

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

1.1.1 Konteks Global dan Nasional: Trilema Energi, Komitmen Iklim dan Paradoks Pembangunan Desa

Peradaban modern berdiri di atas komponen penting yaitu energi. Namun, komponen tersebut yang selama satu abad terakhir didukung oleh bahan bakar fosil kini menunjukkan dampak yang mengkhawatirkan. Dunia dihadapkan pada trilemma energi: bagaimana menyeimbangkan keamanan energi, keadilan energi, dan keberlanjutan lingkungan. Kegagalan menyeimbangkan trilemma ini telah menyebabkan krisis iklim global, yang mendorong terciptanya perjanjian internasional seperti Perjanjian Paris, di mana negara-negara berjanji untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Di dalam komitmen ini terdapat suatu keharusan yang tak terelakkan: transisi energi, pergeseran fundamental dari sistem energi berbasis bahan bakar fosil ke sistem yang didominasi oleh sumber energi bersih dan terbarukan.

Indonesia, sebagai salah satu negara dengan populasi terbesar dan ekonomi yang berkembang pesat, berada di pusat tantangan ini. Di satu sisi, pemerintah sangat berkomitmen terhadap perjanjian iklim global, yang ditunjukkan oleh dokumen Kontribusi Nasional yang Ditentukan (NDC) yang menetapkan target penurunan emisi yang signifikan. Rencana Energi Nasional (RUEN) adalah kebijakan nasional yang mewujudkan komitmen ini. Rencana tersebut menetapkan bahwa campuran sumber energi terbarukan harus meningkat menjadi 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Tujuan ini menunjukkan bahwa betapa pentingnya mengurangi karbon untuk masa depan negara.

Namun, di sisi lain, Indonesia menghadapi paradoks pembangunan. Meskipun perekonomian tumbuh pesat di kota-kota besar, jutaan orang di daerah pedesaan, terpencil, dan pulau-pulau terluar masih kesulitan mendapatkan akses energi. Rasio elektrifikasi nasional, yang mendekati 100%, seringkali menyembunyikan kenyataan di lapangan, di mana kualitas listrik masih tidak dapat

diandalkan, durasi pemadaman listrik terbatas, dan biaya energi (terutama dari generator diesel) menjadi beban besar bagi rumah tangga. Ketergantungan pada jaringan listrik PLN yang didominasi batu bara juga menciptakan dilema: upaya memperluas akses energi secara konvensional justru berpotensi meningkatkan jejak karbon nasional, bertentangan dengan komitmen iklim yang telah dicanangkan. Situasi ini menyoroti kebutuhan mendesak akan solusi energi terdesentralisasi berbasis sumber daya terbarukan dan lokal, yang tidak hanya menyelesaikan masalah akses tetapi juga sejalan dengan agenda keberlanjutan.

1.1.2 Paradigma Nexus Air-Energi-Pangan dan Valuasi Jasa Ekosistem

Dalam pencarian solusi pemenuhan akses energi terbarukan di pedesaan seringkali menemui jalan buntu. Diperlukan pendekatan yang lebih holistik dan terintegrasi untuk memahami kompleksitas sistem di daerah pedesaan. Di sinilah paradigma Nexus Air-Energi-Pangan (*Water-Energy-Food Nexus*) dapat menjadi sudut pandang untuk analisa yang kuat. Kerangka kerja ini, seperti yang dijelaskan oleh para akademisi seperti McNabola et al. (2022), tidak lagi menganggap air, energi, dan pangan sebagai tiga sektor yang terpisah, tetapi sebagai sebuah sistem yang saling bergantung dan terhubung erat. Intervensi di salah satu domain—misalnya, perubahan praktik pengelolaan lahan dan air—akan menimbulkan efek berantai (*cascading effects*) pada ketersediaan energi dan ketahanan pangan.

Penelitian ini secara fundamental mengadopsi paradigma Nexus tersebut. Kisah di Dusun Geneng, Wonogiri, adalah manifestasi nyata dari hubungan Nexus ini. Degradasi hutan di masa lalu tidak hanya menyebabkan krisis air (sektor air), tetapi juga mengancam produktivitas pertanian (sektor pangan) dan menghilangkan potensi sumber energi terbarukan (sektor energi). Di sisi lain, upaya Mbah Sadiman dan masyarakat dalam merehabilitasi hutan merupakan pengaruh positif di bidang air dan tanah, yang secara teori membuka peluang baru di bidang energi.

