

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan mendasar dalam kehidupan manusia modern. Keberadaannya menjadi faktor utama dalam mendukung aktivitas di berbagai sektor, mulai dari industri, transportasi, komunikasi, hingga kebutuhan rumah tangga. Seiring dengan perkembangan teknologi yang pesat di era digital serta pertumbuhan populasi yang terus meningkat, konsumsi energi listrik juga mengalami lonjakan signifikan[1]. Kenaikan permintaan ini menuntut adanya pasokan listrik yang andal, stabil, dan efisien agar sistem kelistrikan dapat bekerja secara optimal. Gangguan dalam penyediaan listrik dapat berdampak luas, tidak hanya menghambat produktivitas industri dan ekonomi, tetapi juga berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan serta terganggunya kehidupan sosial masyarakat.

Dalam sistem pembangkitan listrik, generator memegang peran krusial sebagai perangkat yang bertanggung jawab dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Prinsip kerja generator didasarkan pada hukum *Faraday*, dimana medan magnet yang berputar pada rotor berinteraksi dengan kumparan stator untuk menghasilkan tegangan listrik[2]. Agar sistem kelistrikan tetap berjalan secara stabil, tegangan keluaran generator harus dijaga dalam batas yang telah ditentukan[3]. Namun, dalam kondisi operasional yang dinamis, perubahan beban sering kali menyebabkan fluktuasi tegangan yang berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan serius. Ketidakstabilan tegangan ini dapat mengurangi efisiensi sistem, menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik, mengganggu sistem proteksi, dan bahkan berujung pada pemadaman listrik (*blackout*) jika tidak ditangani dengan baik[4].

Untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran generator, digunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) sebagai sistem kendali otomatis[5]. AVR berfungsi mengontrol tegangan eksitasi rotor agar tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban[6]. Dengan adanya AVR, sistem kelistrikan dapat bekerja lebih stabil, mencegah lonjakan atau penurunan tegangan yang dapat merusak perangkat listrik, serta memastikan kualitas daya listrik tetap optimal. Namun dalam penerapannya, AVR mengalami kesulitan dalam mencapai performa yang optimal, terutama dalam respons terhadap perubahan beban yang cepat. Ketidakmampuan AVR dalam menyesuaikan arus eksitasi secara presisi dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem pembangkitan listrik[7][8]. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengendalian yang lebih efektif untuk meningkatkan performa AVR dalam menjaga kestabilan tegangan generator dan menjaga kekokohan AVR dalam kondisi perubahan beban.

Salah satu metode yang banyak digunakan dalam sistem kendali AVR adalah pengendali Proporsional-Integral-Diferensial (PID)[9]. Pengendali PID bekerja dengan mengkombinasikan tiga aksi utama dalam sistem kendali, yaitu pengendali Proporsional (P) yang menghasilkan respons berdasarkan kesalahan sistem, pengendali Integral (I) yang menghilangkan kesalahan steady-state dengan mengakumulasi kesalahan dari waktu ke waktu, dan pengendali Diferensial (D) yang memberikan respon cepat dengan mengantisipasi perubahan kesalahan. Dengan kombinasi ketiga pengendali tersebut, pengendali PID mampu mengatur tegangan eksitasi secara lebih stabil dan presisi. Namun, efektivitas pengendali PID sangat bergantung pada parameter yang digunakan[10]. Jika parameter PID tidak disetel dengan benar, sistem dapat mengalami osilasi berlebihan, waktu pemulihan yang terlalu lama, atau bahkan ketidakstabilan total[11]. Oleh sebab itu, metode *tuning* yang tepat sangat diperlukan agar pengendali PID dapat bekerja secara optimal dalam menjaga kestabilan tegangan sistem AVR.

