

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan pada prototipe sistem transaksi gerbang tol *free flow* berbasis IoT ini, keempat rumusan masalah yang diajukan pada BAB I telah terjawab melalui pengujian yang saling melengkapi, dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem transaksi berbasis IoT yang dirancang mampu mengurangi saldo secara akurat serta menghindari kesalahan transaksi seperti *double payment* atau kegagalan pemotongan saldo. Hal ini dibuktikan melalui pengujian identifikasi kendaraan pada **Tabel 4.3** serta pengujian validasi saldo dan transaksi pada **Tabel 4.4**, di mana sistem berhasil membedakan empat kondisi yang mungkin terjadi (saldo lebih, saldo pas, saldo kurang, dan UID tidak terdaftar) secara konsisten dan tepat, dengan perhitungan saldo akhir yang selalu sesuai dengan saldo awal dikurangi tarif pada setiap transaksi yang berhasil, tanpa ditemukan satu pun kejadian *double payment* maupun kegagalan pemotongan saldo pada transaksi yang seharusnya gagal.
2. Integrasi antara ESP32 dan Firebase Realtime Database berhasil diimplementasikan sehingga data transaksi dapat disimpan, diproses, dan dipantau secara *real-time* tanpa kehilangan data (*data loss*). Hal ini dibuktikan melalui pengujian konektivitas pada **Tabel 4.1** yang mencapai tingkat keberhasilan koneksi 100% pada seluruh percobaan, pengujian penyimpanan data pada **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6** yang menunjukkan seluruh transaksi tersimpan lengkap dan terstruktur, serta pengujian *dashboard monitoring* pada **Tabel 4.7** dan pengujian *delay* pembaruan data pada **Tabel 4.8**, yang menunjukkan data tersinkronisasi ke *dashboard* dengan tingkat kesesuaian 100% terhadap Firebase dan *delay* pembaruan rata-rata di bawah 2 detik, tanpa mengalami kegagalan pembaruan data.
3. Penerapan metode *Finite State Machine* (FSM) berhasil mengatur alur sistem sehingga proses transaksi berjalan secara terstruktur dan meminimalkan

kesalahan logika sistem. Hal ini dibuktikan melalui rancangan diagram *state* pada **Gambar 3.4**, yang memastikan sistem hanya dapat berpindah antarkondisi (*standby*, validasi, akses diterima, maupun akses ditolak) secara berurutan, serta melalui pengujian identifikasi kendaraan pada **Tabel 4.3** yang mencapai tingkat akurasi 100% tanpa kesalahan pencocokan identitas. Konsistensi transisi antarkondisi transaksi ini terjaga di seluruh scenario pengujian, tanpa ditemukan kondisi sistem yang tidak sesuai maupun tumpang tindih keputusan.

4. Sinkronisasi antara deteksi kendaraan menggunakan sensor ultrasonik, pembacaan RFID, dan proses transaksi berhasil diwujudkan sehingga sistem dapat bekerja secara stabil dan efisien. Hal ini dibuktikan melalui pengujian akurasi sensor pada **Tabel 4.11** yang menunjukkan *error* deteksi jarak di bawah 1%, pengujian jarak pembacaan *RFID reader* pada **Tabel 4.12** dengan jarak baca efektif hingga 100 cm, pengujian aktuator (motor servo dan *relay*) pada **Tabel 4.13** dan **Tabel 4.14** yang menunjukkan waktu respons mekanis tidak lebih dari 0,35 detik, serta pengujian catu daya pada **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10** yang menunjukkan seluruh komponen bekerja dalam rentang toleransi yang wajar dan tetap stabil meskipun dibebani secara bersamaan. Sinkronisasi antarkomponen ini turut didukung oleh kecepatan komunikasi data yang responsif, dengan estimasi total waktu proses dari kendaraan teridentifikasi hingga transaksi tercatat sekitar 2,07 detik.

