR, PI dan PP, serta analisis sensitivitas, kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
26	Pengaruh Regulasi Terhadap Percepatan Penetrasi Energi Baru Terbarukan di Sulawesi Utara, Tengah, dan Gorontalo	(Zulfadli & Umar, 2023)	2023	Mengkaji sejauh mana pengaruh regulasi pemerintah Indonesia terhadap percepatan pengembangan pembangkit listrik yang menggunakan	Sulawesi Utara, Sulawesi Tengah, Gorontalo, Indonesia	Tidak ada	Menggunakan perhitungan Biaya Pokok Pembangkitan (BPP), tidak menggunakan evaluasi	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial indikator NPV, IRR, PP, BCR, dan PI, analisis sensitivitas, dan

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
				sumber energi baru dan terbarukan. (EBT)			parameter finansial seperti NPV, IRR, BCR, PI dan PP			kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
27	Penggunaan <i>Certified Emission Reductions</i> Sebagai Bukti Objek Transaksi Carbon Crediting	(Maharani et al., 2020)	2020	Skema jual-beli karbon (<i>carbon trading</i>) di Indonesia, khususnya ditinjau dari perspektif hukum perdata.	Kalimantan Timur, Indonesia	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Ada tapi bukan perhitungan finansial	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, PLTA RoR, analisis finansial, analisis sensitivitas, dan kelayakan proyek dengan CDM
28	<i>Potential for small hydropower development in the Tano River Basin of Ghana using SWAT and RETScreen</i>	(Addai et al., 2025)	2025	Analisis teknis, finansial dan pengurangan emisi karbon	Ghana	<i>Small Hydropower Power</i> (PLTM, PLTA RoR)	NPV	Tidak ada	Ada, tetapi dengan CDM	Kelayakan teknis hdirologi, lokasi, analisis finansial evaluasi IRR, PP, BCR, dan PI, serta analisis sensitivitas, kredit karbon <i>Article 6</i>
29	<i>Preparing hydropower projects for the post-Paris regime: An econometric analysis of the main drivers for registration in the Clean Development Mechanism</i>	(Koo, 2017)	2017	Menganalisis posisi proyek <i>hydropower</i> dalam skema <i>Clean Development Mechanism</i> (CDM) pasca-Paris <i>Agreement</i> 2015 menggunakan analisis ekonometrika	Korea Selatan	<i>Small Hydropower Power</i> (PLTM dan PLTA RoR) dan PLTA Reservoir	Tidak ada	Tidak dilakukan analisis sensitivitas finansial terhadap fluktuasi biaya proyek, harga karbon, atau nilai investasi	Ada tetapi bukan perhitungan secara finansial	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
30	<i>Review of techno-economic and environmental aspects of building small hydro electric plants – A case study in Serbia</i>	(Ciric, 2019)	2019	Mengkaji potensi PLTA skala kecil (<i>Small Hydropower Plant</i> / SHP) dari berbagai aspek: • Teknis. • Ekonomi • Lingkungan • Hukum dan Regulasi	Serbia	<i>Small Hydropower Plant</i> (PLTM dan PLTA RoR)	NPV, IRR dan PP	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, analisis finansial indikator BCR dan PI, analisis sensitivitas, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
31	<i>Technical performance evaluation and optimization of a run-of-river hydropower facility</i>	(Nedaei & Walsh, 2022)	2022	Mengembangkan pendekatan analisis baru untuk: • Evaluasi kinerja PLTA RoR • Optimasi kinerja energi berdasarkan parameter teknis sistem.	Italia, Kanada, Polandia	PLTA RoR	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
32	<i>Techno-economic analysis of hydropower based green ammonia plant for urea production in Nepal</i>	(Devkota et al., 2023)	2023	Pengembangan fasilitas <i>Green Ammonia Plant</i> berbasis <i>Hydropower</i> untuk memenuhi kebutuhan produksi urea nasional	Nepal	PLTA (tidak disebutkan tipenya)	IRR, <i>Return on Investment</i> (ROI), PP	Ada, variasi biaya listrik	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial evaluasi NPV, BCR, PI, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
33	<i>Techno-economic feasibility of hybrid hydro-FPV systems in Sub-Saharan Africa under different market conditions</i>	(Olkkonen et al., 2023)	2023	Mengkaji optimalisasi kapasitas dan penjadwalan sistem hybrid PLTA-FPV (<i>Floating Photovoltaic System</i>).	Sub Saharan Africa	Hybrid PLTA-Floating PV	Ada tapi tidak dihitung evaluasi NPV, IRR, BCR dan PP	Ada	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial indikator NPV, IRR, BCR, PI, PP, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
34	<i>The future of Alpine Run-of-River hydropower production: Climate change, environmental flow requirements, and technical production potential</i>	(Tobias et al., 2023)	2023	Mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap produksi pembangkit <i>Run-of-River</i> (RoR).	Swiss	PLTA RoR	Tidak ada	Ada tetapi bukan perhitungan analisis sensitivitas terhadap parameter finansial	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
35	<i>Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: A case study</i>	(Montoya Ramirez et al., 2016)	2016	Menilai potensi penggunaan hydrokinetic turbines di saluran pembuangan PLTA skala besar	Colombia	PLTA Besar (<i>Large hydropower</i>)	Simulasi monte carlo, tetapi tidak dihitung secara eksplisit IRR, NPV, BCR, PI atau <i>Payback Period</i> dalam hasil akhir	Simulasi monte carlo	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
36	<i>Analysis Of Bussines Feasibility On Meureubo 48 MW Hydroelectric Plant Investment, In Aceh</i>	(Astutiningsih, 2021)	2021	Mengkaji kelayakan investasi pembangunan PLTA Meureubo	Aceh	PLTA RoR	NPV, IRR, PP, <i>Discount Payback Period</i> , PI	Ada, untuk harga jual listrik, mata uang (valuta asing vs rupiah, kapasitas faktor (<i>capacity factor</i>), skema pinjaman investasi	Tidak ada	Lokasi dan kelayakan proyek kredit karbon <i>Article 6</i>
37	<i>Developing Sustainable Infrastructure for Small Hydro Power Plants through Clean Development</i>	(Duque et al., 2016)	2016	Mengevaluasi alternatif pembiayaan yang berkelanjutan melalui mekanisme CDM untuk	Colombia	<i>Small Hydropower Plant</i> (PLTM dan PLTA RoR)	Tidak ada	Tidak ada	Tidak dilakukan perhitungan CDM	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
	<i>Mechanisms in Colombia</i>			mendukung kebutuhan domestik dan ekspor energi listrik dari proyek PLTA skala kecil (<i>Small Hydropower</i> - SHP) di Kolombia.						perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
38	Analisis Sensitivitas Investasi Proyek Rebranding Hotel Grand Mangku Putra di Kota Cilegon	(Dharmika et al., 2023)	2023	Proyek rebranding dan transformasi bisnis hotel. Rebranding ini mencakup aspek fisik bangunan serta manajemen hotel guna meningkatkan citra dan kualitas layanan properti.	Cilegon, Indonesia	Tidak ada	NPV, IRR, PP	Ada sensitivitas biaya operasional, harga sewa unit condotel dengan tingkat okupansi	Tidak ada	Kelayakan teknis hidrologi, lokasi, analisis finansial indikator BCR dan PI, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
39	Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Air Terjun Gollae Kabupaten Pangkep	(Saputra et al., 2022)	2022	Mengkaji potensi sumber daya air sebagai dasar perencanaan dan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)	Pangkep, Indonesia	PLTMH	NPV, IRR, PP	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, analisis finansial indikator BCR dan PI, Analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>
40	Studi Pemanfaatan Potensi 20 MW untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Cruk Meuasap Hulu Sungai Babahrot Aceh Barat Daya	(Meuasap et al., 2019)	2019	Analisis teknis potensi energi air untuk PLTA	Aceh Barat Daya, Indonesia	PLTA	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Lokasi, analisis finansial, analisis sensitivitas perubahan biaya investasi awal, tarif jual listrik, perubahan

NO	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Obyek Penelitian	Lokasi	Tipe Pembangkit	Metode Evaluasi Finansial	Analisis Sensitivitas	Kredit Karbon	Kebaruan
										energi, dan kelayakan proyek dengan kredit karbon <i>Article 6</i>

Sumber : Analisis sendiri

Berdasarkan telaah sistematis terhadap penelitian-penelitian sebelumnya pada tabel *state of the art* tersebut di atas, kajian PLTA, baik reservoir, *run of river*, PLTM, maupun PLTMH, telah mencakup aspek teknis, hidrologi, ekonomi, dan kebijakan. Namun, sebagian besar penelitian masih memiliki keterbatasan dalam tiga hal yaitu integrasi analisis teknis dan finansial, pemanfaatan skema pendanaan karbon, serta pemodelan risiko atau sensitivitas finansial yang komprehensif.

