

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sulawesi Selatan, khususnya Ujung Pandang (Makassar) dan Kabupaten Gowa, mengalami puncak musim hujan pada Desember 1975, yang menyebabkan banjir besar. Hujan lebat ini terus berlanjut hingga Januari 1976. Banjir tersebut disebabkan oleh dua faktor utama: meluapnya Sungai Je'ne Berang dan curah hujan yang terlalu tinggi untuk diserap tanah. Pemerintah mengambil langkah strategis untuk mengatasi masalah banjir tahunan dengan melakukan perbaikan Daerah Irigasi (DI). Upaya ini bertujuan untuk mengelola kelebihan air yang terjadi saat musim hujan. Untuk merealisasikan langkah tersebut, pemerintah daerah yakni Gubernur Sulawesi Selatan Ahmad Lamo dan Bupati Gowa K.S. Mas'ud memasukkan rencana pembangunan ini dalam Repelita I dan II. Adapun tahap awal perencanaannya meliputi *mainsystem* dan *tertiery system*. *Mainsystem* dan *tertiery system* adalah sebuah upaya untuk mengoptimalkan pengaturan debit air yang besar ketika memasuki musim hujan. Seiring berjalannya waktu, pembangunan kota di Sulawesi Selatan, termasuk Makassar (dulunya Ujung Pandang), menghadapi tantangan yang makin besar. Salah satu kebutuhan krusial yang harus dipenuhi adalah ketersediaan air baku. Hal ini karena Gowa dan Makassar sangat bergantung pada musim hujan untuk memenuhi kebutuhan air mereka. Untuk menjawab tantangan kebutuhan air baku dan pengendalian banjir, pemerintah menyadari bahwa sistem irigasi yang ada tidak lagi memadai. Oleh karena itu, pemerintah pusat memberikan perhatian khusus dengan merencanakan solusi besar: pembangunan bendungan dan dam di Sungai Je'ne Berang. Sungai ini membentang sepanjang 70 km di Kabupaten Gowa, dan solusi ini diwujudkan dalam proyek pembangunan Bendungan Besar Bili-Bili (Jamaluddin, 2018).

Dari tahun ke tahun, Kota Makassar semakin menunjukkan kerentanan yang tinggi ketika menghadapi bencana hidrometeorologi. Bahkan, ketika saat musim penghujan, kota ini akan mengalami banjir dan ketika kemarau akan mengalami kekeringan. Secara ekosistem, kerentanan Kota Makassar dalam menghadapi bencana dan perubahan iklim sedikit banyaknya dipengaruhi oleh tiga Daerah Aliran Sungai di sekitarnya yakni DAS Jeneberang, DAS Tallo, dan DAS Maros. Dimana ketiga DAS ini memiliki peranan dalam sistem hidrologi Kota Makassar seperti pengaruh limpasan air dari hulu ketika musim penghujan dan sumber air minum warga kota yang bersumber dari Bendungan Bili-Bili di Kabupaten Gowa dan Bendungan Lekopancing di Kabupaten Maros. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi di Makassar, kebutuhan akan energi listrik dan air bersih terus meningkat secara signifikan. Kondisi ini menuntut pendekatan yang lebih inovatif dan efisien dalam pengelolaan sumber daya air yang tersedia di Dam Bili-Bili (Riadi et al., 2024).

Meskipun fungsi utama Bendungan Bili-Bili bukan sebagai pembangkit listrik, namun debit air yang relatif stabil sepanjang tahun memberikan peluang besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi mikrohidro. Teknologi mikrohidro memiliki

keuntungan karena dapat dibangun dengan biaya relatif rendah, tidak memerlukan area yang luas, serta tidak mengganggu fungsi utama bendungan. Namun, pemanfaatan ini harus direncanakan dengan hati-hati agar tidak mengganggu distribusi air untuk keperluan PDAM dan irigasi (Ditjen, 2019).

Integrasi sistem mikrohidro pada Dam Bili-Bili ini tidak hanya akan berkontribusi pada penambahan pasokan energi listrik yang bersih dan terbarukan untuk wilayah Makassar dan sekitarnya, tetapi juga menciptakan sinergi positif antara pengelolaan sumber daya air dan energi. Optimalisasi ini berpotensi memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, mendukung target bauran energi terbarukan nasional, serta meningkatkan kemandirian energi lokal untuk operasional kritis seperti penyediaan air bersih. Oleh karena itu, studi dan perencanaan yang mendalam mengenai optimalisasi energi mikrohidro pada sistem multi-guna Dam Bili-Bili ini menjadi sangat relevan dan mendesak untuk diimplementasikan (Abipraya, 2020).

Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan optimalisasi pemanfaatan energi dari sistem mikrohidro pada Bendungan Bili-Bili. Melalui pendekatan yang tepat, diharapkan sistem ini dapat menjadi solusi energi yang berkelanjutan dan mendukung efisiensi pemanfaatan sumber daya air yang ada. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem mikrohidro yang optimal dalam memanfaatkan potensi energi air dari bendungan Bili-Bili, dengan memperhatikan kebutuhan air (Kementerian PUPR, 2024).

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kinerja pola operasi eksisting PLTA Bili-Bili ditinjau dari efisiensi turbin, pembagian debit, dan energi tahunan yang dihasilkan?
2. Bagaimana penerapan metode *Incremental Loading* dapat mengoptimalkan pola operasi turbin sehingga meningkatkan output energi dibandingkan dengan pola operasi awal?
3. Bagaimana pengaruh variasi ketinggian serta penurunan ketinggian akibat sedimentasi terhadap perubahan daya keluaran dan proyeksi produksi energi PLTA Bili-Bili untuk 10 tahun ke depan?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis kinerja pola operasi eksisting PLTA Bili-Bili berdasarkan efisiensi turbin, pembagian debit, dan produksi energi tahunan yang dihasilkan.
2. Menerapkan dan mengevaluasi metode *Incremental Loading* untuk memperoleh pola operasi turbin yang lebih optimal, sehingga dapat meningkatkan daya keluaran dan energi tahunan dibanding dengan kondisi sekarang.
3. Mengukur dampak variasi ketinggian serta penurunan ketinggian akibat sedimentasi terhadap perubahan daya, kerugian energi, dan proyeksi produksi energi PLTA Bili-Bili dalam jangka 10 tahun.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat secara teoritis dengan memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu terkait optimalisasi operasi PLTA melalui analisis efisiensi turbin, pola operasi, serta pengaruh variasi head dan sedimentasi terhadap produksi energi. Secara praktis, penelitian ini menyediakan rekomendasi pola operasi turbin yang lebih optimal bagi pengelola PLTA Bili-Bili sehingga dapat meningkatkan energi tahunan tanpa penambahan infrastruktur. Selain itu, hasil penelitian ini juga bermanfaat bagi perencanaan dan pengambilan keputusan, khususnya dalam evaluasi kinerja pembangkit, pengelolaan waduk jangka panjang, serta pengembangan strategi pemanfaatan energi air yang lebih berkelanjutan.

