

## **Bab II**

### **Tinjauan Pustaka**

#### **2.1 Dampak Restorasi Ekologis Terhadap Jasa Hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS)**

Hubungan antara penggunaan lahan, terutama hutan, dan fungsi hidrologi merupakan salah satu bidang paling fundamental dalam ilmu lingkungan (Abuhay et al., 2023). Hutan tidak hanya merupakan entitas biologis, tetapi juga infrastruktur ekologi yang secara aktif mengatur aliran sumber daya penting, terutama air. Pemulihan infrastruktur ini melalui kegiatan seperti reboisasi dan rehabilitasi lahan secara teoritis akan memulihkan layanan hidrologi yang hilang akibat degradasi di masa lalu (Payeur-Poirier, 2017).

##### **2.1.1 Hutan Sebagai Regulator Fundamental Siklus Hidrologi**

Hubungan kausal antara keberadaan hutan dan stabilitas regime air di dalam suatu daerah aliran sungai telah dibuktikan secara luas dalam literatur hidrologi dan ekologi (Andrade et al., 2020). Hutan bukanlah konsumen air pasif, melainkan sistem biofisik yang kompleks dan dinamis yang secara aktif memodifikasi dan mengatur setiap komponen siklus hidrologi (Sohngen, 2020). Mekanisme regulasi ini terjadi melalui serangkaian proses yang saling terhubung, yang secara kolektif membedakan daerah aliran sungai ber hutan dari yang terdegradasi.

Proses pertama adalah intercepsi kanopi, di mana lapisan puncak pohon dan litter lantai hutan menangkap sebagian besar air hujan sebelum mencapai tanah (Rosalem et al., 2021). Proses ini memiliki dua efek penting: pertama, ia mengurangi energi kinetik tetesan hujan, yang secara signifikan mengurangi risiko erosi percikan, yang merupakan langkah pertama dalam degradasi tanah (Vanwalleghe, 2017). Kedua, sebagian air yang ditangkap akan menguap kembali ke atmosfer (proses yang dikenal sebagai kehilangan intercep), yang menambah kelembapan lokal dan siklus air regional (Gimeno-Sotelo et al., 2024).

Proses kedua, yang paling penting bagi stabilitas aliran sungai, adalah peningkatan infiltrasi. Struktur tanah di bawah hutan matang secara fundamental berbeda dengan tanah terbuka (Ilstedt et al., 2016). Keberadaan lapisan organik

tebal, aktivitas fauna tanah yang melimpah, dan jaringan akar yang padat menciptakan makropori dan biopori yang secara eksponensial meningkatkan porositas dan permeabilitas tanah (Hu et al., 2022). Hal ini memungkinkan air hujan meresap ke dalam profil tanah dengan kecepatan jauh lebih tinggi daripada di lahan padat atau terbuka (Tezel et al., 2025). Peningkatan laju infiltrasi ini secara langsung mengurangi volume aliran permukaan, yang merupakan penyebab utama banjir bandang dan erosi alur dan parit (Shrestha & Htut, 2016).

Air yang berhasil terinfiltrasi ini menjadi masukan utama untuk pengisian ulang cadangan air tanah, baik akuifer dangkal maupun dalam (groundwater recharge). Ini adalah cadangan air tanah yang berfungsi sebagai “tabungan” bagi DAS. Selama periode tanpa hujan atau musim kemarau, air tanah ini akan dilepaskan secara perlahan dan konstan ke sistem sungai melalui mata air dan rembesan, membentuk komponen aliran yang disebut aliran dasar (baseflow) (Chagas et al., 2024). Aliran dasar ini adalah yang menentukan “nadi” kehidupan sebuah sungai, menjamin ketersediaan air di saat paling kritis (Santos et al., 2015). Oleh karena itu, DAS yang sehat dengan penggunaan hutan yang baik secara konsisten menunjukkan karakteristik hidrologis yang lebih tangguh dan stabil: atenuasi debit puncak saat badai (mengurangi risiko banjir) dan peningkatan debit musim kemarau yang andal (meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan) (Yao et al., 2015). Deforestasi, di sisi lain, secara sistematis membongkar mekanisme regulasi ini, yang berujung pada rezim sungai yang “flashy”—mudah meluap saat hujan dan cepat kering saat kemarau (Bart et al., 2021).