Dari literatur yang ditelaah, belum ada penelitian yang secara simultan menggabungkan analisis teknis berbasis interpretasi hidrologi sungai, optimasi debit desain dari data FDC, analisis kelayakan finansial dengan dan tanpa pendapatan karbon (*Article 6*), serta analisis sensitivitas multivariat terhadap variabel utama investasi. Ketiadaan integrasi keempat aspek tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian, khususnya pada konteks PLTA RoR.

Penelitian ini disusun untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menawarkan kerangka analisis yang terintegrasi dan aplikatif bagi perencanaan PLTA berkelanjutan di Indonesia, dengan studi kasus PLTA Watunohu di Kolaka.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

2.2.1.1. Pengertian PLTA dan Prinsip Kerja

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah suatu sistem teknologi yang menggunakan tenaga dari pergerakan air untuk membangkitkan listrik. Mekanisme operasional PLTA melibatkan konversi energi potensial yang tersimpan dalam air menjadi energi mekanik, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator. Energi ini diperoleh dari pergerakan massa air, terutama di tempat-tempat dengan perbedaan elevasi atau aliran air yang stabil.

2.2.1.2. Klasifikasi PLTA

Menurut *International Hydropower Association*, terdapat empat tipe dari PLTA yaitu:

1. PLTA Aliran Sungai Langsung (*Run of River, RoR*):

PLTA RoR mengalirkan air dari sungai dengan bangunan pengalihan sungai berupa bendung melalui intake, saluran, bangunan pengendap sedimen, saluran penghantar, pipa pesat (*penstock*) menuju turbin dan berakhir di *tailrace*. PLTA RoR umumnya tidak dilengkapi dengan fasilitas penyimpanan air atau hanya memiliki sedikit fasilitas tersebut.

2. PLTA Penyimpanan (*Storage Hydropower*):

PLTA tipe ini umumnya berupa sistem besar dengan ciri khas desain bendungan untuk menyimpan air dalam sebuah *reservoir*. Energi listrik dihasilkan melalui pelepasan air dari *reservoir* melalui saluran atau pipa pesat dan turbin yang mengaktifkan generator. PLTA penyimpanan berfungsi untuk menyediakan pasokan listrik beban dasar serta memiliki kemampuan untuk dimatikan dan dihidupkan dalam waktu singkat sesuai dengan permintaan sistem (beban puncak).

3. PLTA Pompa Penyimpanan (*Pumped Storage Hydropower*):

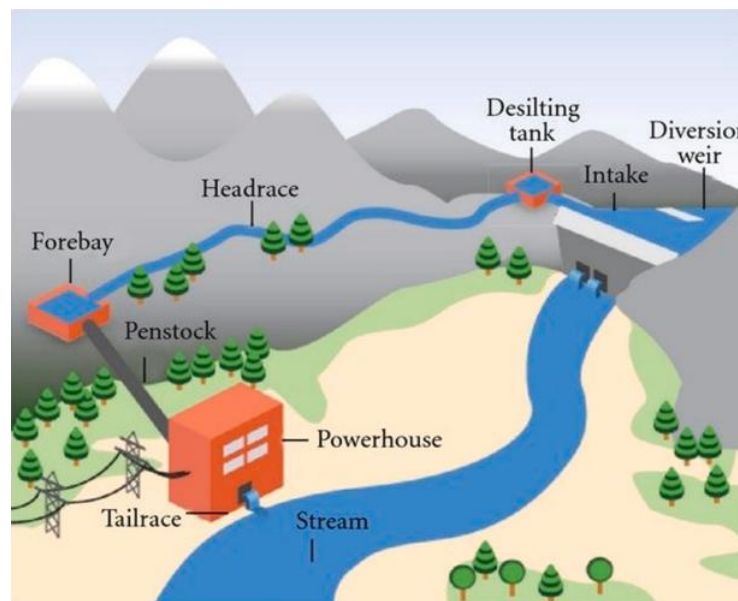
Jenis PLTA ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik pada saat beban puncak, dengan cara memanfaatkan air yang dipompa dari *reservoir* bawah ke *reservoir* atas ketika terdapat surplus energi dalam sistem, yaitu saat permintaan

listrik sedang rendah. Pada saat permintaan listrik naik, air dialirkan kembali ke *reservoir* bawah melalui saluran penghantar, pipa tekanan tinggi, dan turbin guna membangkitkan energi listrik.

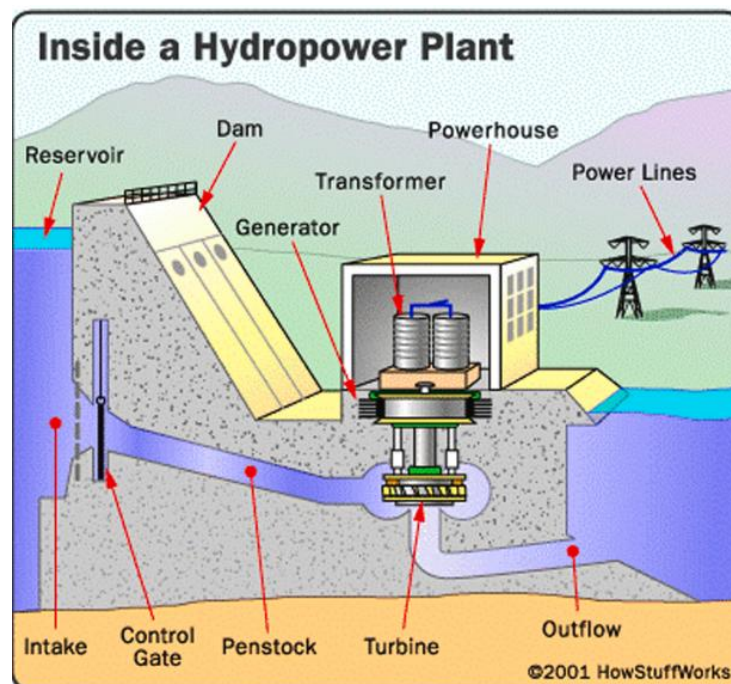
4. PLTA Lepas Pantai (*Offshore Hydropower*):

PLTA tipe ini adalah kelompok teknologi yang masih berkembang dan belum banyak diterapkan, yang menggunakan tenaga pasang surut atau energi dari gelombang laut untuk menghasilkan listrik dari air laut.