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya menganalisis aspek teknis PLTA Bili-Bili, meliputi pola operasi eksisting, efisiensi turbin, debit, ketinggian (*head*), serta energi yang dihasilkan tanpa membahas aspek non-teknis lainnya.
2. Optimalisasi operasi turbin dibatasi pada penerapan metode *Incremental Loading* tanpa melakukan perubahan fisik pada turbin, generator, maupun komponen hidrolik lainnya.
3. Proyek energi dan analisis ketinggian hanya mempertimbangkan pengaruh variasi ketinggian serta penurunan ketinggian akibat sedimentasi, tanpa memasukkan faktor perubahan iklim, hidrologi DAS yang lebih luas, ataupun analisis ekonomi.
4. Tidak memperhitungkan kondisi dan masa pakai generator

1.6 Teori

1.6.1 Air dan Pemanfatannya

Sumber daya air merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang relatif ekonomis dan mudah diakses. Oleh karena itu, utilisasi aliran air yang bersifat kontinu pada saluran irigasi dapat dioptimalkan sebagai tenaga penggerak primer suatu turbin untuk proses konversi menjadi energi listrik (Anwar et al., 2021).

Pemanfaatan air sebagai sumber daya pembangkit listrik bergantung pada dua parameter krusial: kapasitas aliran dan ketinggian jatuhnya air relatif terhadap instalasi. Besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan berbanding lurus dengan kedua parameter tersebut. Dalam terminologi teknis, kapasitas aliran mengacu pada volume air per satuan waktu (*flow capacity*), sementara perbedaan elevasi antara sumber air dan instalasi dikenal dengan istilah *head* (Anwar et al., 2021).

Energi hidroelektrik atau *hydropower* pada prinsipnya adalah konversi energi potensial dan kinetik yang terkandung dalam aliran air menjadi energi listrik. Untuk aplikasi pada kondisi aliran dan *head* (ketinggian jatuh air) yang rendah, pemanfaatan roda air sebagai komponen utama pada pembangkit listrik skala kecil kini mulai dikembangkan. Secara spesifik, teknologi *picohydro* menawarkan efisiensi sistem yang tinggi, yang tidak hanya andal tetapi juga aman digunakan. (Anwar et al., 2021).

1.6.2 Bendungan

Bendungan (DAM) merupakan sebuah struktur rekayasa sipil yang berfungsi untuk menampung dan menahan volume air. Pemanfaatannya bersifat multifungsi, mencakup suplai untuk irigasi, penyediaan air baku bagi kebutuhan domestik, industri, dan perkotaan, serta mendukung sektor perikanan dan pariwisata. Selain itu, perannya sebagai pembangkit listrik tenaga air menjadikan bendungan sebagai salah satu sumber energi alternatif yang berkontribusi dalam upaya mitigasi dampak pemanasan global (Mahabbah et al., 2024).

Bendungan merupakan struktur rekayasa yang didirikan untuk menahan laju aliran air, sehingga membentuk sebuah tampungan buatan seperti waduk atau danau. Konstruksi ini memiliki fungsi strategis yang beragam, di antaranya sebagai pengendali banjir, penyedia air untuk irigasi dan air baku, serta sebagai fasilitas pembangkit tenaga listrik. Dalam konteks pembangkitan energi, fungsi esensial bendungan adalah menahan aliran air untuk menciptakan beda tinggi (head) yang diperlukan untuk menggerakkan turbin (Mahabbah et al., 2024).

Fungsi bendungan itu banyak, tidak hanya untuk mengairi sawah (irigasi). Bendungan juga bisa dipakai untuk menghasilkan listrik (PLTA). Karena kemampuannya untuk membuat listrik sangat besar, maka penting untuk diteliti lebih dulu agar semua kegunaan bendungan bisa dimanfaatkan secara maksimal.

Bendung adalah sebuah bangunan air yang konstruksinya bertujuan untuk menahan laju aliran air atau untuk menaikkan elevasi muka air. Berdasarkan prinsip kerjanya, bendung dapat dibedakan menjadi beberapa macam, yaitu: (Mahabbah et al., 2024).

- a. Bendung Tetap (*Fixed Weir*) Jenis ini memiliki struktur yang bersifat permanen dan solid. Seluruh bagian bangunannya tidak dapat digerakkan atau diubah ketinggiannya untuk mengatur aliran air.



Gambar 1 Bendung Tetap (Mahabbah et al., 2024).

- b. Bendung Gerak (*Movable/Gated Weir*) Bendung ini dilengkapi dengan komponen yang dapat dioperasikan secara mekanis, seperti pintu air. Bagian yang dapat digerakkan ini berfungsi untuk mengatur ketinggian muka air atau debit aliran sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2 Bendung Gerak (Mahabbah et al., 2024).

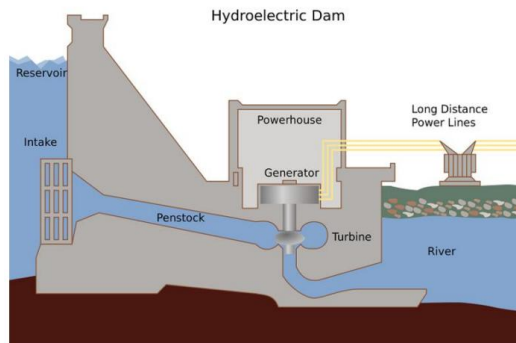
- c. Bendung Gerak Otomatis (*Automatic Weir*) Ini adalah jenis bendung gerak yang dirancang untuk merespons kondisi aliran secara otomatis. Pada debit normal, ia berfungsi sebagaimana bendung pada umumnya. Namun, ketika terjadi banjir yang menyebabkan muka air melampaui level rencana, strukturnya akan membuka secara otomatis untuk melewatkan aliran banjir tanpa halangan.



Gambar 3 Bendung Gerak Otomatis. (Mahabbah et al., 2024).

1.6.3 PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air)

PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi air (energi potensial dan kinetik) untuk memutar turbin, yang kemudian menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik.



Gambar 4 Pembangkit Listrik Tenaga Air (Maryono, 2013).

Besarnya daya yang dihasilkan PLTA dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu debit air (Q), tinggi jatuh air atau head (H), serta efisiensi sistem (η). Secara umum, semakin besar debit dan semakin tinggi head, maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. PLTA memiliki beberapa jenis, seperti PLTA waduk (reservoir) yang menggunakan bendungan besar untuk menyimpan air, PLTA run-off river yang memanfaatkan aliran sungai langsung, serta pumped storage yang dapat menyimpan energi dengan memompa air kembali ke tempat yang lebih tinggi saat beban listrik rendah (Maryono, 2013).

Meskipun memiliki berbagai bentuk instalasi, pembangkit tenaga listrik air beroperasi dengan prinsip dasar yang sama yakni mengkonversi tenaga potensial menjadi energi listrik. Proses konversi ini terjadi secara bertahap melalui serangkaian transformasi energi: tenaga potensial menjadi tenaga kinetik, tenaga kinetik menjadi tenaga mekanik, dan tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. PLTA memiliki sistem di dalamnya terdapat serangkaian konversi energi yang dimulai dari energi potensial, dimana air memiliki energi karena posisinya pada ketinggian tertentu. Ketika air mengalir, energi potensial ini berubah menjadi energi kinetik yang ditandai dengan kecepatan aliran air. Selanjutnya, energi kinetik ini dikonversi menjadi energi mekanik melalui perputaran kincir atau turbin yang digerakkan oleh aliran air secara kontinyu. Energi mekanik dari perputaran kincir/turbin menggerakkan generator, yang menghasilkan energi listrik sebagai output akhir sistem (Widodo & Pramudyo, 2018). Sebuah sistem PLTA tersusun atas beberapa komponen fundamental, yang meliputi: (Wie & Agung, 2018).

