UNIVERSITAS
GADJAH MADA
H-ARS: Penjadwalan Sumber Daya Adaptif Berbasis Harvest-aware untuk Optimasi Energi Sistem IoTâ€“Edgeâ€“Cloud pada Smart Farming
Roghib Muhammad Hujja, Prof. Dr.techn. Ahmad Ashari, M.Kom;Dr. Danang Lelono S.Si., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI iii
PRAKATA iv
DAFTAR ISI v
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR SINGKATAN xiii
INTISARI xiv
ABSTRACT xv
BAB I
PENDAHULUAN 1
1.1. Latar belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 5
1.3. Tujuan Penelitian 5
1.4. Batasan Masalah 6
1.5. Metodologi Penelitian 7
1.6. Kontribusi Penelitian 8
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA 10
2.1. Penelitian terkait dengan penghematan daya IoT dan *edge devices* pada *smart farming* 10
2.2. Penelitian terkait dengan *Serverless* IoT 15
2.3. Penelitian terkait *Task offloading* dalam IoT dan *edge devices* 16
2.4. Penelitian terkait dengan *Resource scheduling* 18
2.5. Metode Penjadwalan dan *Offloading State-of-the-art* 21
2.5.1. Penjadwalan Berbasis *Threshold* 21
2.5.2. *Energy-aware Offloading* 21
2.5.3. Penjadwalan Prediktif Berbasis Panen Energi (Predictive / *Harvest-aware* Scheduling) 22
2.5.4. Penjadwalan Berbasis *Reinforcement Learning* (RL) 22
2.5.5. Penjadwalan Berbasis Optimasi *Lyapunov* (*Drift-Plus-Penalty*) 23
2.5.6. Sintesis dan Posisi H-ARS 23
2.6. *Platform* Simulasi IoT–*Edge*–*Cloud* 24
2.7. *Research gap* 25
2.7.1. Gap *Platform* Simulasi IoT–*Edge*–*Cloud* 25
2.7.2. Gap Strategi Penjadwalan untuk *Harvest-aware* IoT 26
2.7.3. Sintesis Research gap 27
BAB III
LANDASAN TEORI 29
3.1. *Internet of Things* (IoT) dalam Pertanian 29
3.2. *edge computing* 31
3.3. Sumber dan Konsumsi Energi pada *edge Device* 32
3.4. *Task offloading* 33
3.5. *Resource scheduling* 35
3.6. *Serverless* computing 39
3.7. Strategi Efisiensi Energi pada Sistem IoT–Edge–Cloud 42
3.8. Prediksi Deret Waktu dengan EWMA 43
3.8.1. Definisi EWMA 43
3.8.2. Parameter $\boldsymbol{\alpha}$ (*learning rate*) dan pengaruhnya 44

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
H-ARS: Penjadwalan Sumber Daya Adaptif Berbasis Harvest-aware untuk Optimasi Energi Sistem IoTâ€“Edgeâ€“Cloud pada Smart Farming
Roghib Muhammad Hujja, Prof. Dr.techn. Ahmad Ashari, M.Kom;Dr. Danang Lelono S.Si., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.8.3. Keunggulan EWMA dibanding rata-rata sederhana 44
3.8.4. Varian *hourly-bin*: motivasi pola harian pada IoT 44
3.8.5. EWMA untuk tiga variabel: CPU load, *Solar ratio*, dan SoC 45
3.9. *Lyapunov optimization* untuk Kontrol Antrian Adaptif 46
3.9.1. Konsep stabilitas antrian 46
3.9.2. *Lyapunov drift*: mengukur kecenderungan antrian tumbuh 46
3.9.3. *Drift-Plus-Penalty*: menstabilkan antrian sambil menekan biaya 47
3.9.4. Mekanisme menghasilkan *threshold* adaptif (bukan statis) 47
