

**INTEGRASI SCADA BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN
AI UNTUK PENJADWALAN BEBAN PADA SISTEM
MANAJEMEN ENERGI RUMAH**

TESIS



**Oleh :
AKBAR NURSYA'BANNI ARDIYANTO
NIM. 24.131.005**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
KONSENTRASI ELEKTRONIKA KONTROL**

**PROGRAM PASCASARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2026**

**INTEGRASI SCADA BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN
AI UNTUK PENJADWALAN BEBAN PADA SISTEM
MANAJEMEN ENERGI RUMAH**

TESIS

Diajukan kepada

Institut Teknologi Nasional Malang

**Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Menyelesaikan Program Studi Magister Teknik Elektro**

Peminatan Elektronika Kontrol

Oleh

AKBAR NURSYA'BANNI ARDIYANTO

NIM. 24.131.005

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

KONSENTRASI ELEKTRONIKA KONTROL

PROGRAM PASCASARJANA

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FEBRUARI

2026



BERITA ACARA UJIAN TESIS

PROGRAM STUDI : MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

NAMA : AKBAR NURSYA'BANNI ARDIYANTO
NIM : 24.131.005
PROGRAM STUDI : MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PEMINATAN : ELEKTRONIKA KONTROL
JUDUL : INTEGRASI SCADA BERBASIS RASPBERRY PI
DENGAN AI UNTUK PENJADWALAN BEBAN PADA
SISTEM MANAJEMEN ENERGI RUMAH

Di Pertahankan Dihadapan Tim Penguji Ujian Tesis Jenjang Program Studi Pascasarjana
Magister Teknik (S-2)

Pada Hari : JUM'AT

Tanggal : 13 FEBRUARI 2026

Dengan Nilai :

PANITIA UJIAN TESIS

Ketua

Prof. Dr. Eng. Aryanto Soetedjo, ST., MT
NIP. Y. 1030800417

Sekretaris

Dr. Irmalia Suryani Faradisa, ST., MT.
NIP. P. 1030000365

Penguji I

Dr. Michael Ardhita, ST., MT.
NIP. P. 1031000434

Penguji II

Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST., MT
NIP. P. 1030100361

Tesis oleh **AKBAR NURSYA'BANNI ARDIYANTO**, NIM 24.131.005, ini telah diperiksa dan disetujui dalam ujian :

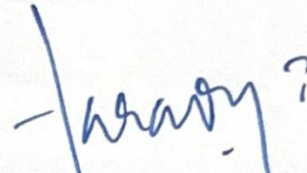
Malang, Februari 2026

Pembimbing I



Prof. Dr. Eng Aryuanto Soetedjo ST. MT.
NIP. Y. 1030800417

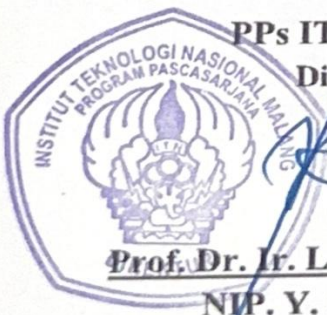
Pembimbing II



Dr. Irmalia Suryani Faradisa, ST., MT.
NIP. P. 1030000365

Mengetahui :

Institut Teknologi Nasional Malang
Program Pascasarjana



PPs ITN Malang
Direktur

Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT.
NIP. Y. 1018700153



Magister Teknik Elektro
Ketua Program Studi

Dr. F. Yudi Cimpraptono, ST., MT.
NIP. Y. 1039500274

**PERNYATAAN
ORISINALITAS TESIS**

Saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur "*plagiasi*", saya bersedia Tesis ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (Magister Teknik) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, Februari 2026



