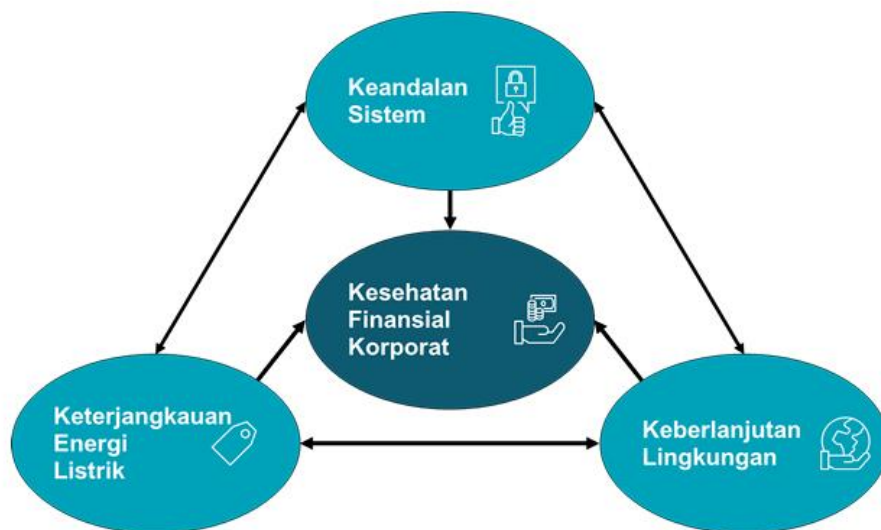


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Komitmen dalam mengurangi emisi gas rumah kaca serta semakin berkurangnya produksi energi fosil terutama minyak bumi mendorong pemerintah untuk meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai upaya dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Hal tersebut selaras dengan target bauran energi baru dan terbarukan tahun 2050 sebesar 23-31% dalam PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional pada tahun 2025.



Gambar 1.1 Pertimbangan Perencanaan Transisi Energi PLN Menuju NZE 2060
(RUPTL, 2025)

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong Pemerintah Indonesia melakukan pengembangan kapasitas pembangkit untuk memenuhi kekurangan penyediaan tenaga listrik, meningkatkan keandalan penyediaan tenaga listrik, dan meningkatkan pemanfaatan sumber energi setempat terutama sumber Energi Baru Terbarukan (EBT). Sejalan dengan usaha menuju *Net Zero Emission* 2060, salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan dalam upaya pengembangan proyek energi terbarukan adalah tenaga air (*hydropower*) melalui Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

PLTA selain berfungsi sebagai pembangkit juga sebagai sistem penyimpanan energi yang berkontribusi dalam menjaga kestabilan pasokan listrik nasional. Mengacu pada RUPTL 2025-2034, PLN memprioritaskan pembangunan PLTA dengan *reservoir* dan *pumped storage* di wilayah dengan potensi energi hidro. Di wilayah Jawa-Bali sendiri terdapat rencana pembangunan PLTA *Pumped Storage* (PS) untuk memperbaiki *load factor*, mengantisipasi penetrasi VRE, serta untuk memenuhi kebutuhan beban puncak. Salah satu rencana pembangunan PLTA *pumped storage* di wilayah Jawa adalah PLTA Grindulu PS yang berlokasi di Pacitan, Jawa Timur. PLTA Grindulu PS akan dibangun sebagai pembangkit pemikul beban puncak yang memanfaatkan Sungai Grindulu sebagai *lower reservoir*.

PLTA Grindulu PS merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga air yang mengandalkan aliran Sungai Grindulu sebagai sumber energi utamanya. Namun, debit air sungai sangat dipengaruhi oleh fluktuasi hidrologi, terutama perubahan musiman dan kondisi geografis setempat. Di antara periode tersebut, musim kemarau menjadi tantangan tersendiri karena menyebabkan penurunan debit air secara signifikan, yang berdampak langsung terhadap kapasitas pembangkitan listrik.

Ketidakteraturan debit air khususnya saat debit berada pada titik terendah di musim kemarau menjadi salah satu permasalahan utama dalam operasional PLTA, termasuk PLTA Grindulu PS. Sistem turbin konvensional (*fixed speed*) tidak dapat menyesuaikan kecepatan debit air sehingga menyebabkan inefisiensi energi listrik. Sehubungan dengan hal tersebut maka PLTA Grindulu PS direncanakan dibangun dengan teknologi *variable speed drive* (VSD) pada motor pompa dengan tujuan untuk meningkatkan pembangkit listrik agar mempunyai *ramping rate* tinggi. Teknologi *variable speed drive* memungkinkan kecepatan putar turbin dan generator dapat disesuaikan secara dinamis dengan debit air yang tersedia pada DAS. Dengan kemampuan ini, pembangkit listrik dapat tetap beroperasi meskipun pada kondisi debit minimum, sehingga potensi air yang ada tetap dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan efisiensi lebih tinggi.

Penerapan VSD pada PLTA Grindulu PS bertujuan untuk memaksimalkan potensi pembangkitan listrik, terutama saat menghadapi kondisi ekstrem musim kemarau. Selain itu penerapan teknologi *variable speed drive* pada PLTA Grindulu PS juga sesuai dengan strategi pengembangan *Variable Renewable Energy* (VRE) pada RUPTL 2021-2030.

Keberhasilan penerapan teknologi *variable speed drive* (VSD) bergantung pada analisis data hidrologi terhadap hidroliknya. Untuk itu rencana tersebut memerlukan kajian mendalam pada aspek hidraulika untuk mengetahui tingkat efisiensi dan keandalan implementasi sistem *variable speed drive* (VSD) khususnya pada musim kemarau serta memaksimalkan potensi pemanfaatan energi air Sungai Grindulu.