Penelitian ini berusaha untuk mengapresiasi layanan ekosistem. Hutan yang sehat menyediakan banyak “layanan” yang seringkali tidak terlihat dan tidak dihargai dalam perhitungan ekonomi konvensional. Layanan-layanan ini meliputi pengaturan siklus hidrologi, pencegahan erosi, penyerapan karbon, dan perlindungan keanekaragaman hayati. Upaya Mbah Sadiman pada dasarnya

merupakan investasi jangka panjang untuk memulihkan layanan hidrologi ekosistem. Tujuan penelitian ini adalah untuk melangkah lebih jauh: mengukur salah satu layanan tersebut (mengatur aliran air) dan mengonversinya menjadi unit mata uang yang sangat konkret dan berharga, yaitu listrik (kWh). Dengan demikian, konservasi tidak lagi hanya dilihat sebagai aktivitas ekologi atau biaya; melainkan juga sebagai investasi produktif yang memberikan “dividen” yang dapat dipanen untuk kepentingan masyarakat.

1.1.3 Manghubungkan Konservasi, Hidrologi, dan Energi Terbarukan

Penting untuk menempatkan studi ini dalam konteks pengetahuan yang ada guna membangun argumen penelitian yang kuat. Tiga bidang literatur utama menjadi relevan: (1) studi tentang dampak perubahan penggunaan lahan terhadap hidrologi; (2) metodologi untuk menilai potensi energi mikrohidro; dan (3) studi tentang implementasi energi terbarukan berbasis komunitas.

- Dampak Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Respon Hidrologis DAS

Secara ilmiah, telah menjadi konsensus bahwa penggunaan lahan merupakan salah satu variabel pengendali utama dalam siklus hidrologi sebuah DAS. Hutan, dengan kanopi, serasah, dan sistem perakarannya yang kompleks, berfungsi seperti spons raksasa: mencegat presipitasi, meningkatkan laju infiltrasi air ke dalam tanah, mengisi ulang akuifer air tanah, dan melepaskannya secara perlahan sebagai aliran dasar (*baseflow*). Konsekuensinya, DAS yang berhutan lebat cenderung memiliki rezim aliran yang lebih stabil, dengan debit puncak saat musim hujan yang lebih rendah dan debit musim kemarau yang lebih tinggi dan andal.

Literasi modern telah beralih dari pengamatan kualitatif ke kuantifikasi yang canggih menggunakan pemodelan hidrologis. Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) telah menjadi salah satu instrumen yang paling banyak digunakan dan divalidasi secara global untuk tujuan ini. Studi oleh Schwärzel et al. (2019) di *Science of The Total Environment* (Q1) secara meyakinkan menunjukkan melalui skenario pemodelan SWAT di Brasil bahwa reforestasi secara signifikan meningkatkan komponen aliran dasar dan mengurangi erosi. Serupa dengan itu, penelitian oleh Xiong et al. (2023) di *Journal of Hydrology* (Q1) secara cemerlang menggunakan SWAT untuk memisahkan dampak perubahan iklim dari dampak

aktivitas manusia, membuktikan kemampuan model ini untuk melakukan atribusi kausal yang menjadi inti dari hipotesis penelitian ini. Lebih lanjut, Guo et al. (2025) dalam jurnal *Catena* (Q1) memberikan nuansa penting bahwa tidak semua restorasi vegetasi itu sama; jenis tanaman dan pola spasialnya sangat menentukan besaran dampak hidrologisnya. Literatur-literatur ini secara kolektif menegaskan bahwa hubungan kausal antara restorasi hutan dan perbaikan hidrologi dapat diukur dan dimodelkan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi.

- Asesmen Potensi dan Kelayakan Energi Mikrohidro

Energi potensial dari pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) tipe aliran sungai bergantung pada dua parameter utama: laju aliran air (Q) dan ketinggian jatuhnya air (H). Ketinggian jatuhnya air (head) merupakan variabel yang relatif statis, sedangkan aliran air sangat dinamis. Oleh karena itu, asesmen potensi yang akurat tidak dapat hanya mengandalkan debit rata-rata. Literatur teknis modern menekankan penggunaan Kurva Durasi Aliran (FDC) sebagai standar emas. FDC adalah grafik yang menunjukkan persentase waktu di mana nilai debit tertentu melebihi batas. Dari kurva ini, Anda dapat menentukan aliran yang dapat diandalkan, seperti Q_{90} atau Q_{95} , yang menjadi dasar untuk menghitung kapasitas terpasang pembangkit listrik agar dapat beroperasi secara konsisten.

