

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan seluruh tahapan perancangan, pendekatan pemodelan ganda (*Dual-Modeling*), hingga pengujian stokastik jangka panjang yang telah dilaksanakan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan utama untuk menjawab rumusan masalah penelitian

1. Perancangan Kapasitas dan Konfigurasi Sistem

Konfigurasi *Microgrid* stasiun pengisian kendaraan listrik (SPKL) di Kampus Limo UPN "Veteran" Jakarta berhasil diimplementasikan secara optimal menggunakan topologi *AC-Coupled*. Kapasitas sistem ditentukan sebesar 39,6 kWp untuk panel surya dan 81,6 kWh untuk Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) berbasis *Lithium Iron Phosphate* (LFP). Demi menjaga usia pakai sel elektrokimia, operasional baterai dibatasi secara ketat pada ambang *Depth of Discharge* (DoD) sebesar 80%. Selain itu, kapasitas *bidirectional inverter* ditetapkan sebesar 65,28 kW untuk menjamin stabilitas laju pengisian aman pada rasio mendekati 0,8C. Melalui pendekatan *Dual-Modeling*, sirkuit matematis berhasil divalidasi dengan tingkat galat pelacakan di bawah 0,2%, sementara pemodelan fisis terbukti merekam efisiensi perangkat keras pada rentang 88% hingga 92% dan arus bocor sebesar -0,14 Watt saat relai proteksi aktif di batas *State of Charge* (SoC) 95%.

2. Kinerja Strategi Manajemen Energi Dinamis

Strategi EMS terbukti andal dalam mengatur aliran daya dengan menerapkan hierarki satu arah, yaitu PV ke Beban, dilanjutkan ke Baterai, dan terakhir ke Jaringan *Grid* PLN. Algoritma Indeks Prioritas Pengisian (IPP) berbasis sisa waktu parkir terbukti jauh lebih superior dibandingkan metode pengisian konvensional dalam mengeksekusi manuver pemangkasan beban puncak). Melalui alokasi daya yang dinamis dan proporsional, algoritma IPP sukses meredam beban puncak secara ekstrem dari 44,00 kW menjadi hanya 19,76 kW (reduksi lebih dari 55%), sekaligus memastikan seluruh kendaraan tetap mencapai target akhir pengisian SoC 90% secara presisi tepat pada waktu keberangkatan.

3. Keandalan Sistem terhadap Fluktuasi Cuaca dan Beban Stokastik

Kinerja sistem menghadapi ketidakpastian tervalidasi secara komprehensif melalui simulasi *Monte Carlo* berskala 3,65 juta hari operasional. Sistem *Microgrid* mencatatkan keandalan pelayanan yang sangat tinggi dengan *Expected Unserved Energy* (EUE) hanya sebesar 0,36%, yang merepresentasikan tingkat keberhasilan layanan di atas 99,64%. Pemenuhan beban kelistrikan didistribusikan secara optimal melalui bauran energi sebesar 28,4% *Direct PV*, 21,2% pelepasan daya BESS, dan 50,4% impor jaringan PLN. Penggunaan topologi *AC-Coupled* sukses mencegah terjadinya rugi-rugi konversi daya ganda, dibuktikan dengan capaian *Self-Consumption Ratio* (SCR) sebesar 45,34% dan *Direct Consumption Fraction* (DCF) sebesar 25,16% yang jauh mengungguli arsitektur terpusat DC konvensional. Lebih lanjut, kendati *Self-Sufficiency Ratio* (SSR) agregat tahunan berada di angka 49,61% akibat besarnya pembebanan dasar operasional kampus, sistem mampu mencapai tingkat kemandirian absolut di atas 75% pada skenario cuaca cerah di akhir pekan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis dan batasan yang diterapkan pada penelitian ini, beberapa rekomendasi teknis yang diusulkan untuk pengembangan operasional dan penelitian lanjutan adalah sebagai berikut:

1. Integrasi Optimasi Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Disarankan untuk mengganti algoritma MPPT konvensional *Perturb and Observe* (P&O) dengan metode kontrol heuristik tingkat lanjut, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) atau *Fuzzy Logic Controller*. Pemutakhiran algoritma pelacakan ini diperlukan untuk meminimalisir waktu jeda fisis dan meningkatkan akurasi ekstraksi daya puncak secara instan saat sistem dihadapkan pada fluktuasi iradiasi cuaca ekstrem atau tutupan bayangan sebagian (*partial shading*).

2. Analisis Tekno-Ekonomi Berbasis Tarif Waktu Penggunaan (*Time-of-Use*)

Penelitian ke depan sangat disarankan untuk memasukkan parameter analisis finansial yang komprehensif dengan menerapkan skema tarif

dinamis *Time-of-Use* (TOU) dari jaringan distribusi listrik. Sinkronisasi algoritma EMS terhadap struktur multi-tarif akan memberikan valuasi yang sangat akurat mengenai *Life-Cycle Cost* (LCC) dan *Payback Period* dari infrastruktur SPKL, khususnya dalam mengeksploitasi celah arbitrase energi (*energy arbitrage*) saat perbedaan harga jual-beli daya dari *Grid* utilitas sedang tinggi.

3. Ekspansi Variasi Kecepatan Port Pengisian Daya (Level 3)

Diperlukan pemodelan beban dinamis yang lebih kompleks dengan mengonfigurasi persilangan jenis port pengisian, misalnya dengan menambahkan infrastruktur DC Fast Charging (DCFC) berkapasitas di atas 50 kW berdampingan dengan unit pengisian AC Level 2 saat ini. Penambahan beban transien berkapasitas besar ini ditujukan untuk menguji ketangguhan stabilitas kelistrikan mikro dan tingkat adaptabilitas manuver algoritma Indeks Prioritas Pengisian (IPP) dalam mencegah kelebihan beban (*overloading*) pada transformator