- Sumber Energi Air: Aliran air yang berfungsi sebagai penggerak utama.
- Bendungan/*Intake*: Struktur untuk menahan atau mengalihkan air.
- Saluran Pembawa: Saluran terbuka untuk mengalirkan air.
- Bak Penenang (*Forebay*): Berfungsi untuk menstabilkan aliran sebelum masuk ke pipa pesat.

- e. Pipa Pesat (*Penstock*): Saluran tertutup bertekanan yang mengarahkan air ke turbin.
- f. Turbin: Mengonversi energi aliran air menjadi energi putaran mekanis.
- g. Generator: Mengonversi energi putaran mekanis dari turbin menjadi energi listrik.
- h. Panel Kontrol dan Jaringan Listrik: Sistem untuk mengontrol operasi dan mendistribusikan listrik yang dihasilkan $Q = \text{Debit aliran air (m}^3/\text{detik)}$.

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah sebuah sistem pembangkitan energi yang menggunakan tenaga air sebagai penggerak utamanya. Dalam operasinya, PLTA mengonversi energi potensial (tekanan) dan energi kinetik (kecepatan) dari aliran air untuk memutar turbin. Selanjutnya, energi mekanis dari putaran turbin ini digunakan untuk menggerakkan generator yang menghasilkan energi listrik. Sistem ini umumnya diklasifikasikan sebagai pembangkit skala kecil, dengan rentang kapasitas daya antara 5 hingga 50 kilowatt (Wie & Agung, 2018).

Secara teknis, proses pembangkitan listrik pada sistem mikrohidro melibatkan tiga komponen utama: sumber daya air, turbin, dan generator. Proses ini diawali dengan mengalirkan air yang memiliki debit dan beda tinggi (*head*) tertentu melalui pipa pesat (*penstock*) menuju rumah pembangkit (*powerhouse*). Di dalam rumah pembangkit, aliran air bertekanan ini diarahkan untuk memutar sudu-sudu turbin, sehingga terjadi konversi energi hidrolik menjadi energi mekanis dalam bentuk rotasi poros. Selanjutnya, rotasi poros turbin ini diteruskan untuk menggerakkan generator, yang berfungsi mengonversi energi mekanis tersebut menjadi energi listrik (Wie & Agung, 2018).

1.6.4 Generator

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dalam proses pembangkitan listrik. Untuk mempertahankan output daya yang stabil pada terminal generator, diperlukan konsistensi pada arus jangkar dan sudut daya. Penting untuk memahami kapasitas generator dalam menangani perubahan beban, yang harus disesuaikan dengan spesifikasi teknisnya. Dalam operasinya generator sinkron memerlukan arus penguatan (eksitasi) untuk menghasilkan fluks magnetik pada kutub-kutub medan yang terletak di rotor. Sistem penguatan (*excitation*) ini memegang peran krusial dalam menjaga stabilitas tegangan yang dihasilkan generator (Chapman, 2016).

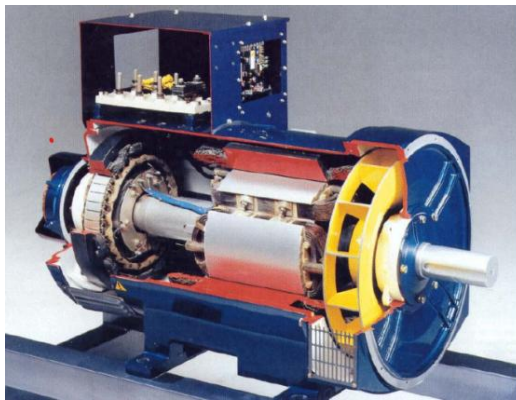
Generator beroperasi berdasarkan prinsip hukum Faraday yang menyatakan bahwa gaya gerak listrik (GGL) akan terbentuk pada ujung penghantar ketika penghantar tersebut bergerak memotong garis-garis gaya magnet. Fungsi utama generator adalah melakukan konversi energi dari energi mekanik (gerak/putar) menjadi energi listrik. Sebelum disalurkan ke konsumen, output listrik dari generator melalui proses pengaturan menggunakan sistem kontrol yang terdiri dari panel-panel elektronik yang umumnya terpasang pada dinding. Generator memiliki stator dan rotor. Stator terdiri dari kumparan-kumparan tembaga yang terpasang secara statis (tidak bergerak) di dalam generator. Sementara itu, rotor merupakan komponen bermagnet yang bergerak di dalam generator dan berperan menghasilkan fluks

magnetik. Interaksi antara kedua komponen ini menjadi kunci dalam proses pembangkitan listrik (Rashid, 2018).

a. Generator Sinkron

Mesin sinkron memiliki konstruksi yang identik baik saat beroperasi sebagai generator maupun motor dengan perbedaan hanya terletak pada prinsip kerjanya. Pada generator berkapasitas kecil termasuk generator arus searah, konfigurasi komponennya terdiri dari belitan (kumparan) jangkar yang ditempatkan pada rotor dan belitan medan yang ditempatkan pada stator. Generator sinkron beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Prosesnya dimulai ketika penggerak mula (prime mover) memutar rotor menyebabkan kutub-kutub yang terpasang pada rotor ikut berputar. Ketika kumparan kutub diberi suplai tegangan searah, medan magnet (garis-garis gaya magnet) akan terbentuk pada permukaan kutub dan berputar dengan kecepatan yang sama dengan putaran kutub (Hughes et al., 2016).

Berdasarkan Hukum Faraday, gaya gerak listrik (GGL) atau *electro motive force* (EMF) atau tegangan induksi akan terbentuk dalam dua situasi: pertama, ketika lilitan penghantar/konduktor bergerak memotong garis-garis gaya magnet yang diam, atau kedua, ketika lilitan yang statis dipotong oleh garis-garis gaya magnet yang berputar. Untuk referensi visual tentang struktur dan komponen generator sinkron, dapat dilihat pada ilustrasi yang disajikan dalam Gambar 5.



Gambar 5 Generator Sinkron(Hughes et al., 2016).

b. Generator Asinkron

Generator asinkron atau generator induksi beroperasi melalui konversi dari motor listrik. Saat berfungsi sebagai motor, pemberian tegangan pada kumparan stator menghasilkan medan putar dengan kecepatan sinkron. Ketika dioperasikan sebagai generator, rotor diputar oleh penggerak eksternal dengan kecepatan melebihi kecepatan sinkronnya menghasilkan tegangan melalui perputaran konduktor dalam medan magnet kumparan stator. Ketika generator terhubung dengan beban, arus akan mulai mengalir. Interaksi antara arus rotor dan medan magnet pada kumparan stator menghasilkan arus di kumparan stator sebagai respons terhadap gaya mekanik yang diberikan. Untuk

mengubah motor induksi menjadi generator induksi, diperlukan daya reaktif atau magnetisasi guna menghasilkan tegangan pada terminal output. Generator induksi adalah jenis generator arus bolak-balik (AC) yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC (Chapman, 2016).