Salah satu teknik *tuning* yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter PID adalah *PIDTune*. *PIDTune* merupakan metode penyetelan parameter PID secara otomatis yang memungkinkan pengendali beradaptasi terhadap karakteristik sistem secara lebih presisi[12]. *PIDTune* terdiri dari dua model utama, yaitu *PIDTune* model paralel yang memanfaatkan pendekatan komputasi paralel untuk meningkatkan respons sistem terhadap perubahan beban secara lebih cepat dan akurat, dan *PIDTune* model *standard* yang menggunakan metode konvensional untuk menyesuaikan parameter PID berdasarkan karakteristik sistem. Dengan menerapkan metode *PIDTune*, sistem AVR dapat lebih responsif dalam menyesuaikan tegangan eksitasi, meningkatkan kestabilan tegangan keluaran generator, serta meminimalkan gangguan akibat perubahan beban yang tidak terduga[8].

Penelitian-penelitian sebelumnya terkait *Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah sebagai berikut.

1. Pasala Gopi, S. Venkateswarlu Reddy, Mohit Bajaj, Ievgen Zaitsev, dan Lukas Prokop (2024) dalam penelitiannya yang berjudul “*Performance and Robustness Analysis of V-Tiger PID Controller for Automatic Voltage Regulator*” membahas implementasi dan analisis pengendali PID pada sistem AVR dengan teknik *tuning* baru bernama *V-Tiger (Virtual Time response-based Iterative Gain Evaluation and Re-design)*. Penelitian ini membandingkan kinerja transien dan kekokohan pengendali PID yang di-*tuning* menggunakan *V-Tiger* dengan metode lainnya seperti Ziegler-Nichols, *Pessen Integral Rule*, *Teaching-Learning-based Optimization* (TLbO), dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali PID dengan *tuning* *V-Tiger* memiliki respons transien yang lebih cepat, margin stabilitas yang lebih tinggi, dan ketahanan lebih baik terhadap ketidakpastian sistem, dengan robust stability margin mencapai 3,5[13].

2. Heru Dibyo Laksono dan Rika Ampuh Hadiguna (2021), dengan penelitian yang berjudul “Simulasi Pola Tingkah Laku Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Tipe Arus Searah Dengan Metoda *PIDTune Model Standard*.” Penelitian ini mengevaluasi sistem AVR dengan metode *PIDTune* model *standard* untuk stabilitas tegangan generator[14].
3. Isaac A. Ezenugu, Chisom S. Nwokonko (2024) dengan penelitian yang berjudul “*Automatic Voltage Regulator Control System for Synchronous Generator*.” Penelitian ini mengenai sistem kontrol AVR yang menggunakan model generator sinkron dan *simulink*[15].
4. Heru Dibyo Laksono, Novizon, dan Janra Isram (2021), dengan penelitian yang berjudul “Analisa Peralihan Tanggapan Tegangan Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Tipe Arus Searah dengan Pengendali 2 Derajat Kebebasan” Penelitian ini membahas perancangan dan analisa tanggapan peralihan tegangan sistem AVR tipe arus searah dengan pengendali 2 derajat kebebasan[3].

Penelitian tugas akhir ini akan berfokus kepada analisis peralihan dan kekokohan pada sistem AVR tanpa dan dengan pengendali menggunakan metode *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard* pada arsitektur *standard* dan *pre-filter*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem AVR yang lebih canggih dan efisien, sehingga dapat digunakan dalam berbagai skala pembangkitan listrik. Dengan peningkatan kinerja AVR, stabilitas jaringan listrik dapat lebih terjamin, meminimalkan risiko gangguan operasional, serta meningkatkan efisiensi pasokan energi listrik di berbagai sektor.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Analisis peralihan ditunjukkan oleh parameter waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Hasil analisis awal terhadap parameter – parameter ini menunjukkan bahwa nilainya belum memenuhi kriteria yang ditetapkan.
2. Analisis kekokohan ditunjukkan oleh parameter nilai puncak maksimum sensitivitas, nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer, margin penguatan, dan margin fasa. Hasil analisis awal terhadap parameter – parameter ini menunjukkan bahwa nilainya belum memenuhi kriteria yang ditetapkan.
3. Bagaimana perancangan sistem kendali AVR tipe arus searah dengan *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard* yang memenuhi kriteria analisis peralihan dan kekokohan yang ditetapkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Melakukan simulasi perancangan pengendali untuk sistem AVR tipe arus searah dengan metode *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard* agar analisis peralihan dan kekokohan memenuhi kriteria yang ditetapkan.