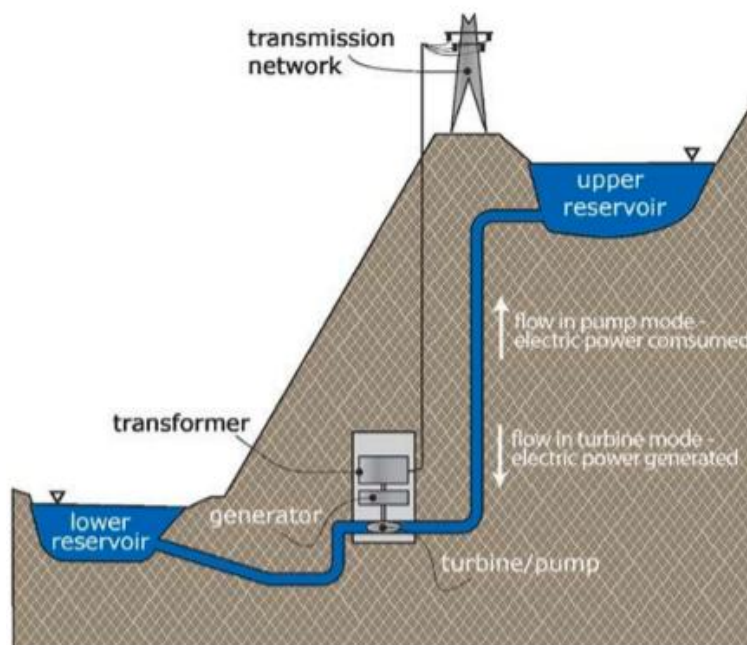
Menurut (Ugwu et al., 2022), terdapat tiga kategori utama PLTA yang diklasifikasikan berdasarkan karakteristik alirannya atau sumber dayanya, yaitu: *run of river* (RoR), pembangkit dengan penyimpanan (*reservoir*), dan PLTA dengan sistem pompa balik (*pumped storage*). Uraian terkait hal tersebut dapat ditemukan pada gambar ilustrasi di bawah ini.



Gambar 2.1 PLTA RoR atau PLTM
Sumber: (Ugwu et al., 2022)



Gambar 2.2 PLTA tipe *reservoir* atau genangan
Sumber: (Ugwu et al., 2022)



Gambar 2.3 PLTA *pumped storage hydro*
Sumber: (Ugwu et al., 2022)

Setiap kategori tersebut memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda tergantung pada kondisi geografis dan kebutuhan energi di daerah tersebut (Setiawan et al., 2024).

2.2.2. Hidrologi pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Run of River (RoR)

Hidrologi merupakan komponen fundamental dalam perencanaan dan evaluasi kelayakan teknis PLTA, khususnya pada tipe RoR yang sangat bergantung pada kontinuitas dan variabilitas debit sungai. Berbeda dengan PLTA dengan reservoir besar, PLTA RoR mengandalkan aliran sungai harian atau musiman tanpa fasilitas penyimpanan signifikan, sehingga ketersediaan air sepanjang tahun menjadi faktor yang menentukan kelayakan teknis, produksi energi, dan stabilitas operasi pembangkit.

2.2.2.1. Konsep Dasar Hidrologi Sungai untuk PLTA Run of River

Hidrologi sungai adalah ilmu yang mempelajari pergerakan, distribusi, dan kualitas air dalam suatu daerah aliran sungai (DAS). Untuk PLTA RoR, beberapa elemen hidrologi yang menjadi perhatian utama meliputi:

1. Debit sungai (Q): Besaran volume aliran air per satuan waktu (m^3/s).
2. Variasi debit harian dan musiman: Karena PLTA RoR tidak dapat menyimpan air dan kapasitas produksi listrik bergantung langsung pada debit aktual.
3. Debit andalan adalah debit yang tersedia pada tingkat keandalan tertentu, misalnya debit 80% atau 90% waktu dalam setahun.
4. Potensi banjir dan debit ekstrem, karena mempengaruhi dimensi bangunan air dan kinerja pembangkitan.

Ketersediaan debit ini menentukan:

- Kapasitas turbin yang dapat dipasang,
- Dimensi bangunan sipil
- Durasi operasi tahunan
- Energi tahunan
- Faktor kapasitas pembangkit (*capacity factor*).

2.2.2.2. *Flow Duration Curve (FDC) dalam Analisis Hidrologi PLTA*

Flow Duration Curve (FDC) merupakan instrumen hidrologi utama dalam perencanaan PLTA ROR karena menggambarkan hubungan antara besarnya debit dan frekuensi kemunculannya (*exceedance probability*). FDC memberikan informasi menyeluruh tentang dinamika aliran sungai, termasuk variabilitas debit, durasi ketersediaan air, dan tingkat keandalan aliran (Ridolfi et al., 2020). Kemiringan kurva FDC menjadi indikator stabilitas hidrologi, kurva landai menunjukkan aliran stabil sepanjang tahun, sedangkan kurva curam menunjukkan ketidakpastian dan fluktuasi debit yang lebih tinggi.

Menurut (Yildiz et al., 2024), FDC berperan penting dalam menentukan debit desain yang optimal karena memungkinkan evaluasi performa teknis seperti potensi energi, jam operasi turbin, dan sensitivitas terhadap variasi hidrologi. FDC juga membantu mengidentifikasi debit dominan dan debit andalan (misalnya Q20, Q40, Q50, Q90), yang digunakan untuk menentukan batas operasi turbin dan menilai keandalan pembangkitan energi, di mana nilai “Qx” menunjukkan debit yang tersedia selama “x persen” dari total waktu. Debit andalan membantu menentukan batas minimal operasi turbin dan mengestimasi tingkat keandalan pembangkitan energi. Sejalan dengan (Ridolfi et al., 2020), debit-debit ini merupakan indikator kunci yang menjelaskan stabilitas dan ketersediaan sumber daya air dalam konteks operasional PLTA.

Dengan mengalikan debit pada setiap tingkat durasi dengan *head* efektif dan efisiensi turbin-generator, FDC menjadi dasar perhitungan energi tahunan PLTA. Oleh karena itu, FDC merupakan pondasi analisis hidrologi PLTA RoR karena memungkinkan penentuan debit desain yang efisien, estimasi energi tahunan, evaluasi faktor kapasitas, serta penilaian risiko hidrologi yang berpengaruh terhadap kelayakan teknis dan finansial proyek.

2.2.2.3. *Optimasi Debit dan Kapasitas Pembangkit*

Debit desain harus menghasilkan kombinasi yang optimal antara kapasitas terpasang (kW atau MW) dan energi tahunan (GWh). Nilai debit yang dipilih mempengaruhi:

- Faktor kapasitas (*capacity factor*, CF),
- Utilisasi turbin,

- Besaran energi yang dapat dijual, dan
- Stabilitas produksi tahunan.

Optimasi teknis dilakukan untuk memaksimalkan energi bersih yang dapat dibangkitkan tanpa menyebabkan oversizing kapasitas turbin.

2.2.2.4. *Aspek Ekonomi dan Biaya Investasi (CAPEX–OPEX)*

Debit desain memiliki implikasi langsung terhadap ukuran turbin, dimensi saluran air, powerhouse, dan komponen hidromekanikal lainnya. Pemilihan debit yang terlalu besar meningkatkan CAPEX secara tidak proporsional, sementara debit yang terlalu kecil mengurangi potensi pendapatan energi. Oleh karena itu, penentuan debit desain harus mempertimbangkan keseimbangan antara biaya investasi dan nilai ekonomi energi yang dihasilkan, termasuk indikator seperti NPV, IRR, PI, dan LCOE.

2.2.2.5. *Perhitungan Potensi Energi Pembangkit*

Persamaan dari kapasitas daya terpasang oleh PLTA dirumuskan sebagai berikut (Ugwu et al., 2022):

$$P = \rho \times 9.8 \times Q \times H_e \times \eta \quad (2.1)$$

Dimana:

P = Energi yang dibangkitkan dalam kW

ρ = Berat jenis air (1000kg/m^3) pada suhu 4 derajat dalam elevasi 0m dan 1 atm

9.8 = Nilai perkiraan percepatan jatuh bebas akibat gaya gravitasi.

Q = Debit pembangkitan (m^3/s)

H_e = Tinggi jatuh (m)

η = Efisiensi gabungan dari komponen-komponen seperti turbin dan generator.