Penerapan teknologi *variable speed drive* (VSD) pada sistem PLTA telah dilakukan di banyak tempat namun umumnya fokus pada aspek kelistrikan atau kontrol sistem seperti pada penelitian Kumari & Chelliah (2024) yang menganalisis kinerja mesin induksi berumpan ganda 250 MW *Doubly-Fed Induction Machine* (DFIM) terhadap *speed sensor faults* yang berbeda (kelalaian, penguatan, dan kejenuhan) yang akan memperjelas kebutuhan akan redundansi yang layak secara teknis. Selain itu terdapat penelitian Muteba et al. (2023) yang berfokus pada studi kelayakan, analisis sistem, desain, dan evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga air mikro untuk petani kecil di masyarakat pedesaan negara bagian Taraba di Nigeria. Sementara itu, studi teknis yang secara spesifik fokus pada integrasi data hidrologi dan hidraulika untuk mengkaji efektivitas penerapan *variable speed drive* (VSD) masih terbatas. Khususnya, studi teknis yang fokus pada integrasi data hidrologi dan hidraulika untuk mengkaji efektivitas penerapan VSD pada PLTA Grindulu PS belum pernah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan kasus tersebut, kajian studi ini bersifat orisinal yang secara langsung meninjau kelayakan teknis penerapan *variable speed drive* (VSD) berdasarkan data hidrologi PLTA Grindulu.

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi optimalisasi pemanfaatan air sebagai sumber energi baru dan terbarukan (EBT) melalui penyajian informasi mengenai bagaimana pengaruh sistem *variable speed drive* (VSD) terhadap kesesuaian operasi turbin dengan debit air. Penelitian ini juga dapat memberikan data teknis seperti performa hidraulika, profil debit, dan simulasi kerja *variable speed drive* (VSD) dimana dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan teknis bagi pemerintah, investor, atau PLN untuk mengembangkan PLTA Grindulu. Dengan adanya kajian studi ini, diharapkan dapat turut berkontribusi ilmiah dalam memberikan referensi penerapan *variable speed drive* (VSD) dalam sektor PLTA khususnya Indonesia dengan potensi hidro dengan debit yang fluktuatif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Berdasarkan data hidrologi dan hidraulika yang tersedia, bagaimana karakteristik debit Sungai Grindulu, khususnya pada musim kemarau?
2. Bagaimana kinerja model Bi-LSTM Seq2Seq Quantile Regression dalam memprediksi inflow Sungai Grindulu dibandingkan dengan metode prediksi konvensional?
3. Berdasarkan prediksi inflow, seberapa besar potensi minimum daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh PLTA Grindulu PS saat debit air berada dalam kondisi terendah?
4. Bagaimana efektivitas penerapan teknologi *Variable Speed Drive* (VSD) dalam memaksimalkan potensi pembangkitan listrik PLTA Grindulu PS pada musim kemarau?
5. Apa saja parameter teknis hidraulika yang perlu diperhatikan dalam mendukung penerapan sistem VSD pada kondisi debit minimum di PLTA Grindulu PS?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis data hidrologi dan hidraulika Sungai Grindulu untuk mengetahui profil debit air sepanjang tahun, khususnya pada musim kemarau.
2. Menganalisis potensi minimum pembangkitan daya listrik dari PLTA Grindulu PS berdasarkan debit terendah yang tersedia.
3. Menganalisis sistem *Variable Speed Drive* (VSD) PLTA Grindulu PS dalam mengoptimalkan pembangkitan listrik pada kondisi debit minimum pada musim kemarau.
4. Menganalisis parameter teknis hidraulika apa saja yang perlu diperhatikan dalam mendukung penerapan sistem VSD pada kondisi debit minimum di PLTA Grindulu PS.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat:

1. Menjadi sumber informasi akademis dalam bidang energi terbarukan dan rekayasa sumber daya air.
2. Sebagai referensi teknis bagi perencanaan dan pengembangan PLTA di masa depan.
3. Memberikan pemahaman lebih dalam mengenai keterkaitan antara data hidrologi-hidraulika dengan sistem *variable speed drive*.
4. Mengetahui parameter teknis hidraulika apa saja yang perlu diperhatikan dalam mendukung penerapan sistem VSD pada kondisi debit minimum di PLTA Grindulu PS.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup penelitian ini mencakup:

1. Penelitian ini difokuskan pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Grindulu *Pumped Storage* (PS) yang berlokasi di Pacitan, Jawa Timur, dengan sumber air utama dari Sungai Grindulu.
2. Studi ini terbatas pada analisis data hidrologi dan hidraulika selama musim kemarau, dengan fokus pada kondisi debit terendah sebagai skenario kritis dalam perencanaan teknis.
3. Penelitian menggunakan data historis debit Sungai Grindulu, curah hujan, elevasi muka air, dan parameter teknis hidraulika lainnya yang mendukung simulasi performa turbin dan sistem VSD.
4. Kajian teknis terbatas pada penerapan sistem *Variable Speed Drive* (VSD) sebagai solusi fleksibel dalam mengoptimalkan pembangkitan listrik. Aspek kelistrikan, kontrol sistem lanjutan, atau integrasi jaringan listrik tidak menjadi fokus utama.
5. Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi dan perhitungan teknis untuk menentukan potensi daya yang dapat dihasilkan pada debit minimum dan menganalisis pengaruh penggunaan VSD terhadap efisiensi dan kesinambungan operasi turbin.
6. Penelitian tidak membahas aspek non-teknis seperti studi ekonomi, pembiayaan proyek, analisis sosial-lingkungan, maupun regulasi kebijakan secara mendalam, meskipun kebijakan RUPTL digunakan sebagai landasan arah pengembangan.