2. Menganalisis dan membandingkan tanggapan sistem AVR tipe arus searah menggunakan metode *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard*.
3. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai efektivitas kedua metode dalam mengoptimalkan performansi sistem AVR tipe arus searah serta memberikan rekomendasi yang tepat.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sistem AVR yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem AVR tipe arus searah.
2. Sistem AVR tipe arus dinyatakan dalam bentuk persamaan keadaan dan fungsi alih.
3. Konfigurasi sistem kendali yang digunakan adalah konfigurasi tipe *standard* dan tipe *pre-filter*.
4. Perancangan pengendali dilakukan dalam bentuk simulasi dengan bantuan perangkat lunak *MATLAB*.
5. Simulasi perancangan pengendali yang dilakukan terdiri dari simulasi perancangan pengendali, simulasi perancangan pengendali dengan *Low Pass Filter* (LPF), simulasi perancangan pengendali *High Pass Filter* (HPF), simulasi perancangan pengendali dengan variasi konstanta filter untuk *Low Pass Filter* (LPF), dan simulasi perancangan pengendali dengan variasi konstanta filter untuk *High Pass Filter* (HPF).
6. Simulasi perancangan pengendali yang dilakukan dengan metode *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard*.
7. Analisis sistem kendali yang dilakukan meliputi analisis peralihan dan analisis kekokohan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan berbagai manfaat baik secara teoritis maupun praktis, khususnya dalam bidang sistem kendali AVR tipe arus searah. Adapun manfaat secara teoritis dari penelitian ini adalah

1. Penelitian ini bermanfaat dalam pengembangan ilmu tentang sistem kendali AVR tipe arus searah, khususnya dalam menambah wawasan mengenai *PIDTune* model paralel dan *PIDTune* model *standard*.
2. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai analisis peralihan dan analisis kekokohan dalam sistem AVR tipe arus searah.
3. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode *PIDTune* dengan membandingkan kedua metode *PIDTune* dalam pengendalian sistem AVR tipe arus searah yang dapat dijadikan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan algoritma *tuning* yang lebih optimal.

Manfaat secara praktis dari penelitian ini adalah

1. Optimasi kinerja sistem AVR tipe arus searah dalam sistem tenaga listrik. Hasil penelitian ini memberikan informasi mengenai pemilihan metode *tuning* PID

yang lebih efektif dalam menjaga kestabilan tegangan sistem tenaga listrik, ketahanan sistem tenaga listrik terhadap gangguan, dan membantu dalam meningkatkan keandalan dan respons dinamis sistem AVR tipe arus searah sehingga dapat memperbaiki efisiensi regulasi tegangan.

2. Penerapan dalam desain dan implementasi sistem AVR tipe arus searah. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai panduan bagi insinyur dan praktisi di bidang tenaga listrik dalam menerapkan metode *tuning* PID yang lebih optimal pada sistem AVR tipe arus searah.
3. Memberikan rekomendasi terhadap pemilihan parameter PID berdasarkan karakteristik sistem yang diinginkan, seperti sistem yang kokoh terhadap gangguan atau respons cepat terhadap perubahan beban.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir memiliki tata cara penulisan yang sistematis. Tujuannya untuk memberikan pembaca gambaran tentang tugas akhir ini disusun, sehingga mereka dapat dengan mudah. sistematika penulisan laporan tugas akhir sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang pendahuluan dari penelitian dimulai dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan mengenai teori-teori yang berfungsi sebagai landasan dan acuan dalam menyelesaikan tugas akhir.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang penjelasan dan tahapan proses pelaksanaan penelitian yang dilakukan dari awal hingga akhir penelitian, meliputi diagram alir rencana penelitian, tahapan penelitian, dan rentang waktu pelaksanaan penelitian.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisikan tentang analisis dan pembahasan dari penelitian tugas akhir yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran dari penulis berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.