Menurut (Ugwu et al., 2022), energi yang dihasilkan, yang dinyatakan dalam kilowatt jam (kWh), adalah energi listrik yang dihasilkan dari pengoperasian terus menerus daya P (kW) selama jangka waktu T (jam). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Annual\ Energi\ Output\ (kWh) = P \times hr \times CF \quad (2.2)$$

Dimana:

P = *Power Output* atau kapasitas terpasang yang dituangkan dalam kW

hr = Periode tahunan atau durasi dari pembangkitan listrik

CF = Faktor kapasitas PLTA

2.2.2.6. Faktor Kapasitas Pembangkit (*Capacity Factor*)

Faktor kapasitas (*capacity factor*, CF) merupakan indikator utama untuk menilai kinerja teknis PLTA, khususnya tipe *run of river* yang sangat bergantung pada fluktuasi debit sungai. CF didefinisikan sebagai rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan pembangkit selama satu tahun terhadap energi maksimum yang dapat dibangkitkan jika pembangkit beroperasi pada kapasitas terpasang selama 8.760 jam per tahun:

$$CF = \frac{E_{\text{aktual}}}{P_{\text{terpasang}} \times 8760} \quad (2.3)$$

Dimana:

E_{aktual} = energi listrik yang dihasilkan pembangkit selama satu tahun (kWh)

$P_{\text{terpasang}}$ = daya kapasitas terpasang (kW)

Pada PLTA RoR, nilai *capacity factor* (CF) sangat sensitif terhadap variabilitas debit harian dan musiman karena tidak adanya tampungan besar yang dapat mengatur aliran. Studi hidrologi oleh (Basso & Botter, 2012) menunjukkan bahwa variasi debit yang digambarkan melalui *Flow Duration Curve* (FDC) berpengaruh langsung terhadap jam operasi turbin, volume air yang dapat dimanfaatkan, dan energi tahunan yang dihasilkan, sehingga perubahan debit sungai menyebabkan fluktuasi faktor kapasitas. Penelitian tersebut menegaskan bahwa sungai dengan debit yang lebih stabil akan menghasilkan CF yang lebih tinggi, utilisasi turbin yang lebih baik, serta produksi energi yang lebih ekonomis.

Selanjutnya, analisis kinerja nyata dari 49 instalasi RoR skala kecil dan menengah di berbagai negara oleh (Lehneis et al., 2024) menunjukkan bahwa CF aktual berada pada kisaran 25% hingga 53%, bergantung pada stabilitas debit, efisiensi turbin, dan kecocokan antara debit desain dengan debit sungai.

Dengan demikian, *capacity factor* tidak hanya menjadi indikator performa teknis pembangkit, tetapi juga merupakan parameter fundamental yang memengaruhi energi yang dapat dijual, pendapatan tahunan proyek, serta hasil analisis kelayakan finansial seperti NPV dan IRR. CF yang stabil dan tinggi menunjukkan pemanfaatan air yang optimal, operasi turbin yang efisien, dan risiko pendapatan yang lebih rendah.

2.2.3. Kelayakan Finansial

2.2.3.1. Definisi dan Tujuan Analisis Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan finansial merupakan komponen penting dalam studi kelayakan proyek untuk menilai kemampuan proyek menghasilkan keuntungan yang layak secara ekonomi. Penilaian ini dilakukan melalui evaluasi sistematis terhadap indikator finansial utama seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Profitability Index* (PI), dan *Payback Period* (PP), yang dihitung berdasarkan proyeksi arus kas selama umur operasi proyek dibandingkan dengan biaya investasi dan biaya siklus hidupnya.

Tujuan utama analisis ini adalah menyediakan dasar pengambilan keputusan yang rasional bagi investor, pemilik proyek, maupun lembaga pembiayaan. Bagi investor, hasil analisis menentukan kelanjutan investasi, sedangkan bagi pembuat kebijakan analisis ini menjadi dasar penilaian efisiensi pendanaan dan dampak fiskal.

2.2.3.2. Estimasi Biaya Pembangkit

Biaya pembangkitan yang dinormalisasi (*Levelised Cost of Generation*) adalah total biaya kepemilikan selama masa pakai pembangkit yang telah didiskontokan, kemudian dikonversi menjadi biaya per unit energi pembangkitan dalam Rp/MWh atau Rp/kWh. Istilah ini kadang juga dikenal dengan istilah biaya daur hidup (*life cycle cost*), yang menekankan cakupan biaya dari awal hingga akhir (dari pembangunan hingga penghentian operasi) (Macdonald & House, 2010). Terdapat tiga komponen utama dalam perhitungan biaya levelised, antara lain (Macdonald & House, 2010):

- Biaya investasi (atau biaya modal) untuk membawa aset hingga siap beroperasi (*Capital Cost*).
- Biaya tetap yang berkelanjutan untuk menjaga ketersediaan pembangkit agar tetap dapat menghasilkan listrik (*Fix Operating Cost*).
- Biaya variabel yang terkait dengan operasional (*Variable Cost*).

Biaya Modal dan Investasi (*Capital Cost*)

Biaya modal dan investasi atau *capital cost* terdiri dari empat komponen utama yaitu:

- Paket peralatan dan instalasi utama, yang biasanya disebut sebagai harga *engineering, procurement and construction* (EPC), meskipun dalam praktiknya dapat terdiri dari beberapa paket. Hal penting yang perlu diperhatikan adalah ruang lingkup dari paket-paket ini serta premi risiko yang perlu ditambahkan.
- Biaya infrastruktur dan koneksi, termasuk penyediaan listrik, bahan bakar, dan sistem pendingin jika diperlukan. Besarnya komponen-komponen ini akan bergantung pada apakah kontrak EPC sudah mencakup atau tidak mencakup item-item tersebut.
- Biaya pengembangan, mencakup perizinan, jasa konsultasi, opsi/pembelian lahan. Dalam analisis biaya *levelized* (LCOE) ini, biaya lahan dikecualikan.
- Biaya bunga dan pendanaan selama masa konstruksi, di mana pendekatan standar adalah menerapkan satu tingkat diskonto untuk seluruh arus kas, termasuk jadwal pengeluaran modal selama konstruksi.

Biaya Operasi Tetap (*Fix Operating Cost*)

Komponen utama biaya operasi tetap meliputi:

- Tenaga kerja operasional.
- Pemeliharaan terencana dan tak terencana (meliputi tambahan tenaga kerja, suku cadang, dan bahan habis pakai).
- Pemeliharaan modal sepanjang masa operasi (yang bergantung pada umur waktu)
- Pajak properti, asuransi, dan biaya pemanfaatan jaringan listrik.

Biaya Variabel Operasi (*Variable Operating Cost*)

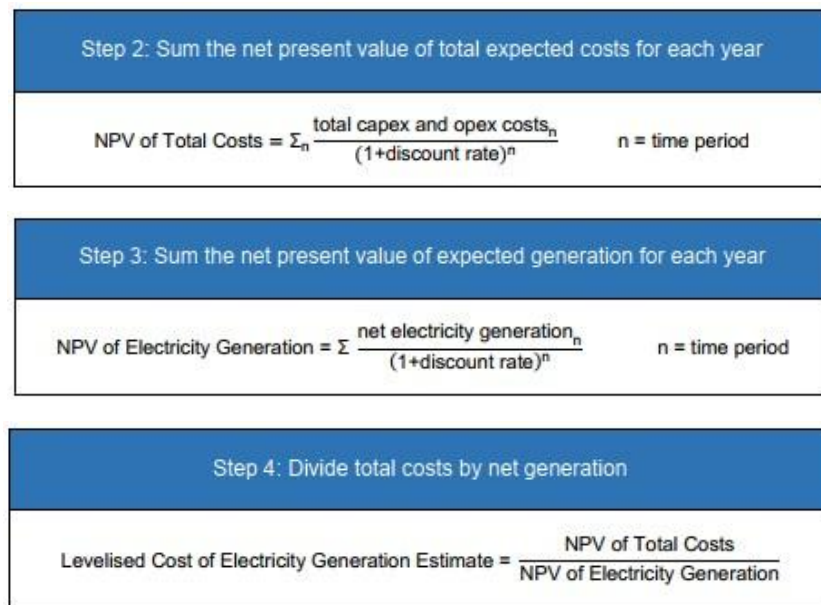
Biaya variabel operasi mencakup bahan bakar, biaya emisi karbon, pemeliharaan dan perbaikan yang terkait dengan output, serta biaya pembuangan dan pengolahan residu.