Generator induksi AC memiliki dua karakteristik operasional yaitu kondisi tanpa beban dan berbeban. Pada kondisi tanpa beban karakteristik generator meliputi arus medan, tegangan terminal, dan fluks magnetik tanpa pembebanan. Sementara pada kondisi berbeban karakteristik meliputi kuat arus dan tegangan total yang mengalir ke beban. Strukturnya terdiri dari dua komponen utama yakni stator (komponen statis yang menghasilkan tegangan AC) dan rotor (komponen bergerak yang menghasilkan medan magnet untuk menginduksi stator). Stator didesain dengan kerangka pelindung yang berfungsi untuk mengamankan seluruh komponen internal generator. Jumlah kutub dalam generator AC ditentukan berdasarkan dua parameter utama, yaitu kecepatan rotasi rotor dan frekuensi gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan (Rashid, 2018). Generator asinkron (induksi) dapat dilihat pada Gambar 6.



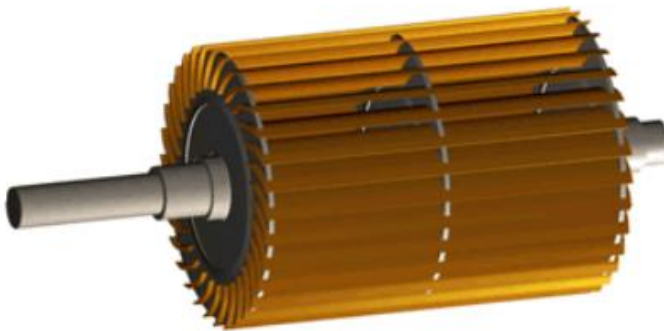
Gambar 6 Generator induksi (Rashid, 2018).

1.6.5 *Runner* (Turbin Air)

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk tenaga industri untuk jaringan listrik. Sekarang lebih umum dipakai untuk generator listrik. Turbin kini dimanfaatkan secara luas dan merupakan sumber energi yang dapat diperbaharukan. Kincir air sudah sejak lama digunakan untuk tenaga industri. Pada mulanya yang dipertimbangkan adalah ukuran kincirnya, yang membatasi debit dan head yang dapat dimanfaatkan. Perkembangan kincir air menjadi turbin modern membutuhkan jangka waktu yang cukup lama. Perkembangan yang dilakukan dalam waktu revolusi industri menggunakan metode dan prinsip ilmiah. Mereka juga mengembangkan teknologi material dan metode produksi baru pada saat itu. Turbin secara umum dapat diartikan sebagai mesin penggerak mula di mana energi fluida kerja yang digunakan langsung memutar roda turbin, fluida kerjanya yaitu berupa air,

uap air dan gas. Dengan demikian turbin air dapat diartikan sebagai suatu mesin penggerak mula yang fluida kerjanya adalah air. (Arismunandar, W., 2004 : 1).

Berbeda yang terjadi pada mesin torak (motor bakar), pada turbin tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi. Bagian turbin yang berputar dinamai rotor (runner pada turbin cross-flow) atau roda turbin, sedangkan bagian yang tidak berputar dinamai stator atau rumah turbin. Roda turbin terletak didalam rumah turbin dan roda turbin memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar bebannya (generator). Kalau ditinjau dari daya yang dihasilkan turbin air, maka dikenal istilah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang maksudnya adalah turbin air yang dapat menghasilkan daya. Pada roda turbin terdapat sudut yaitu suatu konstruksi lempengan dengan bentuk dan penampang tertentu, air sebagai fluida kerja mengalir melalui ruang diantara sudu tersebut, dengan demikian roda turbin akan dapat berputar dan pada sudu akan ada suatu gaya yang bekerja. Gaya tersebut akan terjadi karena ada perubahan momentum dari fluida kerja air yang mengalir diantara sudunya. Sudu hendaknya dibentuk sedemikian rupa sehingga dapat terjadi TURBOISSN 2301-6663 Vol. 3 NO. 2 9 perubahan momentum pada fluida kerja air tersebut (Arismunandar, W., 2004:2).



Gambar 7 Runner Turbin (Arismunandar, W., 2004:2).

Turbin tipe ini dibuat pertama kali di Eropa. Nama cross-flow diambil dari kenyataan bahwa air melintasi kedua sudu gerak atau runner dalam menghasilkan putaran (rotasi). Sedangkan nama Banki (dari Hungaria) dan Mitchell (dari Austria) adalah nama ahli teknik yang mengembangkan prinsip – prinsip turbin tersebut yaitu turbin ini dilengkapi dengan pipa hisap, dan sebagai akibatnya daya yang dihasilkan turbin, proses kerja dan randemen turbin menjadi lebih baik. Turbin cross-flow ini mempunyai arah aliran yang radial atau tegak lurus dengan sumbu turbin. Turbin ini mempunyai alat pengarah sehingga dengan demikian celah bebas dengan sudu-sudu di sekeliling roda hanya sedikit. Karena itu pada keadaan beban penuh perputarannya roda terjadi sedikit kemacetankemacetan, yang menimbulkan sedikit tekanan lebih. Turbin cross-flow terdiri dari tiga bagian utama yaitu roda jalan, alat pengarah dan rumah turbin. Dalam aplikasinya turbin cross-flow baik sekali

digunakan untuk pusat tenaga air yang kecil dengan daya kurang lebih 750 kW. Tinggi air jatuh yang bisa digunakan diatas 1 m sampai 200 m dan kapasitas antara 0,02 m³/s sampai 7 m³/s (Dietzel, F., 1993).

1.6.6 Pemanfaatan Sistem Multi Guna Bendungan

Bendungan merupakan infrastruktur strategis yang dibangun untuk mengatur, menyimpan, dan mengalirkan air guna memenuhi berbagai kebutuhan manusia. Sistem multi-guna pada bendungan mengacu pada pemanfaatan sumber daya air dari bendungan secara simultan untuk beberapa tujuan, antara lain penyediaan air irigasi, air baku untuk domestik dan industri, pengendalian banjir, pembangkit listrik tenaga air, pariwisata, serta konservasi lingkungan (Mays, 2011).

Dalam konteks perencanaan sumber daya air terpadu (Integrated Water Resources Management/IWRM), bendungan multi-guna memberikan efisiensi dalam pemanfaatan air, namun juga menimbulkan tantangan dalam pengelolaan alokasi air antar sektor. Konflik kepentingan dapat muncul, terutama antara kebutuhan air baku dan kebutuhan untuk pembangkitan listrik, khususnya saat debit air terbatas (Huang et al., 2017).

Beberapa studi menunjukkan bahwa integrasi fungsi-fungsi bendungan secara optimal dapat meningkatkan nilai guna bendungan tersebut. Misalnya, penelitian oleh Nugroho et al. (2017) pada Bendungan Jatiluhur menunjukkan bahwa pengaturan debit air dengan mempertimbangkan prioritas air irigasi dan waktu operasi turbin menghasilkan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan, termasuk potensi energi listrik.

Keseimbangan antara berbagai fungsi bendungan dapat dicapai dengan pendekatan optimasi multi-objektif yang memperhitungkan nilai ekonomi, sosial, dan lingkungan dari masing-masing penggunaan air. Dalam konteks Bendungan Bili-Bili, yang saat ini digunakan untuk penyediaan air baku PDAM Makassar dan pengendalian banjir, peluang pemanfaatan aliran air untuk pembangkitan energi mikrohidro perlu dikaji dalam kerangka sistem multi-guna yang terintegrasi dan adaptif terhadap dinamika kebutuhan air di masa depan (Nugroho et al., 2017).

