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 PID nirkabel untuk pengaturan posisi sudut motor DC berbasis enkripsi ChaCha20 berhasil dilakukan. Sistem dibangun menggunakan dua komputer yang terhubung melalui jaringan nirkabel dengan protokol komunikasi TCP dan UDP. Komputer pertama berperan sebagai pengendali PID, sedangkan komputer kedua berfungsi sebagai penggerak motor DC yang menerima sinyal PWM dari LabJack T7 dan mengembalikan umpan balik posisi dari *encoder* magnetik. Komponen frontend dikembangkan menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript, sementara *backend* menggunakan Node.js dan Python untuk mengelola kendali PID serta proses enkripsi-dekripsi ChaCha20.
2. Pengujian komunikasi TCP menunjukkan bahwa penerapan enkripsi ChaCha20 memberikan dampak terhadap performa sistem, terutama pada parameter waktu respon. *Delay time* dan *settling time* mengalami peningkatan dibandingkan kondisi tanpa enkripsi. Misalnya pada setpoint 360°, *delay time* meningkat dari 0,375 s (*offline*) menjadi 0,893 s (terenkripsi), dan *settling time* dari 0,954 s menjadi 1,549 s. Overshoot juga meningkat dari 2,40% menjadi 4,08%. Dibandingkan dengan kondisi tanpa enkripsi TCP, *delay time*-nya adalah 0,839 s dan *settling time* 1,556 s. Hal ini menunjukkan bahwa enkripsi ChaCha20 hanya memberikan penambahan delay kecil (sekitar 0,054 s) terhadap komunikasi TCP. Penambahan ini disebabkan oleh overhead enkripsi serta sifat TCP yang menggunakan mekanisme three-way-handshake dan pengiriman ulang paket. Meskipun demikian, steady-state error masih tetap rendah (maks. 0,656°), menunjukkan bahwa sistem tetap mencapai kestabilan dengan baik.
3. Pengujian komunikasi UDP memperlihatkan performa sistem yang lebih baik dibandingkan TCP, dengan waktu respon yang lebih mendekati kondisi *offline*. Pada UDP tanpa enkripsi, nilai *delay time* dan *settling time* relatif rendah. Contohnya pada setpoint 90°, *delay time* hanya meningkat dari 0,288 s (offline) menjadi 0,382 s (terenkripsi), dan *settling time* dari 0,724 s menjadi 0,832 s. Jika dibandingkan kondisi tanpa enkripsi UDP, *delay time*-nya adalah 0,348 s dan *settling time* 0,702 s. Peningkatan yang terjadi masih dalam kisaran wajar dan lebih kecil dibanding TCP. *Maximum overshoot* juga masih dapat dikendalikan, yaitu 3,85%, dan steady-state error berada di angka 0,657°.Penambahan enkripsi ChaCha20 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 respon sistem, penerapan enkripsi ChaCha20 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 ChaCha20 direkomendasikan untuk aplikasi sistem kendali nirkabel real-time yang membutuhkan kecepatan dan keamanan.

6. Secara keseluruhan, algoritma ChaCha20 terbukti efektif dalam menjaga keamanan komunikasi data tanpa memberikan penurunan performa yang signifikan, khususnya saat dikombinasikan dengan protokol UDP. Penelitian ini menunjukkan bahwa ChaCha20 merupakan solusi enkripsi ringan yang layak digunakan pada sistem kendali industri berbasis jaringan nirkabel, 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. Perlu dilakukan penelitian dengan algoritma enkripsi lain yang memiliki tingkat keamanan lebih tinggi dan jenis protokol komunikasi lain untuk diamati efeknya terhadap performa sistem kendali,
2. Perlu dilakukan studi lanjutan yang berfokus pada upaya menjaga keamanan sistem kendali industri dari berbagai bentuk serangan siber, tidak hanya terbatas pada penyadapan (eavesdropping).
3. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk menambahkan beban kerja pada kontroler, dengan tujuan mengevaluasi kemampuan sistem kendali *online* yang terenkripsi dalam menghadapi kondisi beban yang lebih besar atau lingkungan yang lebih kompleks.