Levelized Cost of Electricity (LCOE)

Konsep perhitungan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) didasarkan pada pendekatan biaya sepanjang siklus hidup pembangkit yang telah disesuaikan dengan faktor diskonto selama periode operasionalnya (Macdonald & House, 2010). *Levelized Cost of Energy* (LCoE) adalah biaya energi listrik yang dihasilkan dari suatu sumber energi untuk mencapai titik impas dalam periode waktu tertentu. Biasanya, periode waktu ini ditentukan berdasarkan umur sistem pembangkit (Damiri & Nugraha, 2021). Menurut (Adi Wahyu, 2024), *Levelized Cost of Energy* (LCOE) adalah biaya rata-rata per kWh untuk energi listrik yang dihasilkan oleh sistem. LCOE umumnya dimanfaatkan sebagai alat pembandingan antar jenis pembangkit listrik. Nilai LCOE dinyatakan dalam satuan biaya per unit energi (Rp/kWh), di mana nilai ini dari seluruh pendapatan yang dihasilkan dari penjualan listrik dianggap setara dengan nilai kini dari seluruh biaya yang dikeluarkan selama masa operasional pembangkit.

Dalam perhitungan biaya energi listrik tahun 2020, Departemen Perdagangan, Energi, dan Strategi Industri (BEIS) Inggris menggunakan persamaan LCOE yang dikembangkan oleh (Macdonald & House, 2010). Perhitungan tersebut dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut (Department for Business, 2020):

Step 1: Gather Plant Data and Assumptions		
Capital Expenditure (Capex) Costs: • Pre-development costs • Construction costs* • Infrastructure costs* *adjusted over time for learning	Operating Expenditure (Opex) Costs: • Fixed opex* • Variable opex • Insurance • Connection costs • Carbon transport and storage costs • Decommissioning fund costs • Heat revenues • Fuel prices • Carbon costs	Expected Generation Data: • Capacity of plant • Expected availability • Expected efficiency • Expected Load Factor* (all assume baseload generation with no curtailment)



Gambar 2.4 Langkah – langkah Perhitungan LCOE berdasarkan BEIS
Sumber: (Department for Business, 2020)

2.2.3.3. Keputusan Investasi

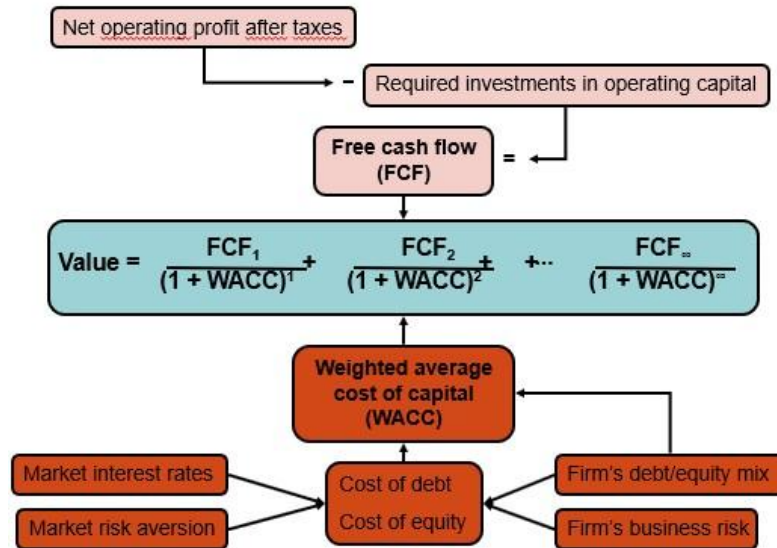
Keputusan pengembangan proyek merupakan bagian dari keputusan investasi, yaitu proses pengalokasian sumber daya keuangan maupun non-keuangan untuk menghasilkan manfaat ekonomi di masa mendatang. Keputusan ini bersifat strategis karena melibatkan analisis risiko, proyeksi arus kas, serta estimasi tingkat pengembalian yang diharapkan (Gitman & Zutter, 2015; Brigham & Ernhardt, 2020).

Menurut teori Modigliani–Miller, keputusan investasi pada aset fisik jangka panjang ditujukan untuk mencapai dua sasaran utama, yaitu memaksimalkan profitabilitas dan meningkatkan nilai pasar perusahaan (Saputra Y, 2021).

Suatu investasi dianggap menguntungkan apabila tingkat pengembalian yang diharapkan melebihi tingkat bunga, sehingga memberikan keuntungan bersih bagi pemilik perusahaan. Selain itu, nilai perusahaan akan meningkat apabila tambahan nilai yang dihasilkan oleh aset tersebut melampaui biaya perolehannya.

Nilai intrinsik perusahaan ditentukan oleh nilai kini dari seluruh proyeksi arus kas bebas di masa depan yang didiskon menggunakan *Weighted Average Cost of Capital* (WACC). Dengan demikian, penetapan biaya modal melalui perhitungan WACC

menjadi aspek yang sangat penting dalam menentukan kelayakan suatu proyek investasi, sebagaimana ditunjukkan pada ilustrasi berikut (Brigham & Ernhardt, 2020):



Gambar 2.5 Penentuan Nilai Intrinsik Perusahaan
Sumber: (Brigham & Ernhardt, 2020)

2.2.3.4. Penganggaran Modal (*Capital Budgeting*)

Penganggaran modal (*capital budgeting*) adalah proses evaluasi dan pemilihan proyek investasi yang akan dimasukkan dalam rencana anggaran perusahaan, yaitu penilaian atas pengeluaran aset yang diperkirakan menghasilkan arus kas masuk selama lebih dari satu tahun (Brigham & Houston, 2019).

Cost of Capital

Modal investasi umumnya berasal dari utang, saham preferen, dan ekuitas biasa. Para investor mengharapkan tingkat pengembalian minimum atas dana yang mereka tanamkan, yang disebut biaya modal (*cost of capital*), setara dengan return dari investasi lain dengan risiko serupa. Untuk mengestimasi tingkat pengembalian yang diharapkan tersebut, digunakan pendekatan *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) atau biaya modal rata-rata tertimbang. Persamaan umum berikut ini digunakan dalam pendekatan metode WACC (Brigham & Houston, 2019):

$$WACC = w_d \cdot r_d(1-T) + w_p \cdot r_p + w_c \cdot r_e \quad (2.4)$$

Dimana:

- w_d = Proporsi sasaran utang
- r_d = Biaya utang sebelum pajak
- T = Pajak
- r_p = Proporsi saham preferen
- r_p = Saham preferen
- w_e = Proporsi ekuitas biasa
- r_e = Biaya ekuitas biasa

Biaya Utang (*Cost of Debt*)

Suku bunga yang dibebankan kepada perusahaan untuk utang baru dikenal sebagai biaya utang sebelum dikurangi pajak (*before tax cost of debt*), r_d . Biaya utang setelah pajak adalah komponen biaya utang yang dianggap relevan, karena bunga dapat diperhitungkan sebagai pengurang dalam perhitungan pajak. Biaya utang ini digunakan sebagai bagian dalam perhitungan WACC, dan rumus untuk menentukan *Cost of Debt* adalah sebagai berikut (Brigham & Houston, 2019):

$$\text{Cost of debt} = r_d (1 - T) \quad (2.5)$$

Dimana:

- r_d = biaya utang sebelum pajak
- T = pajak

Biaya Modal (*Cost of Equity*)

Metode yang umum dipakai untuk mengestimasi nilai biaya ekuitas biasa atau *cost of equity* (r_e) merupakan model *Capital Asset Pricing Model* (CAPM). CAPM merupakan pendekatan yang menggambarkan keterkaitan antara tingkat pengembalian dari suatu aset yang mengandung risiko dengan tingkat risiko yang terkait dengan aset tersebut, dalam situasi pasar yang berada pada keseimbangan. Persamaan matematis dari metode CAPM adalah sebagai berikut:

$$r_e = r_{RF} + (RP_M)\beta \quad (2.6)$$

r_e = *Cost of equity* (tingkat bunga ekuitas)

r_{RF} = *Risk free rate* (tingkat bunga bebas risiko)

RP_M = Premi risiko pasar atau *market risk premium*

β = Koefisien beta

Premi risiko pasar dirumuskan dengan tingkat pengembalian yang diminta dari suatu portofolio (r_M) dikurangi *risk free rate* (r_{RF}), $RP_M = r_M - r_{RF}$. Nilai ini juga kerap disebut sebagai *equity risk premium*. Estimasi terhadap tingkat pengembalian pasar yang disyaratkan (*required rate of return*) dapat dilakukan melalui tiga pendekatan, (Saputra Y, 2021) yaitu:

- Berdasarkan data historis dari *risk premium* yang telah terjadi di masa lalu.
- Menggunakan informasi nilai pasar saat ini untuk memproyeksikan nilai di masa mendatang.
- Mengandalkan hasil survei yang diperoleh dari sumber-sumber yang memiliki keahlian atau pengalaman di bidang terkait.

Beta pasar (β) mencerminkan besaran risiko yang ditimbulkan oleh suatu saham individu terhadap keseluruhan portofolio pasar. Dalam konteks investasi proyek, nilai beta menunjukkan tingkat keterkaitan antara pengembalian aset dengan pengembalian portofolio pasar. Estimasi nilai beta dapat dilakukan dengan merujuk pada data historis beta dari perusahaan atau proyek yang memiliki karakteristik serupa.

2.2.3.5. Menilai Kelayakan Proyek

Terdapat beberapa prosedur yang digunakan dalam melakukan evaluasi kelayakan finansial suatu proyek investasi apakah diterima atau ditolak (Brigham & Ernhardt, 2020), yaitu:

1. *Net Present Value* (NPV)
2. *Internal Rate of Return* (IRR)
3. *Modified Internal Rate of Return* (MIRR)
4. *Profitability Indeks* (PI)
5. *Regular Payback*

6. Discounted Payback

Namun, metode NPV dan IRR merupakan 2 prosedur yang paling umum digunakan dalam menilai tingkat kelayakan proyek. Pada penelitian ini evaluasi kelayakan finansial yang dilakukan hanya NPV, IRR, PI, dan *Regular Payback* atau *Payback Period*.

Net Present Value (NPV) (Nilai Sekarang Neto)

Net Present Value (NPV) atau nilai sekarang netto didefinisikan sebagai nilai saat ini dari proyeksi arus kas yang diinginkan akan dihasilkan oleh suatu proyek, termasuk biaya investasi awal yang dikeluarkan yang didiskonto menggunakan tingkat diskonto yang disesuaikan dengan risiko. NPV mengukur seberapa banyak nilai yang dapat dihasilkan oleh suatu proyek bagi pemegang saham. Dalam proses pengambilan keputusan terkait proyek mana yang akan diterima, NPV sering dianggap sebagai kriteria utama yang paling baik (Brigham & Ernhardt, 2020).

Dari sudut pandang praktis, jika nilai NPV lebih besar dari nol, maka investasi dianggap layak dan menguntungkan, sebaliknya, NPV negatif menunjukkan bahwa proyek tidak layak dari perspektif finansial (Zakia et al., 2023).

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020)(Qosim & Hariyati, 2021)(Saputro Adi & Azizi Haekal Yundi, 2023), persamaan dari NPV dapat dilihat dibawah ini:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \frac{CF_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{CF_N}{(1+r)^N} \quad (2.7)$$

$$= \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (2.8)$$

Dari persamaan di atas, CF_t adalah proyeksi arus kas bersih pada periode ke-t, dengan r sebagai tingkat biaya modal dari proyek tersebut yang telah disesuaikan dengan risiko (atau WACC), dan N adalah umur atau jangka waktu proyek tersebut.

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020), aturan pengambilan keputusan investasi proyek berdasarkan NPV adalah hanya proyek dengan nilai NPV positif yang dapat diterima.

Internal Rate of Return (IRR) (Tingkat Pengembalian Internal)

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020), *Internal Rate of Return* (IRR) dari suatu proyek merupakan suku bunga diskonto yang menyamakan nilai kini dari arus kas masa depan dengan jumlah biaya investasi awal. Dengan kata lain, IRR adalah suku bunga diskonto di mana NPV proyek menjadi nol.

Berdasarkan definisi tersebut, IRR merupakan tingkat pengembalian yang diperoleh ketika nilai NPV sama dengan nol. IRR dihitung berdasarkan penerimaan bersih dan keseluruhan dana yang dibutuhkan untuk investasi. Mengetahui nilai IRR menjadi hal krusial dalam mengevaluasi sejauh mana proyek dapat didanai, dengan memperhitungkan tingkat suku bunga pinjaman yang berlaku.

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020), formulasi IRR dirumuskan sebagai berikut:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+IRR)^1} + \frac{CF_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{CF_N}{(1+IRR)^N} = 0 \quad (2.9)$$

atau dapat disederhanakan menjadi:

$$\sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (2.10)$$

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020), aturan pengambilan keputusan investasi proyek berdasarkan IRR adalah proyek dapat dapat disetujui apabila nilai IRR melebihi WACC dari proyek tersebut.

Project IRR

Internal Rate of Return (IRR) proyek dihitung berdasarkan arus kas yang dihasilkan oleh proyek sebelum dilakukan pembayaran pinjaman dan pajak, serta mencerminkan tingkat pengembalian atas keseluruhan investasi tunai yang dibutuhkan, baik dari sumber utang maupun *ekuitas*. Namun, dalam konteks pembiayaan proyek, *Project IRR* memiliki keterbatasan relevansi karena tidak mempertimbangkan struktur pendanaan. Salah satu tujuan utama penggunaan pinjaman dalam proyek adalah untuk meningkatkan tingkat pengembalian *ekuitas*. Oleh karena itu, perhitungan *Project IRR* dilakukan tanpa memperhitungkan pengaruh dari penggunaan dana pinjaman.

Equity IRR

Internal Rate of Return (IRR) equity dihitung sebagai pengembalian keuntungan atas investasi yang dilakukan oleh investor. Dalam praktiknya, investor menggunakan *Equity IRR* sebagai indikator utama untuk menilai kelayakan investasi, yakni dengan membandingkan nilainya terhadap tingkat pengembalian minimum (*hurdle rate*) yang telah ditetapkan. Jika *Equity IRR* melebihi *hurdle rate*, maka, proyek dianggap memenuhi kelayakan untuk dilaksanakan; sebaliknya, jika nilainya lebih rendah, maka investasi tersebut sebaiknya tidak dilakukan.

Profitability Index (PI)

Menurut (Brigham & Ernhardt, 2020), *Profitability Index (PI)* atau *Indeks Profitabilitas* mengukur seberapa besar nominal yang diciptakan oleh suatu proyek untuk setiap satu dolar dari biaya proyek tersebut. PI dihitung dengan rumus sebagai berikut (Prabawa Wisnu & Shidqi Ahsin, 2024):

$$PI = \frac{\text{PV of future cash flows}}{\text{Initial Cost}} = \sum_{t=1}^N \frac{\frac{CF_t}{(1+r)^t}}{CF_0} \quad (2.11)$$

Sebuah proyek dinyatakan layak untuk diterima apabila nilai *Profitability Index (PI)* melebihi 1,0. Proyek dengan *Profitability Index (PI)* yang lebih tinggi sebaiknya diprioritaskan atau ditempatkan pada peringkat lebih tinggi dibandingkan proyek dengan PI yang lebih rendah.