### **2.1.2 Kuantifikasi Dampak Dengan Permodelan Hidrologi Terdistribusi**

Untuk beralih dari pemahaman konseptual ke bukti kuantitatif, hidrologi modern sangat bergantung pada pemodelan numerik yang dapat mensimulasikan proses-proses kompleks ini dalam ruang dan waktu (Abbaspour et al., 2015). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) merupakan salah satu alat yang paling andal dan fleksibel yang telah diterima secara luas di seluruh dunia. Model ini juga telah diverifikasi secara luas untuk mensimulasikan dampak perubahan iklim dan perubahan penggunaan lahan terhadap siklus air dan transportasi sedimen dalam suatu DAS (Karki et al., 2020; Maref et al., 2024).

SWAT adalah model hidrologi semi-distribusi dan berbasis fisik. “Berbasis fisik” berarti model ini menggunakan persamaan-persamaan matematis yang merepresentasikan proses-proses fisik nyata seperti infiltrasi (metode kurva SCS atau Green-Ampt), evapotranspirasi (metode Penman-Monteith), dan aliran air tanah (persamaan simpanan linier) (Wang et al., 2019). “Semi-distributed” berarti model ini membagi DAS menjadi unit respons hidrologi (HRU) yang lebih kecil, masing-masing memiliki kombinasi unik dari penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan (Almeida et al., 2018). Pendekatan ini memungkinkan analisis yang jauh lebih detail mengenai bagaimana perubahan di satu bagian DAS dapat mempengaruhi bagian lainnya, dibandingkan dengan model lumped yang menganggap seluruh DAS sebagai satu unit tunggal (Moges et al., 2020).

Keuntungan utama SWAT dalam konteks penelitian ini adalah kemampuannya untuk mensimulasikan secara eksplisit bagaimana parameter biofisik setiap jenis penggunaan lahan—seperti indeks luas daun (LAI), kedalaman akar, dan kerapatan permukaan—mempengaruhi setiap komponen keseimbangan air (Almeida et al., 2018). Dengan mengganti masukan peta penggunaan lahan sesuai dengan kondisi historis yang direkonstruksi dari citra satelit (misalnya, kondisi pada tahun 2000, 2005, 2015 dan 2025), model SWAT dapat melakukan simulasi “eksperimen terkendali secara numerik” (Xiong et al., 2023). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mengisolasi dan mengkuantifikasi dampak kausal dari perubahan penggunaan lahan terhadap luaran hidrologis, terutama debit sungai (*streamflow*), dengan menjaga variabel iklim (curah hujan, suhu) tetap konstan di seluruh skenario. Studi-studi seperti yang dilakukan oleh Guo et al. (2025) bahkan melangkah lebih jauh dengan menggunakan SWAT untuk menunjukkan bahwa tidak semua jenis restorasi vegetasi memberikan dampak yang sama, menyoroti pentingnya analisis yang spesifik terhadap konteks lokal. Oleh karena itu, penerapan SWAT dalam penelitian ini tidak sekadar sebagai alat simulasi, melainkan sebagai platform investigasi kuantitatif untuk memvalidasi hipotesis utama bahwa restorasi hutan di Wonogiri telah secara signifikan memulihkan layanan hidrologi, khususnya peningkatan aliran yang dapat diandalkan.

## 2.2 Dari Jasa Hidrologi ke Potensi Energi Terbarukan

Layanan regulasi air yang disediakan oleh ekosistem hutan yang dipulihkan merupakan bentuk “modal alam” yang memiliki nilai intrinsik (Conrad, 2019). Namun, nilai ini dapat diubah menjadi manfaat yang sangat nyata dan langsung yang dapat dirasakan oleh masyarakat melalui penggunaan teknologi yang tepat, dalam hal ini Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Proses ini merupakan bentuk valorisasi layanan ekosistem, yang berarti mengubah manfaat ekologi menjadi layanan yang memiliki nilai ekonomi dan sosial (Wensem et al., 2016).

### 2.2.1 Prinsip Fundamental dan Parameter Kunci Pembangkitan Energi Mikrohidro

Listrik yang dihasilkan oleh PLTMH pada dasarnya merupakan hasil dari konversi energi dari air yang mengalir. Proses konversi ini mengikuti hukum konservasi energi, mengubah energi potensial gravitasi dan energi kinetik air menjadi energi mekanik (putaran turbin) dan kemudian menjadi energi listrik (melalui generator) (Halych et al., 2023). Persamaan daya teoritis yang menjadi dasar dari semua perhitungan potensi hidroelektrik adalah sebagai berikut (Halych et al., 2023):

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Di mana:

- $P$  = Daya listrik yang dihasilkan, dalam satuan Watt (W).
- $\eta$  = Efisiensi keseluruhan sistem, sebuah koefisien tanpa dimensi yang merepresentasikan kehilangan energi selama proses konversi di turbin dan generator. Nilainya bervariasi tergantung pada jenis dan kualitas teknologi, biasanya berkisar antara 0.5 hingga 0.75 (50-75%) untuk sistem skala mikro (Sachdev & Akella, 2017).
- $\rho$  = Massa jenis air, sebuah konstanta fisika yang nilainya sekitar 1000 kg/m<sup>3</sup> (Karim et al., 2024).