1.6.7 Metode *Incremental Loading*

Metode *Incremental Loading* merupakan salah satu pendekatan operasional dalam optimasi pembagian beban (*load sharing*) pada sistem pembangkitan listrik yang memiliki lebih dari satu unit turbin atau generator. Konsep ini didasarkan pada prinsip bahwa setiap turbin mempunyai karakteristik efisiensi yang berbeda pada setiap tingkat beban, sehingga pembagian debit atau beban yang tidak tepat dapat menyebabkan penurunan daya output serta menurunnya efisiensi total sistem. Dengan melakukan peningkatan beban secara bertahap (*incremental*), operator dapat mengevaluasi perubahan daya dan efisiensi pada setiap turbin sehingga memperoleh kombinasi operasi yang memberikan keluaran energi paling optimum.

Dalam konteks pembangkit listrik tenaga air (PLTA), metode ini dilakukan dengan membagi debit masuk (*inflow*) ke masing-masing turbin dalam bentuk

increment, misalnya kenaikan debit 0,5–1 m³/s atau kenaikan beban tertentu, kemudian menghitung daya yang dihasilkan oleh setiap turbin pada setiap kombinasi beban. Kombinasi yang menghasilkan P_{total} (jumlah daya kedua turbin) terbesar dipilih sebagai pola operasi optimal. Prinsip ini sejalan dengan karakteristik turbin air yang umumnya memiliki kurva efisiensi optimum pada debit tertentu. Oleh karena itu, metode *Incremental Loading* digunakan untuk memastikan bahwa turbin yang lebih efisien dioperasikan terlebih dahulu atau diberi porsi beban lebih besar agar energi total yang dihasilkan meningkat.

Beberapa penelitian sebelumnya mengemukakan bahwa metode *Incremental Loading* efektif untuk mengoptimalkan operasi pembangkit multi-unit karena pendekatannya yang sederhana, tidak memerlukan modifikasi fisik, dan dapat diterapkan baik pada pembangkit berskala besar maupun kecil. Metode ini juga sering digunakan sebagai dasar optimasi operasi di sistem tenaga listrik, pembagian beban generator, serta pada sistem hidropower yang membutuhkan fleksibilitas operasi terhadap perubahan debit dan head. Dalam studi-studi hidropower modern, prinsip *incremental* juga digunakan dalam teknik *economic dispatch*, *load sharing optimization*, dan *unit commitment*, yang semuanya memiliki tujuan utama untuk meningkatkan efisiensi dan memaksimalkan energi keluaran.

1.6.8 Optimasi Sumber Daya Air pada Waduk Multi-Guna

Optimalisasi sumber daya air pada waduk multi-guna adalah suatu pendekatan manajemen untuk merencanakan dan mengelola alokasi air secara efisien dan adil guna memaksimalkan manfaat bagi berbagai sektor pengguna yang saling bersaing. Urgensi optimalisasi ini muncul dari kenyataan bahwa ketersediaan air di dalam waduk bersifat terbatas dan fluktuatif, sementara permintaan dari berbagai sektor terus meningkat. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan ekonomi, tetapi juga untuk menjamin keberlanjutan ekologis dan keadilan sosial dalam pemanfaatan air (Asdak, 2004).

Konflik kepentingan dalam pemanfaatan air, Karakteristik multi-guna secara inheren menciptakan potensi konflik kepentingan dalam alokasi air. Setiap sektor memiliki pola kebutuhan dan tujuan yang berbeda, yang seringkali bertentangan satu sama lain:

1. Penyedia Air Baku (PDAM) :Sektor ini membutuhkan pasokan air dengan debit yang relatif konstan dan kualitas yang terjamin sepanjang tahun untuk memenuhi kebutuhan domestik dan industri. Prioritas untuk air baku biasanya sangat tinggi karena menyangkut hajat hidup orang banyak (Marte,2020).
2. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) :Untuk menghasilkan energi listrik secara optimal, PLTA membutuhkan tinggi jatuh (head) yang maksimal dan debit air yang besar, terutama pada saat beban puncak. Ini berarti operator PLTA cenderung ingin mempertahankan elevasi muka air waduk pada level setinggi mungkin (Marte,2020).
3. Kebutuhan Irigasi : Alokasi air untuk irigasi sangat bergantung pada pola tanam dan bersifat musiman. Kebutuhan air akan mencapai

puncaknya pada musim tanam, yang mungkin bertepatan dengan musim kemarau saat ketersediaan air (*inflow*) sedang rendah (Marte, 2020).

4. Pengendali banjir : Fungsi ini justru berkebalikan dengan PLTA dan irigasi. Untuk meredam banjir secara efektif, perlu disediakan kapasitas tampungan kosong (*flood storage*) di dalam waduk, yang berarti elevasi muka air harus dijaga pada level yang lebih rendah, terutama saat musim hujan (Auliafitri et al.,2022).

1.6.9 Debit Air Sungai

Debit aliran sungai berpengaruh pada ketersediaan air. Ketersediaan air adalah jumlah air (debit) yang diperkirakan terus menerus ada di suatu lokasi (bendung atau bangunan air lainnya) di suatu sungai dengan jumlah tertentu dan dalam jangka waktu (periode) tertentu (Direktorat Irigasi, 1980). Untuk pemanfaatan air, perlu diketahui informasi ketersediaan air andalan (debit, hujan). Prosedur analisis debit andalan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan data. Apabila terdapat data debit dalam jumlah cukup panjang, maka analisis ketersediaan air dapat dilakukan dengan melakukan analisis frekuensi terhadap data debit tersebut. Apabila tidak tersedia data debit jangka panjang, maka dapat dilakukan dengan simulasi hujan-aliran(Direktorat Irigasi, 1980).

1.6.9.1 Debit Andalan

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Analisis debit andalan bertujuan untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai (Soemarto, 1999). Umumnya debit andalan diperhitungkan karena diperlukan pada perencanaan pengembangan air irigasi, air baku dan pembangkit listrik tenaga air, yaitu untuk menentukan persediaan air pada bangunan pengambilan (*intake*). Debit tersebut digunakan sebagai patokan ketersediaan debit yang masuk ke waduk pada saat pengoperasiannya. Untuk menghitung debit andalan tersebut, dihitung peluang 80% dari debit inflow sumber air pada pencatatan debit pada periode tertentu dan resiko kegagalannya adalah 20%. Pencatatan debit sebaiknya dilakukan dengan jangka waktu yang panjang agar hasil yang didapat lebih baik dan mengurangi terjadinya penyimpangan Hasil Perhitungan yang terlalu besar. Perhitungan debit andalan yang biasa dilakukan di lapangan adalah dengan menggunakan data debit operasional waduk atau data debit sungai yang menjadi inflow (Nuramini,2017).