Secara umum, metode NPV, IRR, dan PI menghasilkan keputusan yang konsisten untuk proyek berkarakteristik normal dan saling independen. NPV positif akan selalu diikuti IRR yang melebihi tingkat diskonto dan PI yang lebih dari 1. Namun, pada proyek-proyek yang saling eksklusif dengan perbedaan besar investasi atau pola arus kas, ketiga metode dapat memberikan peringkat yang berbeda. Dalam kondisi demikian, NPV dianggap sebagai dasar penilaian yang paling akurat dan harus dijadikan acuan utama.

Payback Period (Periode Pengembalian Investasi)

Menurut (Brigham & Daves, 2007), (Brigham & Ernhardt, 2020), dalam konteks historis, kriteria awal dalam proses seleksi yang digunakan dalam evaluasi penganggaran modal atau *capital budgeting* adalah periode pengembalian investasi atau (*payback period*), yang diartikan sebagai lamanya waktu, dalam satuan tahun, yang

dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi awal suatu proyek melalui arus kas yang dihasilkan dari operasionalnya.

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam perhitungan periode pengembalian investasi (*Payback Period*):

$$\text{Payback Period} = \text{Jumlah tahun sebelum pelunasan penuh} + \frac{\text{Biaya yang belum dilunasi pada awal tahun}}{\text{Arus kas sepanjang tahun pelunasan penuh}} \quad (2.12)$$

Makin singkat periode pengembalian investasi akan makin baik (Brigham & Houston, 2019). Tidak terdapat batas baku *Payback Period* untuk proyek PLTA RoR, namun berbagai studi menunjukkan bahwa PLTA skala kecil umumnya dianggap layak apabila *Payback Period* masih jauh di bawah umur proyek (25–40 tahun) dan IRR lebih besar daripada tingkat diskonto. (Girma, 2016) melaporkan proyek *small hydropower* di Sungai Kulfo, Ethiopia, dengan *Payback Period* 12,4 tahun dan IRR 12,9% yang dinyatakan layak dibangun. Bahkan (Bhandari et al., 2023) menunjukkan bahwa proyek mikrohidro dengan *Payback Period* 15,37 tahun masih dinilai layak secara ekonomi. Menurut (Tomczyk et al., 2025), *Payback Period* PLTA yang dipasang pada instalasi pengolahan air limbah di Toruń, Polandia untuk skenario “riil”, berkisar antara 10,75–23,74 tahun, sedangkan skenario “teoretis” menunjukkan *Payback Period* jauh lebih cepat, yaitu 5,06–5,32 tahun. Berdasarkan literatur tersebut, penelitian ini menggunakan kisaran 10–15 tahun sebagai acuan *Payback Period* yang masih dapat diterima bagi PLTA RoR, dengan tetap mengutamakan indikator NPV dan IRR sebagai kriteria utama kelayakan.

Beberapa indikator kelayakan finansial di atas saling melengkapi dalam memberikan gambaran menyeluruh terhadap kelayakan finansial proyek. Dalam konteks proyek PLTA RoR, penggunaan indikator-indikator ini sangat relevan untuk mengukur efisiensi dan prospek pengembalian modal dalam jangka panjang, terutama karena proyek energi terbarukan memerlukan biaya investasi awal yang besar namun menjanjikan manfaat jangka panjang yang stabil dan berkelanjutan.

2.2.4. Integrasi Mekanisme Article 6 Perjanjian Paris dalam Analisis Finansial

Mekanisme pasar karbon merupakan salah satu instrumen ekonomi dalam kerangka *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), lembaga di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) yang dibentuk untuk menanggapi tantangan perubahan iklim global. UNFCCC berperan dalam merancang dan mengoordinasikan pelaksanaan kebijakan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) melalui berbagai konvensi internasional, termasuk Protokol Kyoto (1997) dan Perjanjian Paris (2015).

Dalam perkembangan kebijakan iklim global, mekanisme *Clean Development Mechanism* (CDM) yang sebelumnya diatur dalam Protokol Kyoto kini telah berevolusi menjadi mekanisme *Article 6* di bawah Perjanjian Paris. Jika CDM memungkinkan negara berkembang untuk menghasilkan *Certified Emission Reductions (CERs)* yang dapat dijual kepada negara maju, maka *Article 6* memberikan kerangka kerja yang lebih luas dan inklusif, di mana semua negara baik maju maupun berkembang dapat berpartisipasi dalam perdagangan karbon melalui skema *Internationally Transferred Mitigation Outcomes* (ITMOs) dan *Article 6.4 Emission Reductions (A6.4ERs)* (UNFCCC, 2021).

Mekanisme ini memungkinkan proyek-proyek mitigasi, termasuk sektor energi terbarukan seperti PLTA, untuk memperoleh manfaat ekonomi dari hasil pengurangan emisi karbon yang terverifikasi. Proyek PLTA tipe ROR berpotensi besar dikategorikan sebagai kegiatan mitigasi dalam kerangka *Article 6.4* karena menghasilkan listrik bersih dengan emisi GRK yang sangat rendah. Pengurangan emisi tersebut dapat dikonversi menjadi unit *Article 6.4 Emission Reductions (A6.4ERs)* yang setara dengan pengurangan satu ton CO₂ per unit, dan selanjutnya dapat diperdagangkan dalam pasar karbon internasional (UNFCCC, 2021).

Selain mendukung pencapaian NDC Indonesia dan target NZE 2060, mekanisme ini juga membuka peluang tambahan pendapatan bagi pengembang proyek melalui penjualan kredit karbon. Pendapatan ini dapat diintegrasikan ke dalam analisis finansial proyek sebagai *carbon revenue*, sehingga meningkatkan nilai indikator kelayakan seperti NPV dan IRR.

Dengan demikian, integrasi mekanisme *Article 6* Perjanjian Paris dalam pengembangan proyek energi terbarukan seperti PLTA Watunohu di Kolaka bukan hanya berperan dalam menurunkan emisi GRK, tetapi juga menjadi strategi efektif untuk memperkuat pembiayaan hijau (*green financing*) dan mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon secara nasional maupun global.

2.2.5. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dalam konteks investasi merupakan metode yang digunakan untuk mengukur sejauh mana hasil atau pendapatan suatu proyek dipengaruhi oleh perubahan dalam variabel tertentu. Menurut (Dharmika et al., 2023), analisis sensitivitas adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi dampak perubahan variabel terhadap efektivitas investasi dan tingkat profitabilitas yang diperoleh. Dalam analisis ini, variabel yang dimasukkan dapat berupa biaya, pendapatan, dan faktor eksternal lainnya yang dapat berubah selama periode investasi. Melalui penerapan analisis sensitivitas, investor dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam di mana letak dari risiko terbesar dan bagaimana mengatasi potensi kerugian finansial di masa depan.

Analisis sensitivitas bertujuan untuk menentukan variabel-variabel utama yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap hasil akhir evaluasi kelayakan finansial, seperti NPV, IRR, PI dan PP. Dengan melakukan perubahan nilai pada satu variabel sementara variabel lainnya tetap konstan, investor atau pengambil keputusan dapat melihat potensi perubahan terhadap hasil kelayakan. Hal ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam terhadap tingkat ketergantungan proyek pada parameter-parameter tertentu.

