

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan terhadap subsistem deteksi kelelahan otot bicep berbasis sinyal *Electromyography* (EMG) menggunakan ESP32, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem yang dirancang berhasil menangkap sinyal EMG melalui sensor sEMG dengan *sampling rate* 1000 Hz, kemudian mengekstraksi dua parameter utama yaitu *Mean Absolute Value* (MAV) dan *Median Frequency* (MDF) melalui perhitungan FFT, sebagaimana dibuktikan pada pengujian pemrosesan sinyal (subbab 4.2.1) yang menunjukkan sistem mampu merespons rentang frekuensi yang diberikan oleh *function generator* sesuai spesifikasi kebutuhan 2.1.1.
2. Klasifikasi tingkat kelelahan otot (NORMAL/WASPADA/BAHAYA) menggunakan *fuzzy inference system* Sugeno, dengan parameter fungsi keanggotaan yang diperoleh melalui analisis ROC dan *Youden's Index* terhadap 10 orang responden kalibrasi, terbukti mampu mendeteksi kondisi risiko cedera (BAHAYA) pada kondisi latihan beban *bicep curl* yang sesungguhnya. Hasil pengujian pada 6 orang responden menunjukkan tingkat keberhasilan deteksi kondisi BAHAYA sebesar 66,7% (4 dari 6 sesi), dengan pola perubahan nilai MAV dan MDF yang konsisten dengan dasar teori fisiologi kelelahan otot yang digunakan.
3. Sistem mampu memproses dan mentransmisikan data secara *real-time* dengan latensi yang relatif rendah, sebagaimana dibuktikan pada pengujian rekonsiliasi waktu antara *system log* web dan *Serial Monitor* ESP32 (subbab 4.2.3), yang menunjukkan sistem responsif terhadap perintah pengguna maupun pembaruan data pengukuran tanpa mengalami penundaan yang signifikan.

4. Perubahan komponen notifikasi dari *vibration motor* menjadi *buzzer* pasif 3 volt pada pin 33 terbukti efektif memberikan umpan balik yang dapat dikenali pengguna secara langsung melalui pola bunyi berbeda (diam untuk NORMAL, putus-putus untuk WASPADA, dan kontinu untuk BAHAYA pada frekuensi 500 Hz), sekaligus menyederhanakan fungsi LED RGB yang kini murni berperan sebagai indikator status/mode operasi alat (merah = *standby*, hijau = Mode 1, biru = Mode 2), tanpa lagi merangkap sebagai indikator kondisi kelelahan.
5. Media penyimpanan riwayat data yang semula direncanakan menggunakan MicroSD Card Module dialihkan menjadi Firebase Realtime Database, dikarenakan kebutuhan sistem untuk mendukung pemantauan dan penyimpanan data secara terintegrasi dalam satu media tanpa komponen perangkat keras tambahan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data riwayat tetap tersimpan dan dapat diakses kembali secara utuh setelah 10 hari pengujian, melampaui target minimal 7 hari sesi pada spesifikasi 2.1.6.
6. Baterai yang semula dirancang menggunakan Li-Po 3,7 V 1000 mAh diganti menjadi baterai Lithium-ion 18650 3,7 V 3600 mAh dikarenakan kendala ketersediaan komponen secara *offline*. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu beroperasi secara kontinu selama ± 4 jam (240 menit), jauh melampaui target durasi minimum 60 menit pada spesifikasi 2.1.7, meskipun konsumsi arus rata-rata sistem (± 900 mA) mendekati estimasi arus puncak pada analisis kebutuhan daya proposal, akibat pola transmisi data ke Firebase yang berlangsung hampir kontinu.
7. Antarmuka pemantauan yang semula berbasis *website* diubah menjadi aplikasi seluler menggunakan arsitektur *Hybrid WebView Container*, sehingga sistem dapat dipasang dan diakses langsung dari *smartphone* tanpa melalui peramban. Hasil pengujian *black box* secara menyeluruh (subbab 4.2.6) membuktikan bahwa seluruh alur pemakaian sistem - mulai dari pemilihan mode, kalibrasi *baseline*, pemantauan *real-time*, notifikasi *buzzer*, penyimpanan riwayat, hingga proses reset - berjalan sesuai dengan