1.6.10 Debit Minimum Operasi Turbin pada PLTA

Debit minimum pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan parameter penting yang menggambarkan batas terendah debit air yang masih memungkinkan turbin untuk beroperasi dengan stabil dan efisien. Nilai debit minimum sangat dipengaruhi oleh karakteristik turbin, batas bukaan sudu, kondisi hidrolis, serta batasan mekanis yang ditetapkan oleh pabrikan. Literatur hidropower menunjukkan bahwa pada debit yang berada di bawah nilai minimum, efisiensi turbin

akan turun secara signifikan, getaran meningkat, dan potensi terjadinya *cavitation* bertambah besar, sehingga turbin tidak dapat dioperasikan dalam kondisi aman maupun produktif. Dalam teori hidrolis, debit minimum dapat ditentukan menggunakan pendekatan sederhana berdasarkan hubungan daya hidrolis, efisiensi turbin, dan *net head*. Pendekatan ini merujuk pada rumus daya turbin:

$$P = \rho g Q H \eta \quad (1)$$

Dengan menata ulang persamaan tersebut untuk mencari debit minimum ($Q_{\min}$) pada daya minimum operasi ($P_{\min}$), diperoleh:

$$Q_{\min} = \frac{P_{\min}}{\rho g H \eta} \quad (2)$$

Rumus ini memberikan nilai perkiraan debit terkecil yang dapat menghasilkan daya minimum yang masih dianggap stabil oleh sistem pembangkitan. Pendekatan hidrolis sederhana ini banyak digunakan ketika data pabrikaan atau kurva efisiensi lengkap tidak tersedia, sehingga dapat menjadi acuan awal dalam menentukan batas operasi aman turbin.

Selain itu, penentuan debit minimum juga mempertimbangkan kebutuhan *environmental flow* atau aliran dasar sungai yang harus tetap dilepas untuk menjaga keseimbangan ekologis. Pada PLTA multi-unit, nilai debit minimum sangat memengaruhi strategi operasional, seperti pemilihan unit turbin yang dioperasikan, pengaturan pembagian debit, serta optimasi operasi selama periode debit rendah. Dengan demikian, perhitungan debit minimum menjadi komponen utama dalam perencanaan operasi PLTA, termasuk dalam strategi optimasi seperti *Incremental Loading* yang digunakan dalam penelitian ini.

1.6.11 Penetapan Parameter Sedimentasi dan Proyeksi Penurunan Energi PLTA

Sedimentasi merupakan akumulasi material hasil erosi yang terbawa oleh aliran sungai dan mengendap di dalam waduk. Akumulasi sedimen ini menyebabkan penurunan kapasitas tampungan waduk dan secara langsung mengurangi tinggi jatuh bersih (*net head*) yang digunakan turbin dalam menghasilkan daya. Oleh karena itu, penetapan parameter sedimentasi merupakan langkah penting dalam memproyeksikan performa jangka panjang PLTA, terutama ketika sumber energi utama (*head* dan debit) mengalami degradasi secara bertahap akibat pendangkalan waduk. Laju sedimentasi biasanya dinyatakan dalam satuan ketebalan sedimen per tahun, dan menjadi dasar untuk menentukan penurunan elevasi dasar waduk. Dalam penetapan parameter ini, pendekatan sederhana digunakan untuk menggambarkan penurunan head efektif pada tahun ke- t dengan menggunakan model linear:

$$H_t = H_{\text{initial}} - (t \times \Delta H) \quad (3)$$

Di mana H_t adalah head pada tahun ke- t , H_{initial} adalah *head* awal, dan ΔH adalah laju penurunan head per tahun akibat sedimentasi. Pendekatan linear ini banyak digunakan dalam analisis jangka panjang ketika laju sedimentasi dianggap relatif konstan dan tidak terjadi intervensi seperti pengerukan atau *flushing* waduk. Penurunan *head* akibat sedimentasi selanjutnya berdampak pada produksi energi tahunan PLTA. Dalam literatur *hidropower*, energi keluaran dinyatakan berbanding lurus dengan head ketika debit dan efisiensi dianggap stabil. Oleh karena itu, proyeksi energi tahunan pada tahun ke- t dapat dihitung dengan pendekatan proporsional:

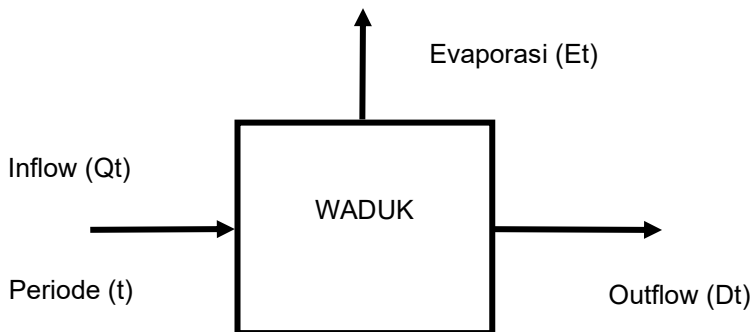
$$E_t = E_{\text{initial}} \times \left(\frac{H_t}{H_{\text{avg,initial}}} \right) \quad (4)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin besar penurunan head, semakin besar pula penurunan energi yang dihasilkan. Pendekatan proporsionalitas ini merupakan metode yang umum digunakan dalam studi *hidropower* untuk analisis sensitivitas performa terhadap perubahan head, terutama untuk proyeksi jangka panjang waduk yang mengalami pendangkalan.

Dengan demikian, penetapan parameter sedimentasi dan proyeksi energi memberikan dasar yang kuat dalam memahami dampak degradasi fisik waduk terhadap kinerja PLTA serta menjadi acuan dalam perencanaan konservasi waduk di masa depan (Morris dan Fan, 1998).

1.6.12 Simulasi Tampungan Waduk.

Waduk merupakan bangunan air yang berfungsi untuk menyimpan air sementara pada waktu kelebihan air dan dikeluarkan pada waktu terjadi kekurangan air. Bentuk persamaan tampungan yang sering digunakan untuk operasi waduk adalah persamaan kontinuitas yang memberi hubungan antara masukan, keluaran dan perubahan tampungan yang disebut analisis perilaku (model simulasi) seperti yang ditunjukkan oleh gambar (Nuramini, 2017).



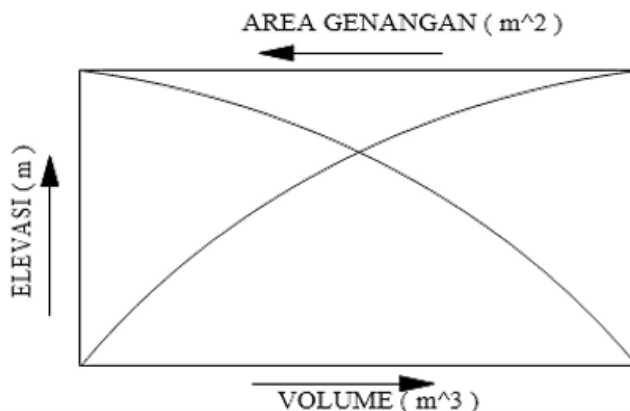
Gambar 8 Operasi Waduk (Nuramini, 2017).

1.6.12.1 Rule Curve

Rule curve adalah ilmu yang menunjukkan keadaan waduk pada akhir periode pengoperasian yang harus dicapai pada suatu nilai *outflow* tertentu (Mc. Mahon: 1978). *Rule curve* pengoperasian waduk adalah kurva atau grafik yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air waduk, debit outflow dan waktu dalam satu tahun (Indrakarya: 1993). *Rule Curve* ini digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk dalam menentukan pelepasan yang diijinkan dan sebagai harapan memenuhi kebutuhan. Pada aturan operasi reservoir dimana lepasan berdasarkan status tampungan waduk, maka dilakukan pembatasan terhadap lepasan apabila tampungan waduk menurun besarnya (Nuramini, 2017).