Dengan mempertimbangkan berbagai manfaat tersebut, analisis sensitivitas menjadi komponen wajib dalam studi kelayakan investasi, terutama untuk proyek-proyek strategis dan padat modal seperti PLTA ROR. Penggunaan analisis ini tidak hanya memperkuat argumen kelayakan finansial, tetapi juga meningkatkan kepercayaan stakeholder terhadap ketangguhan rencana investasi yang diusulkan.

2.3. Kerangka Pemikiran

Pembangunan PLTA Watunohu di Kolaka Utara merupakan bagian dari program pengembangan energi baru terbarukan (EBT) yang dicanangkan PT PLN (Persero) untuk memperkuat pasokan listrik nasional dan mempercepat transisi menuju sistem energi rendah emisi. Sebagai proyek strategis dalam RUPTL 2025–2034, PLTA ini membutuhkan kajian ulang kelayakan finansial yang mempertimbangkan efisiensi teknis, risiko investasi, dan keberlanjutan ekonominya.

Penelitian ini menggunakan data teknis dan finansial dari *Feasibility Study* (FS) terdahulu sebagai data sekunder. Aspek pasar, hukum, dan lingkungan tidak dianalisis dalam penelitian ini. Informasi mengenai DAS, debit Sungai Watunohu, FDC, *head netto*, efisiensi peralatan, serta ringkasan desain sipil, mekanikal, elektrik, dan jaringan transmisi digunakan sebagai dasar teknis tanpa dilakukan perhitungan ulang secara rinci, melainkan sebagai data pendukung untuk menjaga konsistensi dengan perencanaan yang telah ditetapkan dalam FS terdahulu.

Interpretasi hidrologi sungai Watunohu dilakukan untuk menggambarkan karakteristik DAS dan pola debit Sungai Watunohu berdasarkan FS terdahulu, termasuk analisis *Flow Duration Curve* (FDC) untuk menilai distribusi dan ketersediaan debit andalan sepanjang tahun. Data FDC tersebut kemudian digunakan untuk menyusun beberapa alternatif debit yang menjadi dasar optimasi debit desain guna menentukan debit paling optimal dalam menghasilkan energi tahunan terbesar, faktor kapasitas memadai, dan performa finansial terbaik, dengan parameter teknis lainnya tetap mengacu pada FS terdahulu.

Hasil optimasi debit desain selanjutnya menjadi dasar perhitungan kelayakan finansial menggunakan empat indikator utama, yaitu NPV, IRR, PI, dan PP, yang dianalisis pada dua skenario: skenario dasar (tanpa pendapatan eksternal) dan skenario integrasi kredit karbon melalui *Article 6 Paris Agreement*. Perbandingan kedua skenario ini dilakukan untuk menilai sejauh mana pendapatan dari kredit karbon dapat meningkatkan profitabilitas dan keekonomian proyek PLTA.

Untuk memperkuat analisis finansial, dilakukan analisis sensitivitas terhadap tiga variabel yang paling mempengaruhi stabilitas investasi, yaitu biaya investasi awal, faktor kapasitas pembangkit, dan kurs Rupiah terhadap Dolar. Analisis ini memberikan

gambaran realistis mengenai ketahanan finansial proyek terhadap fluktuasi ekonomi dan variasi kinerja operasional, serta mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap perubahan indikator kelayakan.

Kerangka pemikiran penelitian ini tersusun secara logis dari:

1. Interpretasi hidrologi sungai Watunohu
2. Interpretasi FDC dari FS terdahulu
3. Optimasi debit desain berbasis FDC
4. Integrasi data teknis dari FS
5. Analisis finansial dua skenario
6. Analisis sensitivitas tiga variabel utama
7. Sintesis hasil untuk menilai kelayakan finansial PLTA Watunohu secara komprehensif.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang realistis dan terukur mengenai kelayakan finansial PLTA Watunohu, sekaligus mendukung strategi PLN dalam pengembangan infrastruktur energi bersih yang efisien, ekonomis, dan berkontribusi terhadap target transisi energi nasional.

2.4. Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah, serta kerangka pemikiran penelitian yang telah disusun, maka hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Hipotesis 1 (H1)

Interpretasi hidrologi sungai dalam dokumen *Feasibility Study* (FS) terdahulu menunjukkan bahwa debit Sungai Watunohu memadai untuk mendukung operasi PLTA RoR, dan analisis optimasi debit desain dari data *Flow Duration Curve* (FDC) menghasilkan debit optimum yang mampu meningkatkan produksi energi tahunan, faktor kapasitas pembangkit, serta memberikan dampak positif terhadap indikator kelayakan finansial proyek.

2. Hipotesis 2 (H2):

Proyek PLTA Watunohu di Kolaka dinilai layak secara finansial berdasarkan indikator kelayakan investasi, yaitu *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Profitability Index* (PI), dan *Payback Period* (PP), baik pada skenario dasar (*base case*) maupun pada skenario integrasi kredit karbon melalui mekanisme *Article 6* Perjanjian Paris.

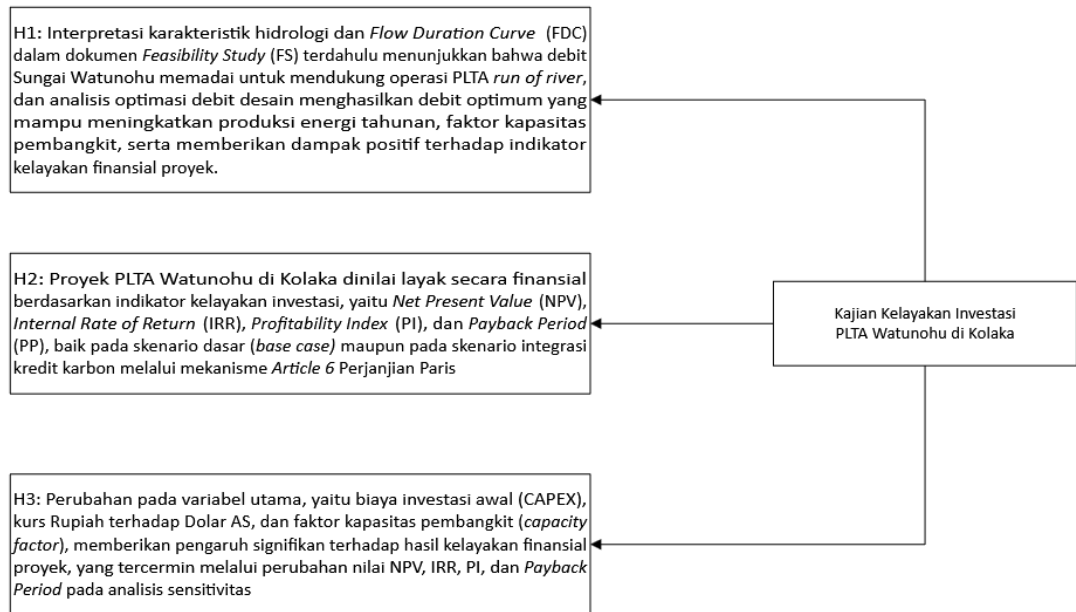
Dengan demikian, proyek diperkirakan mencapai nilai NPV positif, IRR di atas nilai WACC, $PI > 1$, serta *Payback Period* yang berada dalam batas kewajaran proyek EBT.

3. Hipotesis 3 (H3):

Perubahan pada variabel utama, yaitu biaya investasi awal (CAPEX), faktor kapasitas pembangkit (*capacity factor*), dan kurs Rupiah terhadap Dolar AS, memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil kelayakan finansial proyek, yang tercermin melalui perubahan nilai NPV, IRR, PI, dan *Payback Period* pada analisis sensitivitas.

Dengan demikian, perubahan ketiga variabel tersebut diperkirakan menyebabkan variasi yang nyata pada indikator kelayakan finansial.

Pengujian ketiga hipotesis tersebut dilakukan melalui pendekatan analitis yang diilustrasikan dalam kerangka pemikiran penelitian sebagai berikut:



Gambar 2.6 Hipotesis