Akbar Nursya'banni Ardiyanto

NIM. 24.131.005

ABSTRAK

Home Energy Management System (HEMS) bertujuan mengelola konsumsi energi rumah tangga agar pemanfaatan pembangkit energi terbarukan, khususnya photovoltaic (PV) terhubung grid, menjadi lebih optimal sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi impor dari jaringan listrik (grid import). Penelitian ini mengusulkan integrasi sistem SCADA yang dapat di-deploy pada Raspberry Pi dengan metode penjadwalan beban menggunakan Genetic Algorithm (GA) untuk meminimalkan energi impor dari grid (sebagai proxy biaya). Penjadwalan dilakukan dengan resolusi waktu 10 menit dalam horizon harian (24 jam) yang dievaluasi selama satu minggu (7 hari). Sistem diimplementasikan secara end-to-end menggunakan Node-RED sebagai antarmuka SCADA (Human Machine Interface dan API) yang terintegrasi dengan mesin optimasi berbasis Python. Evaluasi sistem menggunakan dataset time-series yang mencakup profil PV, beban dasar (fridge, freezer, lampu, pompa air), serta beban terjadwal (water heater, mesin cuci, rice cooker, oven/microwave) dengan batasan jendela waktu operasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode GA mampu menurunkan total energi impor grid dan meningkatkan rasio pemanfaatan PV (PV utilization) dibandingkan dengan skenario jadwal tetap (fixed schedule). Penelitian ini juga menyertakan artefak implementasi berupa dataset, alur Node-RED, dan kode Python untuk mendukung replikasi sistem.

Kata Kunci: HEMS, PV *grid-connected*, Node-RED, SCADA, *Genetic Algorithm*, Raspberry Pi, optimasi beban.

ABSTRACT

A Home Energy Management System (HEMS) aims to align household consumption with renewable generation, specifically grid-connected photovoltaic (PV), to reduce energy imported from the grid. This thesis proposes a SCADA system designed to be deployable on a Raspberry Pi with a Genetic Algorithm (GA) load scheduling method to minimize grid-imported energy (as a proxy for cost). The scheduling is performed with a 10-minute resolution over a daily horizon (24 hours), evaluated over a one-week period (7 days). The system is implemented end-to-end using Node-RED as the SCADA interface (Human Machine Interface and API) integrated with a Python-based optimization engine. The evaluation uses a time-series dataset containing PV profiles, base loads (fridge, freezer, lighting, water pump), and schedulable appliances (water heater, washing machine, rice cooker, oven/microwave) under time-window constraints. Results indicate that the GA method reduces total grid import energy and improves PV utilization compared to a fixed schedule scenario. Reproducible artifacts are provided, including the dataset, Node-RED flows, and Python code.

Keywords: *HEMS, grid-connected PV, Node-RED, SCADA, Genetic Algorithm, load scheduling, Raspberry Pi.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan limpahan rahmat dan hidayahnya dalam menyelesaikan tesis ini dengan judul “Integrasi SCADA Berbasis Raspberry Pi dengan AI untuk Penjadwalan Beban pada Sistem Manajemen Energi Rumah”

Tesis ini merupakan persyaratan akademis dalam memperoleh gelar Magister Teknik Elektro di Institut Teknologi Nasional Malang.

Tesis ini tidak akan berhasil dengan baik tanpa adanya bimbingan dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu tidak lupa peneliti mengucapkan banyak terima kasih yang terhingga kepada :

1. Kedua orang tua saya beserta saudari saya, Bapak Suriyanto dan Ibu Mardijani, Adik Wulan Aulia Ardiyanti yang selalu mendukung, mendoakan serta memberikan dorongan kepada penulis dari awal hingga tesis ini selesai.
2. Bapak Awan Uji Krismanto, ST., MT., Ph.D, selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT, selaku Direktur Program Pascasarjana Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Bapak Dr. F. Yudi Limpraptono, ST., MT, selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Elektro Institut Teknologi Nasional Malang.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Aryuanto Soetedjo, ST., MT. selaku dosen pembimbing I
6. Bapak Dr. Irmalia Suryani Faradisa, ST., MT. selaku dosen pembimbing II
7. Segenap dosen-dosen, karyawan administrasi dan perpustakaan yang telah memberikan bantuannya dalam penulisan tesis.
8. Teman-teman Program S-2 Teknik Elektro atas dorongan moril yang telah diberikan.

Dalam tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan – kekurangan walaupun peneliti sudah berusaha menampilkan yang terbaik. Oleh karena itu peneliti membutuhkan saran dan kritik dari pembaca demi penyempurnaan tesis ini, dan kami berharap semoga bermanfaat bagi pembaca.