- $g$  = Percepatan gravitasi, konstanta fisika lainnya dengan nilai sekitar  $9.81 \text{ m/s}^2$  (Shankar, 2017).
- $Q$  = Debit air, yaitu volume air yang mengalir melalui turbin per satuan waktu, dalam satuan  $\text{m}^3/\text{s}$ . Ini adalah parameter hidrologis yang dinamis.
- $H$  = Tinggi jatuh air efektif (*Net Head*), yaitu perbedaan ketinggian vertikal antara titik di mana air masuk ke pipa pesat (*penstock*) dan titik di mana air keluar dari turbin, setelah dikurangi kehilangan energi akibat gesekan di dalam pipa (*friction losses*), dalam satuan meter. Ini adalah parameter topografis yang statis.

Dari persamaan fundamental ini, terlihat dengan jelas bahwa daya yang dapat dibangkitkan merupakan fungsi linear dari dua variabel utama yang dapat dikelola atau diukur di lapangan: Debit ( $Q$ ) dan Head ( $H$ ) (Moran, 2020). Di lokasi tertentu, nilai Head ( $H$ ) tetap karena ditentukan oleh topografi dan desain teknis instalasi. Oleh karena itu, satu-satunya variabel dinamis yang menentukan fluktuasi pasokan daya dari waktu ke waktu adalah Debit ( $Q$ ) (Jafari et al., 2021). Inilah titik temu krusial antara domain hidrologi dan domain energi. Setiap keberhasilan restorasi hutan yang secara terukur meningkatkan debit sungai di musim kemarau (meningkatkan *baseflow*) akan secara langsung dan proporsional meningkatkan nilai  $Q$  yang dapat diandalkan sepanjang tahun, yang pada gilirannya secara fundamental meningkatkan potensi daya, keandalan, dan kelayakan teknis-ekonomis dari sebuah instalasi PLTMH (Kale et al., 2016).

### 2.2.2 Kurva Durasi Aliran (Flow Duration Curve - FDC) sebagai Standar Emas Asesmen

Untuk merancang sistem PLTMH yang andal, terutama jenis run-of-river yang tidak memiliki kapasitas penyimpanan air yang besar, penggunaan nilai debit rata-rata tahunan atau bulanan dapat sangat menyesatkan dan berbahaya (Shrestha & Htut, 2016). Para insinyur dan perencana proyek membutuhkan informasi yang jauh lebih detail mengenai distribusi statistik dari ketersediaan aliran air sepanjang waktu untuk membuat keputusan desain yang optimal. Kurva Durasi Aliran (FDC) adalah alat industri standar yang digunakan di seluruh dunia untuk analisis ini (Silva et al., 2019).

FDC adalah grafik probabilitas kumulatif yang secara visual menunjukkan bagaimana aliran sungai berubah seiring waktu. Sumbu Y pada grafik ini menunjukkan laju aliran (dalam  $\text{m}^3/\text{s}$ ), sedangkan sumbu X menunjukkan persentase waktu di mana laju aliran pada sumbu Y akan sama atau lebih tinggi (sama dengan atau melebihi). Grafik ini didasarkan pada data laju aliran jangka panjang (biasanya data harian) (Nasri & Modarres, 2018). Misalnya, titik Q80 pada FDC menunjukkan nilai debit yang dijamin tersedia setidaknya 80% dari waktu dalam setahun (atau sekitar 347 hari). Dalam literatur teknik, nilai Q80 (atau kadang-kadang Q90) secara luas diterima sebagai representasi debit yang dapat diandalkan atau debit tetap. Nilai ini sering digunakan untuk menentukan kapasitas terpasang minimum PLTMH agar dapat beroperasi secara terus-menerus bahkan selama puncak musim kemarau (Klein & Fox, 2022). Debit yang lebih tinggi, seperti Q50 (debit yang tersedia 50% dari waktu), dapat digunakan untuk merancang kapasitas puncak, dengan pemahaman bahwa kapasitas ini hanya akan tercapai pada musim-musim yang lebih basah (Patro et al., 2022). Bentuk kurva FDC itu sendiri memberikan informasi berharga: kurva yang curam mengindikasikan rezim sungai yang sangat fluktuatif (*flashy*), sementara kurva yang landai mengindikasikan rezim aliran yang stabil dengan kontribusi aliran dasar yang besar—kondisi ideal untuk PLTMH (Chagas et al., 2024).

