

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian sistem yang dilakukan, serta analisis data yang diperoleh, maka dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Implementasi sistem kendali *online* PID untuk pengaturan posisi sudut motor DC berbasis enkripsi Twofish telah berhasil direalisasikan. Sistem ini terdiri dari dua komputer yang saling terhubung secara *online* dengan protokol komunikasi TCP dan UDP. Komputer pertama berfungsi sebagai pengendali yang menjalankan algoritma PID, sementara komputer kedua bertugas sebagai penggerak motor DC dengan menerima sinyal PWM dari LabJack T7 serta mengirimkan kembali umpan balik posisi melalui *encoder* magnetik. Dari sisi perangkat lunak, antarmuka pengguna (*frontend*) dikembangkan menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript, sedangkan bagian *backend* memanfaatkan Node.js dan Python untuk menangani perhitungan kendali PID sekaligus proses enkripsi dan dekripsi menggunakan algoritma Twofish.
2. Pengujian komunikasi TCP menunjukkan bahwa penerapan enkripsi Twofish memberikan dampak terhadap performa sistem, terutama pada parameter waktu respons. *Delay time* dan *settling time* mengalami peningkatan dibandingkan kondisi tanpa enkripsi. Misalnya, pada *setpoint* 360°, *delay time* meningkat dari rata-rata 0,971 detik (tanpa enkripsi) menjadi 1,070 detik (dengan enkripsi), dan *settling time* meningkat dari 1,654 detik menjadi 1,797 detik. Penurunan ini disebabkan oleh *overhead* enkripsi serta sifat TCP yang menggunakan mekanisme *three-way-handshake* dan pengiriman ulang paket.
3. Pengujian komunikasi UDP memperlihatkan performa sistem yang lebih baik dibandingkan TCP, dengan waktu respons yang lebih mendekati kondisi *offline*. Pada UDP tanpa enkripsi, nilai *delay time* dan *settling time* relatif rendah. Penambahan enkripsi Twofish pada protokol UDP menyebabkan peningkatan waktu yang sangat kecil dan tidak signifikan, menunjukkan bahwa algoritma ini cocok diterapkan pada sistem kendali waktu nyata yang mengutamakan kecepatan.
4. Dari sisi parameter respons sistem, penerapan enkripsi Twofish tidak memberikan dampak signifikan terhadap *overshoot* dan *steady-state error*, baik pada protokol TCP maupun UDP. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun enkripsi menambah beban komputasi, sistem masih mampu menjaga kestabilan dan akurasi dalam pengaturan posisi sudut motor DC.
5. Perbandingan antara protokol komunikasi menunjukkan bahwa UDP lebih unggul dibandingkan TCP, baik dalam kondisi terenkripsi maupun tidak

terenkripsi. Sifat *connectionless* pada UDP memberikan latensi yang lebih rendah dan tidak terpengaruh oleh proses pengiriman ulang seperti pada TCP. Oleh karena itu, kombinasi antara protokol UDP dan enkripsi Twofish direkomendasikan untuk aplikasi sistem kendali *online real-time* yang membutuhkan kecepatan dan keamanan.

6. Secara keseluruhan, algoritma Twofish terbukti efektif dalam menjaga keamanan komunikasi data tanpa memberikan penurunan performa yang signifikan, khususnya saat dikombinasikan dengan protokol UDP. Penelitian ini menunjukkan bahwa Twofish merupakan solusi enkripsi ringan yang layak digunakan pada sistem kendali industri berbasis jaringan *online*, serta membuka peluang penelitian lanjutan untuk pengujian algoritma enkripsi lainnya dan implementasi pada perangkat *embedded* dengan keterbatasan sumber daya.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, penulis memberikan beberapa rekomendasi untuk penelitian di masa mendatang.

1. Penelitian di masa mendatang dapat menggunakan algoritma enkripsi lain dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi untuk melihat pengaruhnya terhadap performa sistem kendali.
2. Studi lanjutan perlu difokuskan pada strategi menjaga keamanan sistem kendali industri dari berbagai jenis ancaman siber, tidak hanya terbatas pada serangan penyadapan (*eavesdropping*).
3. Disarankan agar penelitian berikutnya menambahkan variasi beban kerja pada kontroler guna mengevaluasi kinerja sistem kendali *online* yang terenkripsi ketika beroperasi dalam kondisi beban lebih berat maupun lingkungan yang lebih kompleks.