Malang, Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| ABSTRAK | I |
| ABSTRACT | II |
| KATA PENGANTAR | III |
| DAFTAR ISI | IV |
| DAFTAR GAMBAR | VI |
| DAFTAR TABEL | VII |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| Latar Belakang..... | 1 |
| Identifikasi Masalah | 2 |
| Rumusan Masalah | 2 |
| Tujuan Penelitian..... | 2 |
| Batasan Masalah..... | 3 |
| Sistematika Penulisan..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| Penelitian Terdahulu..... | 5 |
| Sistem SCADA dalam Pengelolaan Energi Terbarukan | 9 |
| Raspberry Pi dalam SCADA | 10 |
| Home Energy Management System (HEMS) | 10 |
| Kecerdasan Buatan dalam Optimasi Energi | 11 |
| Sistem Energi Terbarukan | 12 |

| | |
|--|-----------|
| Algoritma Genetika (<i>Genetic Algorithm</i>) | 12 |
| Research Gap dan Kontribusi Penelitian | 14 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | 16 |
| Arsitektur Sistem | 16 |
| Rancangan Optimasi Penjadwalan | 17 |
| Rancangan SCADA Menggunakan Node RED | 24 |
| BAB IV IMPLEMENTASI DAN HASIL PENGUJIAN..... | 26 |
| Implementasi Algoritma Optimasi GA..... | 26 |
| Implementasi Sistem SCADA HEMS Berbasis Node-RED | 29 |
| Pengujian SCADA NODE RED | 34 |
| Pengujian Optimasi GA..... | 37 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 46 |
| Kesimpulan..... | 46 |
| Saran | 46 |
| DAFTAR PUSTAKA | 47 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.2 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)..... | 10 |
| Gambar 2.3 HEMS (Home Energy Management System)..... | 11 |
| Gambar 3.1 Konfigurasi sistem HEMS terintegrasi SCADA-AI pada perangkat embedded Raspberry Pi | 17 |
| Gambar 3.2 Representasi Kromosom untuk Penjadwalan Beban | 20 |
| Gambar 3.3 Rancangan Modul Fungsional SCADA pada Node-RED..... | 24 |
| Gambar 4.1 Flow Node-RED untuk endpoint optimasi dan Python bridge pada sistem SCADA HEMS. | 29 |
| Gambar 4.2 Tampilan utama HMI SCADA HEMS yang menampilkan status perangkat dan jadwal load scheduling. | 30 |
| Gambar 4.3 Menu pengelolaan perangkat untuk mengatur beban schedulable dan non- schedulable. | 30 |
| Gambar 4.4 Form Tambah/Edit Perangkat (load) | 33 |
| Gambar 4.5 Antarmuka optimasi offline berbasis data historis (database) untuk pemilihan rentang tanggal dan pemicu optimasi. | 33 |
| Gambar 4.6 Tampilan data timeseries (dataset) hasil pembacaan dari database/CSV pada system. | 35 |
| Gambar 4.7 Grafik visualisasi energi harian PV dan total beban dasar. | 35 |
| Gambar 4.8 Hasil optimasi jadwal beban (Gantt) dan visualisasi konsumsi energi hasil optimasi. | 36 |
| Gambar 4.9 Simulasi realtime (SCADA + playback database) beserta area jadwal H+1 (realtime-GA) pada dashboard. | 36 |
| Gambar 4.10 Profil mingguan PV dan base load (interval 10 menit). | 40 |
| Gambar 4.11 Perbandingan PV dan total beban (baseline vs GA) pada Hari 1..... | 41 |
| Gambar 4.12 Energi impor grid per hari (kWh): baseline vs GA. | 42 |
| Gambar 4.13 PV utilization per hari: baseline vs GA. | 43 |
| Gambar 4.14 PAR per hari: baseline vs GA..... | 44 |
| Gambar 4.15 Visualisasi Gantt jadwal appliance (Hari 1) hasil GA..... | 45 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu..... | 5 |
| Tabel 3.1 Parameter Peralatan Terjadwal dan Constraint Jendela Waktu Operasi. | 19 |
| Tabel 3.2 Parameter GA pada eksperimen. | 23 |
| Tabel 4.1 Struktur Dataset HEMS_DATA_2025_10min.csv. | 27 |
| Tabel 4.2 Skenario pengujian fungsional sistem SCADA HEMS. | 31 |
| Tabel 4.3 Ringkasan metrik per hari: baseline vs GA. | 38 |
| Tabel 4.4 Analisis perubahan metrik harian (GA terhadap baseline)..... | 38 |
| Tabel 4.5 Menyajikan statistik ringkas (mean \pm std) selama 7 hari. | 39 |