Literatur teknik energi modern secara konsisten menunjukkan bahwa metode paling akurat untuk menghasilkan FDC, terutama di daerah aliran sungai yang tidak memiliki data pengukuran debit jangka panjang (daerah aliran sungai yang tidak terukur), adalah dengan menggunakan keluaran debit seri waktu harian dari model hidrologi yang telah dikalibrasi dan diverifikasi dengan baik, seperti SWAT (Namara dkk., 2022). Akibatnya, keluaran dari pilar pertama (analisis hidrologi menggunakan SWAT) berfungsi sebagai masukan langsung dan esensial untuk pilar kedua (analisis energi menggunakan FDC), membentuk rantai analitis terintegrasi, logis, dan kuantitatif. Penelitian ini akan secara inovatif menghasilkan FDC untuk setiap periode penggunaan lahan (2000, 2005 dst.), yang memungkinkan analisis komparatif untuk menunjukkan bagaimana bentuk FDC telah berubah—menjadi

lebih landai dan lebih tinggi di bagian aliran rendahnya—sebagai manifestasi dari keberhasilan restorasi ekologis.

### 2.3 Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Mikrohidro (PLTMH) dari Sisi Ekonomi

Energi baru dan terbarukan (EBT) berperan penting dalam dekarbonisasi ekonomi dan meningkatkan ketahanan energi lokal. Pemerintah dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 79 Tahun 2014, menetapkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) yaitu tercapainya bauran dari EBT 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Target ini setara dengan 45 GW dari total kapasitas 125 GW pada tahun 2025 (Badan Kebijakan Fiskal Kementerian Keuangan, 2018).

#### 2.3.1 Cost Breakdown Structure (CBS)

Proses pengembangan PLTMH diawali dengan pembuatan desain pembangkit dan upaya substantif seperti perizinan. Selain itu terdapat juga biaya akuisisi lahan, konstruksi, pekerjaan sipil, hingga instalasi. Biaya pengembangan PLTMH terdiri dari beberapa komponen yaitu biaya keseimbangan sistem, biaya pembangkit listrik dan biaya finansial. Biaya pekerjaan sipil terdiri dari persiapan lahan, pembuatan reservoir untuk menampung air, biaya saluran air, biaya struktur bangunan PLTMH.

Tabel 4.1 Nilai CAPEX Pengembangan PLTMH Indonesia

| Daerah              | EPC Index | CAPEX/MW (Rp Miliar) |
|---------------------|-----------|----------------------|
| Aceh/Sumatera Utara | 1,25      | 46,82                |
| Kalimantan          | 1,25      | 46,82                |
| Jawa                | 1,10      | 42,43                |
| Bali-Nusa           | 1,18      | 45,03                |
| Sulawesi            | 1,28      | 47,55                |
| Ambon-Maluku        | 1,45      | 52,66                |
| Papua               | 1,80      | 62,89                |

Sumber : Kementerian Keuangan Badan Kebijakan Fiskal, 2018

Komponen biaya pembangkit listrik mencakup semua komponen fisik yang berhubungan langsung dengan pengembangan energy listrik, terdiri dari biaya pekerjaan sipil dan biaya perawatan pembangkit (EPC). Secara garis besar persentase alokasi dana PLTMH paling besar dialokasikan untuk pembangunan konstruksi fisik yaitu 67,94% dari total CAPEX, Konstruksi fisik pengembangan PLTMH meliputi bendungan (13,24%), bangunan pembangkit (14,17%), *sandtrap* (5,51%), *water way* (8,37%), *water way* tertutup (19,61%), *headpond* (3,59%) *penstock* (12,72%). Komponen terbesar kedua adalah turbin atau mesin pembangkit, menyumbang 25,62% dari CAPEX, diikuti oleh biaya kontingens lingkungan (5,44%), *feasibility study* (0,79%) dan sarana pelengkap (0,12%). Total investasi untuk pengembangan PLTMH dapat dilihat dari nilai CAPEX (Capital Expenditure) yang memiliki nilai bervariasi bergantung pada besar daya yang dibangkitkan dan lokasi pemasangan PLTMH.