Secara keseluruhan, prototipe sistem transaksi gerbang tol *free flow* berbasis IoT Firebase yang dikembangkan dalam penelitian ini telah menunjukkan performa yang baik, baik dari sisi keakuratan transaksi, integrasi data *real-time*, penerapan alur sistem yang terstruktur, maupun sinkronisasi antarkomponen perangkat keras dan perangkat lunak, sekaligus menjawab keempat rumusan masalah yang diajukan pada BAB I.

5.2 Saran

Dari keterbatasan yang ditemukan selama proses pengujian serta batasan masalah yang telah ditetapkan pada BAB I, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, di antaranya:

1. Pengujian konektivitas dan kecepatan pengiriman data pada penelitian ini masih menggunakan jaringan *hotspot smartphone* yang bersifat sementara dan rentan terhadap fluktuasi sinyal seluler. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jaringan *broadband* tetap (seperti *router Wi-Fi* rumah/kantor atau koneksi *fiber optic*) untuk memperoleh gambaran performa sistem yang lebih representatif terhadap kondisi implementasi nyata di lapangan.
2. Pengujian dengan kondisi kendaraan bergerak telah dilakukan menggunakan *chassis* mobil sebagai representasi kendaraan sesungguhnya, dan sistem terbukti mampu mendeteksi serta memproses transaksi dengan baik selama kendaraan melintas secara lurus. Namun, *chassis* yang digunakan pada penelitian ini belum memiliki kemampuan *steering* otomatis, sehingga pada skenario transaksi gagal (saldo tidak mencukupi atau UID tidak terdaftar) yang seharusnya mengarahkan kendaraan menuju jalur keluar, proses pembelokan arah kendaraan masih dilakukan secara manual. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan *chassis* atau platform kendaraan yang dilengkapi kemampuan *steering* otomatis yang terintegrasi dengan logika kendali, sehingga pengalihan kendaraan menuju jalur keluar pada kondisi transaksi gagal dapat diuji secara sepenuhnya otonom tanpa intervensi manual.
3. Sistem pada penelitian ini masih menggunakan simulasi gerbang (palang) sebagai representasi, sehingga belum sepenuhnya menerapkan konsep *free flow* tanpa hambatan fisik. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan implementasi tanpa palang fisik, misalnya dengan memanfaatkan kombinasi kamera pengenalan pelat nomor (ANPR) dan *multi-lane free flow* (MLFF) sepenuhnya, sehingga kendaraan benar-benar tidak perlu mengurangi kecepatan saat melintasi gerbang.

4. Sistem transaksi pada penelitian ini belum melayani fitur pengisian ulang (*top-up*) saldo secara langsung pada prototipe gerbang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan fitur *top-up* saldo, baik secara terintegrasi pada *dashboard* maupun melalui aplikasi terpisah, guna melengkapi siklus transaksi secara menyeluruh.
5. Skema tarif pada penelitian ini masih bersifat flat dan hanya berlaku untuk satu golongan kendaraan. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan skema tarif berdasarkan jarak tempuh (*closed system*) maupun penggolongan kendaraan yang lebih variatif, sesuai dengan kebutuhan implementasi tol yang sesungguhnya.
6. Penelitian ini difokuskan pada integrasi sistem transaksi dan pengolahan data, sehingga belum membahas aspek keamanan jaringan secara mendalam. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan mekanisme keamanan tambahan, seperti enkripsi data transaksi dan autentikasi tingkat lanjut pada komunikasi antara ESP32 dan Firebase, mengingat sistem ini berkaitan langsung dengan data finansial pengguna.
7. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan dalam skala prototipe pada lingkungan *indoor*, sehingga belum mempertimbangkan pengaruh kondisi lingkungan nyata seperti cuaca, suhu ekstrem, maupun gangguan elektromagnetik eksternal. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian pada lingkungan *outdoor* atau dalam kondisi yang lebih mendekati implementasi nyata di lapangan.