1.6.12.2 Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk diperlukan untuk menentukan volume total waduk berdasarkan pada data topografi yang ada. Lengkung kapasitas waduk merupakan grafik yang menghubungkan luas daerah genangan dengan volume tampungan terhadap elevasinya. Berhubung fungsi utama waduk adalah untuk menyediakan tampungan, maka ciri fisik utama yang terpenting adalah kapasitas tampungan. Hubungan antara luas genangan, volume waduk terhadap kedalamannya disajikan pada kurva lengkung kapasitas waduk seperti gambar 9 (Nuramini, 2017).



Gambar 9 Grafik Lengkung Kapasitas Waduk (Nuramini, 2017).

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus 2025 dan berakhir pada bulan Desember 2025. Penelitian ini dilaksanakan di Bendungan Bili Bili Makassar dan laboratorium Distribusi Sistem Tenaga dan Instalasi Listrik.

2.2 Variabel Penelitian

A. Variabel Bebas (*Independent Variables*)

Debit Aliran dan Kondisi Hidrologi merupakan faktor utama yang berubah secara alami dan memengaruhi seluruh sistem PLTA. Debit dipengaruhi oleh musim hujan dan musim kemarau, *inflow* sungai, dan kebutuhan air multisektor. Variasi debit menentukan besarnya air yang dapat dialirkan ke turbin dan menjadi dasar perhitungan daya, energi, serta strategi operasi pembangkit.

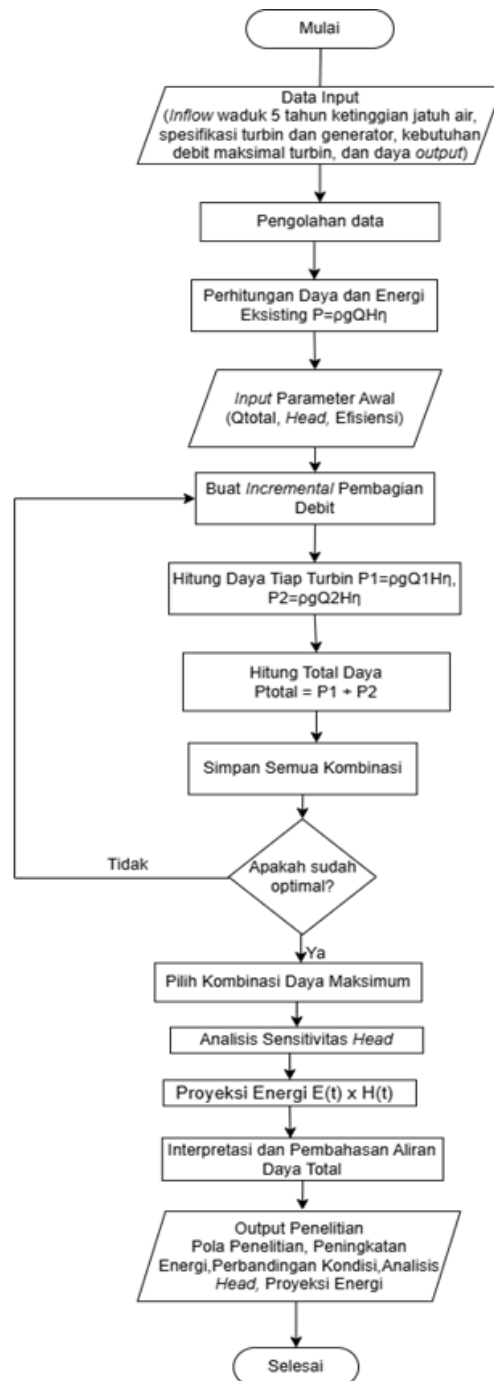
B. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Daya dan Energi Listrik yang dihasilkan merupakan keluaran (*output*) yang dipengaruhi langsung oleh debit, ketinggian, dan pola operasi turbin. Semakin besar debit dan ketinggian yang tersedia, semakin besar daya serta energi tahunan yang dapat dihasilkan. Energi juga dipengaruhi pembagian debit antar turbin dan efisiensi unit, sehingga berubah mengikuti perubahan kondisi hidrologi dan operasi waduk.

C. Variabel Kontrol (*Kontrol Tetap*)

Karakteristik Teknis Turbin dan Kondisi Infrastruktur meliputi efisiensi turbin-generator, batas operasi turbin, tipe turbin, densitas air, serta kondisi infrastruktur yang dianggap tetap. Variabel ini harus dijaga konstan agar perubahan energi benar-benar berasal dari perubahan debit dan ketinggian, bukan dari perubahan teknis peralatan pembangkit.

2.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

Penjelasan mengenai *Flow Chart* diatas meliputi:

1. **Mulai**

Tahap awal yang mendandai dimulainya proses penelitian.

2. **Pengumpulan Data**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan seluruh data yang diperlukan untuk mendukung proses analisis, meliputi data hidrologi seperti debit inflow dan pola aliran musiman, data teknis pembangkit berupa kapasitas turbin, kondisi head, serta efisiensi operasional, dan data pendukung seperti kebutuhan air multisektor serta parameter sedimentasi. Keseluruhan data tersebut menjadi fondasi utama dalam penyusunan skenario, perhitungan teknis, dan analisis lebih lanjut pada tahap berikutnya.

3. **Pengolahan Data**

Data yang telah terkumpul kemudian diolah melalui beberapa tahap penting, yaitu penyelarasan satuan untuk memastikan konsistensi, pemeriksaan kelengkapan agar tidak ada data yang hilang atau tidak valid, penyusunan skenario debit dan kondisi operasi waduk untuk menyesuaikan dengan berbagai kemungkinan operasional, serta penetapan parameter input seperti debit, head, dan efisiensi turbin. Proses ini dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh data yang digunakan telah siap dan akurat sebelum masuk ke tahap perhitungan teknis, sehingga hasil analisis PLTA dapat lebih andal dan representatif.

4. **Perhitungan Teknis Daya dan Energi**

Tahap ini melibatkan perhitungan daya yang dihasilkan dengan menggunakan rumus dasar hidrolik $P = \rho g Q H \eta$, di mana ρ adalah massa jenis air, g percepatan gravitasi, Q debit air, H head efektif, dan η efisiensi sistem. Selanjutnya, daya yang diperoleh dihitung sepanjang waktu operasi, sehingga dapat dihitung energi yang dihasilkan dalam periode harian, bulanan, maupun tahunan, memberikan gambaran lengkap tentang potensi produksi energi PLTA.

5. **Metode Incremental Loading**

Pada tahap optimasi, dibuat berbagai kombinasi alokasi debit antar turbin untuk mengevaluasi kinerja masing-masing skema. Setiap kombinasi dihitung nilai dayanya dan dibandingkan secara sistematis. Dari hasil perbandingan tersebut, kombinasi yang mampu menghasilkan daya total terbesar dipilih sebagai pola operasi yang paling optimal, sehingga pemanfaatan debit air dan kapasitas turbin dapat dimaksimalkan secara efisien.

