

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan rangkaian pengujian sistem yang telah dilakukan serta analisis terhadap data yang diperoleh, dapat disimpulkan hasil penelitian sebagai berikut:

1. Sistem kendali PID berbasis online untuk motor DC berhasil dibuat dan dijalankan menggunakan dua komputer yang berbeda. Pada sisi *controller*, Node.js (JavaScript) digunakan untuk menjalankan algoritma PID, menampilkan antarmuka pengguna, serta menangani komunikasi melalui WebSocket dan UDP. Sementara itu, sisi *driver* memanfaatkan Python dan LabJack T7 untuk mengatur motor menggunakan sinyal PWM serta membaca umpan balik dari *encoder*. Selain itu, sistem ini juga menerapkan enkripsi ECC untuk menjaga keamanan data dalam komunikasi dua arah.
2. Perbandingan antara TCP tanpa enkripsi dan TCP terenkripsi menunjukkan perbedaan signifikan dalam kinerja kedua sistem. Sebagai contoh pada *setpoint* 360°, meskipun TCP terenkripsi berhasil mengurangi *delay time* dari 0,8426 detik menjadi 0,5648 detik dan *rise time* dari 0,4938 detik menjadi 0,2092 detik, yang berarti sistem lebih responsif, terdapat penurunan drastis dalam kinerja stabilitas. *Peak time* meningkat dari 1,1464 detik menjadi 2,8584 detik dan *overshoot* maksimum meningkat tajam dari 2,798% menjadi 49,994%. Selain itu, nilai *settling time* dan *steady state error*, yang awalnya bernilai menjadi tidak terdefinisi dikarenakan sistem terus beroasilasi sehingga waktu sistem akan stabil dan perbedaan antara *setpoint* dengan nilai aktual tidak bisa dihitung. Ini menunjukkan bahwa sistem dengan enkripsi membutuhkan waktu lebih lama untuk menstabilkan diri setelah adanya pemberian *setpoint* terutama pada proses enkripsi dan dekripsi.
3. Perbandingan antara UDP tanpa enkripsi dan UDP terenkripsi menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang signifikan. Sebagai contoh pada *setpoint* 360°, meskipun UDP terenkripsi sedikit mengurangi *rise time* dari 0,6278 detik menjadi 0,6004 detik, enkripsi secara keseluruhan memperburuk performa sistem. *Delay time* meningkat dari 0,4374 detik menjadi 0,6392 detik, *peak time* mengalami lonjakan drastis dari 0,8552 detik menjadi 4,5478 detik, dan *overshoot* maksimum meningkat pesat dari 2,594% menjadi 27,674%. Selain itu, *settling time* dan *error steady state* juga menjadi tidak terdefinisi pada UDP terenkripsi dikarenakan sistem yang tidak bisa mencapai keadaan tunak, menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk menstabilkan diri.

4. Penerapan enkripsi dengan algoritma ECC memberikan dampak signifikan terhadap respons transien dan *steady-state error* sistem. Meskipun ECC lebih aman dalam mengamankan pesan dibandingkan algoritma kriptografi lain, proses enkripsi dan dekripsi yang kompleks tetap menambah latensi dalam pengolahan data. Proses matematis yang diperlukan untuk mengenkripsi dan mendekripsi data memperkenalkan overhead komputasi, yang meningkatkan *delay time*, *peak time*, dan *settling time* sistem. Selain itu, sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk menstabilkan diri, yang berkontribusi pada peningkatan *overshoot* maksimum dan *error steady state*.
5. Perbandingan antara protokol komunikasi menunjukkan bahwa UDP memiliki keunggulan dibandingkan TCP, baik dalam kondisi terenkripsi maupun tidak. Karakteristik *connectionless* pada UDP memungkinkan latensi yang lebih rendah dan tidak terpengaruh oleh proses pengiriman ulang yang ada pada TCP.
6. Secara keseluruhan, algoritma ECC terbukti efektif dalam menjaga keamanan komunikasi data walaupun menyebabkan penurunan performa respon transien sistem dan *error steady state* sistem, baik ketika dipadukan dengan protokol TCP maupun UDP. Penelitian ini menunjukkan bahwa ECC adalah solusi enkripsi yang kurang cocok digunakan pada sistem kendali industri berbasis jaringan TCP/IP jika target yang ingin dicapai adalah keandalan respon transien serta *error steady state* yang baik. Jika yang diinginkan adalah keamanan yang tinggi, ECC merupakan salah satu pilihan mengingat proses enkripsi dan dekripsi yang kompleks dan pemecahan ciphertext yang sulit.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian menggunakan algoritma enkripsi lain dengan tingkat keamanan yang sama atau lebih tinggi serta jenis protokol komunikasi yang berbeda untuk menganalisis dampaknya terhadap performa sistem kendali.
2. Jika ingin tetap menggunakan enkripsi dengan proses yang kompleks seperti ECC dan enkripsi sejenisnya, diperlukan pembaruan dan peningkatan perangkat keras seperti prosesor agar beban komputasi algoritma dapat diatasi dan *delay* pemrosesan tidak terjadi.
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menambahkan atau mengombinasikan beban kerja pada sistem dengan tujuan untuk mengevaluasi sejauh mana sistem kendali *online* yang terenkripsi dapat menangani kondisi dengan beban yang lebih tinggi atau lingkungan yang lebih kompleks.