Klein & Fox (2022) menyajikan tinjauan komprehensif dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Q1) mengenai berbagai metodologi untuk menilai potensi mikrohidro. Mereka menyoroti bahwa integrasi Sistem Informasi Geografis (GIS) dan model hidrologi (seperti SWAT) saat ini merupakan pendekatan paling canggih dan akurat. Studi kasus oleh Joshi & Mishra (2024) dalam *Energy for Sustainable Development* (Q2) menjadi contoh yang relevan, menggunakan output dari model hidrologi untuk menghasilkan FDC dan menilai potensi PLTMH di wilayah aliran sungai Himalaya. Literatur ini mengkonfirmasi bahwa metodologi yang akan digunakan dalam penelitian ini—yaitu menautkan luaran model SWAT dengan analisis FDC untuk menghitung potensi energi—adalah pendekatan yang sah dan sesuai dengan praktik terbaik (*state-of-the-art*) di bidangnya.

- Implementasi dan Keberlanjutan Energi Terbarukan Berbasis Komunitas

Menghitung potensi teknis adalah satu hal, tetapi memastikan sistem tersebut beroperasi secara berkelanjutan dan memberikan manfaat nyata bagi masyarakat adalah tantangan yang sama sekali berbeda. Literatur dalam ilmu sosial dan kebijakan energi secara konsisten menunjukkan bahwa faktor-faktor non-teknis seringkali menjadi penentu keberhasilan atau kegagalan proyek energi pedesaan. Sebuah ulasan penting oleh Savaresi (2020) di jurnal *Energy Policy* (Q1) mengidentifikasi bahwa tata kelola lokal yang kuat, model bisnis yang jelas, partisipasi masyarakat yang bermakna sejak awal, dan adanya pemanfaatan energi untuk kegiatan produktif (*productive uses*) adalah faktor-faktor kunci yang memungkinkan keberhasilan proyek energi komunitas.

Studi oleh Karduri (2023) dalam *Energy Strategy Reviews* (Q1) juga menyoroti kompleksitas sosio-teknis dari sistem energi terdesentralisasi, mengingatkan bahwa teknologi harus "tertanam" (*embedded*) dalam konteks sosial, budaya, dan ekonomi lokal agar dapat diterima dan dipelihara dalam jangka panjang. Ketika energi baru yang diperkenalkan dapat secara langsung meningkatkan mata pencaharian utama—seperti yang dihipotesiskan dalam riset ini untuk pengolahan kopi—maka siklus keberlanjutan ekonomi dapat tercipta. Hal ini sejalan dengan kerangka kerja optimasi yang diusulkan oleh Mandelli et al. (2016), di mana sistem energi dirancang tidak hanya untuk memenuhi beban domestik dasar tetapi juga untuk menyesuaikan pasokan dengan permintaan dari aktivitas ekonomi produktif, sehingga memaksimalkan dampak pembangunan.

1.1.4 Kesenjangan Penelitian (Research Gap) dan Kebaruan (Novelties)

Dari dialog kritis dengan tiga untaian literatur di atas, teridentifikasi beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan, di mana penelitian ini dirancang untuk mengisinya dengan menawarkan kebaruan yang spesifik.

- Kesenjangan 1: Dari Skenario Hipotetis ke Validasi Empiris-Longitudinal. Meskipun banyak penelitian (misalnya, Schwärzel et al. (2019)) menggunakan SWAT untuk memodelkan dampak dari *skenario* reforestasi di masa depan, terdapat kelangkaan studi yang melakukan analisis kuantitatif multi-dekade terhadap dampak dari program rehabilitasi *yang telah terjadi dan didokumentasikan*, terutama yang diinisiasi oleh masyarakat secara

bottom-up. Kebanyakan studi bersifat "bagaimana jika", sementara studi ini akan menjawab pertanyaan "apa yang telah terjadi".