hasil yang diharapkan, menunjukkan integrasi yang baik antara ESP32, Firebase Realtime Database, dan aplikasi *mobile*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, subsistem deteksi kelelahan otot bisep ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut agar memiliki performa dan cakupan fungsi yang lebih baik. Adapun saran untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Tingkat keberhasilan deteksi kondisi BAHAYA pada pengujian (66,7%) masih dapat ditingkatkan. Perlu dilakukan pengujian dengan jumlah responden yang lebih banyak dan durasi observasi per sesi yang lebih panjang, mengingat durasi pengamatan pada pengujian ini ($\pm 1-2$ menit per sesi) masih jauh lebih singkat dibandingkan durasi maksimum latihan pada spesifikasi (60 menit), sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi kelelahan otot pada sesi latihan penuh.
2. Beberapa hasil pengujian menunjukkan skor klasifikasi yang sangat mendekati ambang batas BAHAYA tanpa berhasil melewatinya. Perlu dilakukan penyesuaian ulang (*re-tuning*) terhadap parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* atau penambahan jumlah responden pada tahap analisis ROC dan *Youden's Index*, agar sensitivitas klasifikasi lebih akurat merepresentasikan variasi kondisi kelelahan otot antar individu.
3. Karena frekuensi nada *buzzer* pasif pada kondisi WASPADA dan BAHAYA saat ini disamakan (500 Hz) dan hanya dibedakan melalui pola bunyi, disarankan untuk mengeksplorasi variasi frekuensi maupun kombinasi pola bunyi yang lebih jelas dibedakan, terutama untuk mengantisipasi kondisi lingkungan olahraga yang bising sehingga pola bunyi sulit dibedakan secara pendengaran.
4. Mekanisme penyimpanan riwayat dan komunikasi data yang saat ini sepenuhnya bergantung pada koneksi WiFi dan layanan Firebase perlu dilengkapi dengan mekanisme penyimpanan sementara (*local buffer*) pada

ESP32, agar data pengukuran tidak hilang apabila terjadi gangguan koneksi internet selama sesi latihan berlangsung.

5. Pemilihan baterai Li-ion 18650 3600 mAh sebagai pengganti Li-Po 1000 mAh, meskipun berhasil memperpanjang durasi operasional secara signifikan, membawa konsekuensi berupa bentuk fisik yang lebih besar dan berat, sehingga berpotensi mengurangi aspek ergonomis perangkat *wearable*. Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan penggunaan baterai dengan kapasitas tinggi namun berdimensi lebih ringkas, atau optimasi efisiensi daya sistem (misalnya melalui manajemen mode *sleep* ESP32 di sela pengiriman data), sebagai alternatif untuk mencapai durasi operasional yang panjang tanpa mengorbankan portabilitas.
6. Pengujian ketahanan daya baterai pada penelitian ini baru dilakukan dalam satu kali percobaan (*single trial*). Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian berulang pada kondisi penggunaan yang berbeda (misalnya frekuensi kondisi WASPADA/BAHAYA yang berbeda-beda atau kekuatan sinyal WiFi yang bervariasi), guna memperoleh gambaran ketahanan daya yang lebih representatif.
7. Perlu dilakukan validasi terhadap ambang batas klasifikasi kelelahan (nilai MAV dan MDF pada Tabel 4.2 dan 4.4) oleh pelatih kebugaran, fisioterapis, atau ahli biomekanika, untuk memastikan bahwa zona penilaian yang diterapkan pada logika *fuzzy* benar-benar sesuai dengan standar keselamatan latihan beban secara medis maupun olahraga.