Daftar Singkatan

| | |
|----------|---|
| API | : Application Programming Interface |
| CSV | : Comma-Separated Values |
| DSM | : Demand Side Management |
| DT | : Durasi time-slot (10 menit) |
| GA | : Genetic Algorithm |
| HEMS | : Home Energy Management System |
| HMI | : Human–Machine Interface |
| IoT | : Internet of Things |
| kWh | : Kilowatt-hour |
| Node-RED | : Flow-based programming untuk integrasi IoT/SCADA ringan |
| PAR | : Peak-to-Average Ratio |
| PV | : Photovoltaic |
| SCADA | : Supervisory Control and Data Acquisition |
| SWH | : Water Heater (beban terjadwal) |
| SWM | : Washing Machine (beban terjadwal) |
| RC | : Rice Cooker (beban terjadwal) |
| OM | : Oven/Microwave (beban terjadwal) |
| RFG | : Refrigerator (beban dasar) |
| FZ | : Freezer (beban dasar) |
| LG | : Lighting (beban dasar) |
| WP | : Water Pump (beban dasar) |

Daftar Simbol

| | |
|----------------|--|
| t | : indeks slot waktu ($t = 0..143$) |
| Δt | : durasi slot waktu (10 menit) |
| $P_{PV}(t)$ | : daya PV pada slot waktu t (W) |
| | : daya beban dasar (non-schedulable) pada slot waktu t (W) |
| $P_{base}(t)$ | |
| $P_{sched}(t)$ | : total daya beban terjadwal pada slot waktu t (W) |
| $P_{load}(t)$ | : total daya beban = $P_{base}(t)+P_{sched}(t)$ (W) |
| $P_{net}(t)$ | : daya bersih = $P_{PV}(t)-P_{load}(t)$ (W) |
| E_{imp} | : energi impor grid (kWh) |
| E_{exp} | : energi ekspor ke grid (kWh) |
| U_{PV} | : pemanfaatan PV (PV utilization) (0–1) |
| $f(x)$ | : fungsi fitness (kebalikan dari biaya objective) |

Daftar Istilah

| | |
|------------------------------------|---|
| Beban dasar (non-schedulable load) | : Beban yang tidak dijadwalkan ulang karena harus menyala mengikuti kebutuhan, mis. kulkas dan penerangan. |
| Beban terjadwal (schedulable load) | : Beban yang waktu operasinya dapat digeser dalam batas kenyamanan pengguna (time window), mis. mesin cuci dan pemanas air. |
| Load scheduling | : Proses menentukan waktu operasi beban terjadwal untuk mencapai tujuan optimasi (mis. minim grid import) dengan tetap memenuhi constraint. |
| Time window | : Rentang waktu di mana suatu peralatan boleh mulai beroperasi, biasanya dinyatakan sebagai $[a_i, b_i]$. |
| Chromosome | : Representasi kandidat solusi GA berupa vektor gen yang berisi waktu mulai operasi (s_i) untuk setiap beban terjadwal. |
| Gene | : Elemen pada chromosome yang merepresentasikan satu keputusan diskret, mis. start time satu kali operasi peralatan. |
| Fitness | : Skor kualitas solusi yang dipakai GA untuk seleksi; semakin tinggi fitness semakin baik solusi. |
| Selection | : Proses memilih individu (parent) berdasarkan fitness untuk proses reproduksi. |
| Crossover | : Operator yang menggabungkan gen dari dua parent untuk membentuk offspring baru. |
| Mutation | : Operator yang mengubah gen secara acak untuk menjaga keberagaman populasi dan menghindari local optimum. |
| Elitism | : Mekanisme mempertahankan individu terbaik agar tidak hilang pada generasi berikutnya. |
| Baseline schedule (fixed schedule) | : Jadwal operasi tetap sebagai pembanding terhadap jadwal hasil optimasi. |
| Grid import | : Energi yang dibeli dari jaringan listrik ketika PV tidak mencukupi untuk memenuhi beban. |
| Grid export | : Energi surplus PV yang diekspor ke jaringan ketika produksi PV melebihi kebutuhan beban. |
| PV self-consumption | : Bagian energi PV yang langsung digunakan untuk menyuplai beban lokal. |
| PV utilization | : Tingkat pemanfaatan PV sesuai definisi metrik pada Bab IV (mis. self-consumption terhadap total energi PV). |
| Real-time (dalam konteks sistem) | : Proses optimasi/monitoring dieksekusi otomatis pada interval tertentu melalui integrasi Node-RED dan Python. |