3.10. Teknologi Lingkungan Pertanian dan *Energy harvesting* 48
3.10.1. Konsep *Solar ratio* sebagai indikator keseimbangan energi 48
3.10.2. Pola harian pada energi surya: variabilitas siang–malam 49
3.10.3. Motivasi *look-ahead*: justifikasi teoretis untuk H-ARS 49
3.11. Fungsi Utilitas Pada penjadwalan 50
3.11.1. Konsep Dasar Fungsi Utilitas dalam Penjadwalan 50
3.11.2. Fungsi Utilitas Berbasis SoC (*State of Charge*) 51
3.11.3. Mekanisme Penalti untuk Kondisi Kritis 51
3.11.4. Sifat-sifat Fungsi Utilitas yang Diinginkan 52
3.11.5. *Energy Budget Controller* 52
3.11.6. Penyesuaian Adaptif Berbasis SoC (*SoC-Adaptive Interval Scaling*) 53
3.12. Teori Simulasi dan Validasi Model 54
BAB IV
METODE PENELITIAN 57
4.1. Model Sistem IoT–Edge–Cloud 58
4.1.1. Arsitektur *node*–Edge–Cloud 58
4.1.2. *Use Case* Utama Sistem 60
4.1.3. Asusmsi dan Batasan Model 61
4.2. Model Lingkungan, Energi, dan Perangkat 62
4.2.1. Model Lingkungan 62
4.2.2. Model Energi 63
4.2.3. Model Perangkat dan Resource 64
4.3. Rancangan Metode H-ARS 67
4.3.1. Tujuan dan Mekanisme H-ARS 68
4.3.2. Arsitektur Komponen H-ARS 71
4.4. Platform Evaluasi 77
4.4.1. Kebutuhan Sistem Simulator 77
4.4.2. Arsitektur Simulator 78
4.4.3. Paradigma dan Siklus Simulasi 82
4.5. Implementasi H-ARS pada Simulator 84
4.5.1. Strategi Pluggable dan Titik Integrasi 84
4.5.2. Implementasi H-ARS Offload Strategy 85
4.5.3. Implementasi H-ARS Scheduling Strategy 85
4.5.4. Kesesuaian Implementasi terhadap Rancangan 86
4.6. Konfigurasi Skenario dan Keluaran 86
4.6.1. Format Konfigurasi Skenario 86
4.6.2. Katalog Skenario Eksperimen 87
4.6.3. Struktur Keluaran Simulasi 88
4.7. Validasi dan Kalibrasi Model Energi 89
4.7.1. Arsitektur Validasi Dua Lapis 90
4.7.2. Lapis A: Profiling Per-State 90
4.7.3. Lapis B: Validasi End-to-End 92
4.7.4. Kalibrasi dan Implikasi terhadap Evaluasi 92
BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN 96

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
H-ARS: Penjadwalan Sumber Daya Adaptif Berbasis Harvest-aware untuk Optimasi Energi Sistem IoTâ€“Edgeâ€“Cloud pada Smart Farming
Roghib Muhammad Hujja, Prof. Dr.techn. Ahmad Ashari, M.Kom;Dr. Danang Lelono S.Si., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1. Tujuan Evaluasi dan Desain Eksperimen 97
5.1.1 Desain Eksperimen: Skenario, Metode, dan Hipotesis 97
5.1.2 Metode dan Prosedur Run 98
5.2. Setup Eksperimen dan Parameter Umum 99
5.3. Metrik Evaluasi 101
5.3.1 Kelompok Metrik Energi dan Ketahanan Operasi 101
5.3.2 Kelompok Metrik QoS *Task* dan Kinerja Layanan 101
5.3.3 Kelompok Metrik Resource *edge* dan Stabilitas Antrian 101
5.4. Hasil Skenario S1 — Variasi Energi Panen (*Solar* Harvesting) 102
5.5. Hasil Skenario S2 — Variasi Beban Kerja (*Workload*) 106
5.6. Hasil Skenario S3 — Multi-Day Endurance (Daya Tahan 5 Hari) 108