6. **Analisis Sensitivitas Head**

Kinerja pembangkit diuji pada tiga kondisi head, yaitu head maksimal, head normal, dan head minimal. Hasil perhitungan pada masing-masing kondisi kemudian dibandingkan untuk menganalisis pengaruh perubahan head terhadap daya dan energi yang dihasilkan. Dengan demikian, dapat

diketahui sensitivitas pembangkit terhadap variasi ketinggian jatuh air dan efektivitas operasionalnya dalam berbagai kondisi hidrologi

7. **Proyeksi Jangka Panjang**

Tahap ini memodelkan penurunan *head* akibat sedimentasi dengan menggunakan laju penurunan tahunan yang telah ditetapkan. Berdasarkan model tersebut, dilakukan perhitungan proyeksi energi tahunan selama 10 tahun ke depan dengan pendekatan proporsional antara *head* dan energi yang dihasilkan. Selanjutnya, blok keputusan (Ya/Tidak) digunakan untuk menentukan apakah proyeksi energi dapat dilanjutkan atau perlu kembali ke analisis operasional guna menyesuaikan strategi pengelolaan pembangkit.

8. **Penyajian dan Interpretasi Hasil**

Seluruh hasil simulasi, perhitungan, dan proyeksi disajikan dalam berbagai bentuk, termasuk tabel, grafik, kurva operasi, dan ringkasan perbandingan, untuk mempermudah pemahaman dan interpretasi data. Selanjutnya, data tersebut dianalisis menggunakan standar teknik dan hidrologi yang berlaku, sehingga dapat ditarik kesimpulan yang bermakna secara teknis mengenai kinerja dan potensi energi pembangkit.

9. **Kesimpulan**

Tahap akhir dari penelitian di mana hasil utama ditemukan dan seluruh proses analisis telah dilakukan.

2.4 Teknik analisis

Teknik analisis dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, dimulai dari pengolahan data hidrologi berupa debit *inflow* dan data teknis pembangkit seperti *head*, efisiensi, serta kapasitas turbin. Perhitungan dasar dilakukan menggunakan persamaan daya hidrolik untuk memperoleh daya dan energi sebagai acuan kondisi eksisting. Selanjutnya diterapkan metode *Incremental Loading* dengan membagi variasi debit ke masing-masing turbin dalam langkah-langkah tertentu, kemudian menghitung daya total untuk setiap kombinasi guna menentukan pola operasi yang paling optimal. Analisis juga mencakup pengujian sensitivitas terhadap perubahan *head* pada kondisi maksimal, normal, dan minimal untuk melihat pengaruhnya terhadap daya keluaran. Selain itu, dilakukan proyeksi penurunan *head* akibat sedimentasi menggunakan model linear dan memproyeksikan energi tahunan berdasarkan proporsionalitas antara *head* dan energi. Hasil perhitungan dan proyeksi kemudian divalidasi melalui perbandingan internal antar skenario untuk memastikan konsistensi model analisis.

2.5 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis sebagai berikut.

a. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui tiga jenis data utama, yaitu data hidrologi yang meliputi debit *inflow*, pola aliran musiman, dan karakteristik hidrologi daerah aliran sungai sebagai dasar analisis ketersediaan air; data teknis PLTA yang mencakup kapasitas turbin, batasan operasi, efisiensi, serta kondisi *head* yang diperlukan untuk perhitungan daya dan simulasi operasi pembangkit; serta data pendukung yang terdiri dari kebutuhan air multisektor seperti PDAM dan irigasi, serta parameter sedimentasi yang digunakan untuk menilai penurunan head dan proyeksi kinerja jangka panjang.

b. Metode Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan penyelarasan satuan serta memeriksa kelengkapan dan konsistensi seluruh data yang digunakan. Setelah itu, disusun skenario debit dan kondisi operasi berdasarkan variasi *inflow* serta karakteristik waduk agar simulasi dapat menggambarkan kondisi operasional yang realistis. Selanjutnya, ditetapkan parameter input yang diperlukan dalam perhitungan dan simulasi pembangkitan, meliputi debit, head, dan efisiensi turbin, sehingga proses analisis dapat dilakukan secara terstruktur dan sesuai dengan kondisi teknis pembangkit.

c. Metode Perhitungan Teknis

Perhitungan daya dan energi dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan persamaan dasar hidrolik $P = \rho g Q H \eta$, yang menghubungkan debit aliran, tinggi jatuh air, dan efisiensi turbin terhadap daya listrik yang dihasilkan. Setelah memperoleh nilai daya pada setiap kondisi operasi, energi untuk periode tertentu ditentukan melalui proses integrasi daya terhadap waktu, sehingga diperoleh besaran energi total yang dapat dihasilkan pembangkit dalam interval harian, bulanan, atau tahunan sesuai kebutuhan analisis.

d. Metode Optimasi Operasi (*Incremental Loading*)

Proses optimasi menggunakan metode *Incremental Loading* dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun berbagai kombinasi pembagian debit antar turbin berdasarkan variasi debit yang tersedia pada setiap kondisi operasi. Setiap kombinasi kemudian dihitung nilai dayanya untuk menentukan kontribusi masing-masing turbin dan memperoleh total daya yang dihasilkan. Dari seluruh kombinasi tersebut dipilih pembagian debit yang mampu memberikan daya total terbesar, dan hasilnya digunakan untuk menyusun pola operasi turbin yang paling optimal sehingga pembangkit dapat beroperasi dengan efisiensi maksimum pada berbagai kondisi debit.

e. Metode Analisis Sensitivitas *Head*

Analisis sensitivitas dilakukan dengan menguji performa pembangkit pada tiga kondisi *head*, yaitu *head* maksimal, normal, dan minimal, untuk melihat bagaimana variasi elevasi muka air mempengaruhi kemampuan turbin dalam menghasilkan daya. Setiap kondisi *head* kemudian dibandingkan

berdasarkan perubahan daya dan energi yang dihasilkan, sehingga dapat diidentifikasi seberapa besar pengaruh fluktuasi tinggi jatuh air terhadap efisiensi dan output pembangkitan secara keseluruhan.

f. Metode Proyeksi Jangka Panjang

Pemodelan proyeksi jangka panjang dilakukan dengan memanfaatkan parameter sedimentasi untuk memperkirakan penurunan *head* secara tahunan, sehingga dapat menggambarkan degradasi kinerja hidrolik waduk dari waktu ke waktu. Setelah nilai *head* tahunan diperoleh, proyeksi energi dihitung menggunakan hubungan proporsional antara *head* dan energi untuk menentukan perubahan output pembangkitan pada setiap tahun. Berdasarkan hasil tersebut, disusun proyeksi performa pembangkit selama 10 tahun guna menilai dampak akumulatif sedimentasi terhadap kapasitas produksi energi dan kebutuhan strategi pengelolaan jangka panjang.

g. Metode Penyajian dan Interpretasi Data

Hasil analisis disajikan dalam berbagai bentuk visual seperti tabel, grafik, kurva operasi, serta ringkasan perbandingan untuk mempermudah pemahaman terhadap kinerja pembangkitan dalam setiap skenario yang dianalisis. Seluruh data yang telah dipresentasikan kemudian diinterpretasikan berdasarkan standar analisis teknis dan prinsip hidrologi, sehingga setiap perubahan daya, energi, maupun respon sistem dapat dijelaskan secara sistematis dan sesuai dengan kaidah evaluasi teknis pembangkit listrik tenaga air.