- Kebaruan 1 (Analisis Historis-Empiris): Penelitian ini menyajikan analisis historis yang khas dengan merekonstruksi perubahan kondisi DAS dan hidrologi selama lebih dari 30 tahun (1990-2025). Hal ini membuktikan dampak dari inisiatif konservasi yang nyata dalam jangka waktu yang panjang, memberikan bukti empiris yang lebih kuat daripada studi berbasis skenario.
- Kesenjangan 2: Kuantifikasi Terfragmentasi antara Jasa Ekosistem dan Energi. Literasi hidrologi telah dengan baik menghubungkan restorasi hutan dengan peningkatan aliran dasar. Secara terpisah, literatur energi telah menguraikan metodologi untuk menghitung potensi mikrohidro berdasarkan data aliran. Namun, sangat sedikit studi yang secara eksplisit dan kuantitatif menghubungkan kedua hal tersebut dalam rantai kausal yang lengkap. Belum ada studi yang secara spesifik membingkai dan menghitung *peningkatan* potensi energi dari waktu ke waktu sebagai sebuah "dividen" langsung dari investasi restorasi ekologis.
 - Kebaruan 2 (Pembingkai dan Kuantifikasi "Dividen Energi dari Konservasi"): Kebaruan utama dari riset ini adalah memperkenalkan dan mengkuantifikasi konsep "Dividen Energi". Penelitian ini tidak hanya menyatakan bahwa ada potensi energi, tetapi akan menunjukkan secara kuantitatif *seberapa besar* potensi tersebut telah tumbuh seiring dengan keberhasilan program konservasi. Ini adalah sebuah bentuk valorisasi jasa ekosistem yang menerjemahkan manfaat ekologis menjadi satuan energi (kWh) dan potensi ekonomi, menciptakan narasi baru yang sangat kuat untuk advokasi kebijakan konservasi.
- Kesenjangan 3: Dari Potensi Teknis ke Model Pemanfaatan Kontekstual. Banyak studi penilaian energi terbaru hanya berhenti pada penyajian angka potensi teknis (misalnya, "DAS X memiliki potensi 50 kW"). Studi-studi ini seringkali gagal menghubungkan potensi tersebut dengan struktur

kebutuhan energi dan dinamika sosial-ekonomi spesifik dari komunitas yang akan menggunakannya. Akibatnya, rekomendasi yang dihasilkan seringkali bersifat generik dan kurang dapat diimplementasikan.

Kebaruan 3 (Model Sosio-Teknis Terintegrasi untuk Rantai Nilai Lokal): Penelitian ini tidak berhenti pada perhitungan potensi. Keunikannya terletak pada pengembangan model skenario pemanfaatan yang terintegrasi dan kontekstual. Energi yang dihasilkan secara eksplisit akan dihubungkan dengan kebutuhan untuk meningkatkan rantai nilai produk unggulan lokal (kopi). Dengan cara ini, layanan ekosistem (air) menghasilkan energi, yang kemudian digunakan untuk meningkatkan nilai ekonomi produk yang berasal dari lahan yang sama. Hal ini, pada gilirannya, menciptakan insentif untuk menjaga kelestarian ekosistem.

1.1.5 Pernyataan Masalah dan Pertanyaan Penelitian

Wilayah penelitian di Desa Geneng, Kecamatan Bulukerto, Kabupaten Wonogiri, menghadapi dua masalah sekaligus: kerentanan terhadap krisis air selama musim kemarau dan keterbatasan akses terhadap energi yang andal dan terjangkau untuk kebutuhan rumah tangga dan pengembangan ekonomi lokal, terutama industri pengolahan kopi. Ironisnya, solusi potensial untuk kedua masalah tersebut telah tumbuh secara harfiah selama tiga dekade terakhir melalui upaya rehabilitasi hutan yang dipimpin oleh Mbah Sadiman. Namun, dampak positif dari investasi ekologi ini terhadap potensi energi terbarukan belum pernah diukur.

1.2 Formulasi Masalah

1. Seberapa besar pengaruh perubahan penggunaan lahan, yang disebabkan oleh program rehabilitasi hutan sejak tahun 2000, terhadap peningkatan debit andalan sungai di Dusun Dali Desa Geneng, yang merupakan parameter utama untuk potensi mikrohidro?
2. Bagaimana kuantifikasi dan tren peningkatan potensi daya (kW) serta energi listrik (kWh) yang dapat dibangkitkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada setiap periode analisis (2000, 2005, 2015, 2020, dan 2025), sebagai konsekuensi langsung dari perubahan kondisi hidrologis DAS?
3. Bagaimana kelayakan pembangunan PLTMH dari besarnya kWh yang dapat dibangkitkan di Dusun Dali Desa Geneng dari sudut pandang ekonomi?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis secara kuantitatif dampak perubahan penggunaan lahan akibat program rehabilitasi hutan terhadap respons hidrologis Daerah Aliran Sungai (DAS) di wilayah studi, dengan fokus utama pada peningkatan debit andalan (*dependable flow*) pada periode 2010, 2015, 2020, dan 2025 menggunakan pemodelan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).
2. Melakukan kuantifikasi potensi teknis energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) secara multi-waktu, berdasarkan hasil simulasi debit andalan yang diperoleh dari setiap skenario penggunaan lahan.
3. Melakukan kuantifikasi nilai kelayakan ekonomi dari besarnya daya yang dapat dibangkitkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) secara multi-waktu berdasarkan hasil kuantifikasi energi listrik yang dapat dibangkitkan dari simulasi debit.