5.7. Hasil Skenario S4 — *Burst* Traffic (Multi-Seed, n=5) 110
5.8. Hasil Skenario S5 — Heterogenitas Perangkat 112
5.9. Hasil Skenario S6 — Skalabilitas (5 *node* vs 10 *node* per *edge*) 113
5.10. Hasil Skenario S7 — Battery-Only (Tanpa *Solar*, Multi-Seed n=5) 115
5.11. Hasil Skenario S8 — CPU Saturated (*Overload edge*) 117
5.12. Pembahasan Komparatif Lintas Skenario 118
5.12.1 Rekapitulasi Keunggulan H-ARS per Skenario 119
5.12.2 Status Komparatif dan Analisis *Trade-off* 120
5.13. Analisis Statistik Inferensial pada Skenario Stokastik 123
5.14. Fleksibilitas Adaptif H-ARS 126
5.15. Interpretasi dalam Konteks Idealisasi Cloud dan Komunikasi 127
5.16. Evaluasi Keseluruhan 128
BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN 129
6.1. Kesimpulan 129
6.2. Kontribusi Penelitian 131
6.3. Keterbatasan Penelitian 132
6.4. Saran Penelitian Lanjutan 133
6.4.1 Penguatan Analisis dan Posisi Ilmiah 133
6.4.2 Pengembangan Simulator dan Metode 134
6.4.3 Implementasi dan Uji Lapangan 134
6.5. Penutup 134
DAFTAR PUSTAKA 136
LAMPIRAN 151
LAMPIRAN A - Source Code Inti Simulator 152
Lampiran A.1: *edge*`Model.ts` 152
Lampiran A.2: `sim_worker.ts` 158
Lampiran A.3: `sim.ts` 163
Lampiran A.4: hars.ts (Offload) 167
Lampiran A.5: hars.ts (Scheduling) 169
LAMPIRAN B - Format Konfigurasi Skenario 175
Lampiran B.1: Struktur JSON Skenario 175
Lampiran B.2: Ringkasan Parameter Delapan Skenario Eksperimen (S1–S8) 176
LAMPIRAN C - Parameter Model Energi Dan Data Validasi 177
Lampiran C.1 Parameter Profil Daya *node* dan *edge* 177
Lampiran C.2 Hasil Validasi Energi – Lapis A: Profiling Per-*State* INA219 178
Lampiran C.3 Hasil Validasi Lapis B: Kurva SoC *End-to-end* 179
LAMPIRAN D - Data Hasil Eksperimen Lengkap S1–S8 180
Lampiran D.1 Skenario S1 – Variasi Intensitas Solar Harvesting 180
Lampiran D.2 Skenario S2 – Variasi Beban Kerja (*Workload*) 181
Lampiran D.3 Rekapitulasi Skor Komparatif Lintas Skenario 182

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
H-ARS: Penjadwalan Sumber Daya Adaptif Berbasis Harvest-aware untuk Optimasi Energi Sistem IoTâ€“Edgeâ€“Cloud pada Smart Farming
Roghib Muhammad Hujja, Prof. Dr.techn. Ahmad Ashari, M.Kom;Dr. Danang Lelono S.Si., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

LAMPIRAN E - Struktur Proyek Dan Teknologi Simulator 183
Lampiran E.1 Struktur Direktori Monorepo Simulator 183
Lampiran E.2 Teknologi yang Digunakan 184
LAMPIRAN F - Dokumentasi Proses Validasi Fisik 185
Lampiran F.1 Daftar Perangkat dan Alat Validasi 185
Lampiran F.2 Prosedur Operasional Baku Pengukuran Daya 185
Lampiran F.3 Contoh Data Log INA219 (Format CSV) 186
LAMPIRAN G - Surat Pernyataan Dan Dokumen Administratif 187
Lampiran G.1 Surat Keterangan Bebas Plagiarisme 187
Lampiran G.2 Bukti Penerimaan/Penerbitan Artikel 189
LAMPIRAN H 190