

# **INTEGRASI *EDGE* AI DAN *LORA-BASED DELAY-TOLERANT NETWORK* (DTN) PADA SISTEM IRIGASI OTONOM BERBASIS TENAGA SURYA UNTUK PERTANIAN DI GAZA**

**Arsyi Arif Agami**

Masyarakat Ilmuwan dan Teknolog Indonesia – Klaster Mahasiswa

**Anisa Nurfadilah**

Masyarakat Ilmuwan dan Teknolog Indonesia – Klaster Mahasiswa

**Yusar Nugroho**

Masyarakat Ilmuwan dan Teknolog Indonesia – Klaster Mahasiswa

e-mail: arsyiarif@miti.or.id

## **ABSTRAK**

Penelitian ini mengusulkan integrasi *Edge* AI dan *LoRa-based Delay-Tolerant Network* (DTN) pada sistem irigasi otonom berbasis tenaga surya untuk meningkatkan ketahanan pertanian di Gaza. Rancangan mencakup arsitektur sensor-*gateway*-aktuator, logika pengambilan keputusan TinyML di *edge*, serta mekanisme *store-and-forward* DTN untuk menjaga sinkronisasi data saat konektivitas tidak stabil. Konteks Gaza hari ini ditandai oleh gangguan listrik dan komunikasi, keterbatasan sumber air, serta kebutuhan pemulihan pada komoditas lokal seperti zaitun, anggur, semangka, dan gandum yang menjadikan solusi tahan-gangguan semacam ini relevan. Verifikasi dilakukan melalui pemodelan dan simulasi perangkat lunak (mis. simulasi jaringan LoRa dan DTN dan eksperimen inferensi TinyML pada lingkungan komputasi lokal), serta analisis *sizing* energi dan estimasi biaya. Pengadaan perangkat keras dan demonstrasi lapangan tidak termasuk dalam lingkup KTI ini. *Bench-test* skala mikro hanya dijabarkan sebagai *future work*. Evaluasi fokus pada efisiensi penggunaan air, ketahanan operasi selama gangguan (*uptime*), dan waktu sinkronisasi data berdasarkan hasil simulasi dan data sekunder. Studi ini dirancang agar aplikatif untuk masyarakat Gaza dan diharapkan membantu ketahanan pangan dan percepatan pemulihan produksi pangan komunitas lokal dan dapat meminimalisir isu kelaparan di Gaza yang mencekam sampai hari ini akibat okupasi dan penjajahan oleh Zionis.

Kata kunci: Edge AI, Delay-Tolerant Network, LoRa, Irigasi Otonom, Ketahanan Pangan Gaza

## 1. PENDAHULUAN

Gaza saat ini menghadapi krisis agrikultur dan ketahanan pangan yang sangat berat akibat penghancuran lahan, infrastruktur pertanian, dan fasilitas pendukung selama beberapa tahun terakhir akibat kegiatan okupasi wilayah dan genosida yang dilakukan oleh Israel (FAO, 2024). Penilaian geospasial dan laporan organisasi internasional menunjukkan bahwa sebagian besar lahan pertanian di Gaza, Palestina telah rusak atau tidak dapat diakses, sehingga kapasitas produksi lokal menurun drastis dan meningkatkan risiko kelaparan (World Bank, 2024).

Kondisi operasional pertanian di Gaza semakin diperparah oleh gangguan listrik yang sering terjadi, pemutusan layanan komunikasi dan jaringan internet, serta kerusakan infrastruktur air oleh penjajah Israel (Human Rights Watch, 2024). Faktor-faktor tersebut menghambat pompaan air, penjadwalan aliran irigasi, dan koordinasi bantuan teknis di lapangan (FAO, 2024). Laporan energi dan situasi kemanusiaan terbaru juga menyoroti pemadaman listrik berkepanjangan, gangguan bahan bakar, serta kerusakan fasilitas WASH (*water, sanitation, hygiene*) yang secara langsung menekan ketersediaan air untuk irigasi dan kebutuhan pertanian (FAO, 2024; Human Rights Watch, 2024).

Dalam konteks gangguan infrastruktur semacam ini, arsitektur teknologi yang menempatkan kecerdasan di tepi jaringan (Edge AI/TinyML) dan menggunakan komunikasi radio jarak jauh berdaya rendah (LoRa/LoRaWAN) dengan mekanisme *Delay-Tolerant Networking* (DTN) menjadi relevan (Abadade et al., 2023; Fall, 2003). TinyML memungkinkan pengambilan keputusan lokal (mis. logika irigasi berbasis kelembapan tanah dan prakiraan kebutuhan tanaman) sehingga mengurangi ketergantungan pada konektivitas secara terus-menerus (Warden & Situnayake, 2019), LoRa menyediakan jangkauan dan efisiensi energi untuk sensor/aktuator dalam radius luas, sementara DTN (*store-and-forward/custody transfer*) menjamin persistensi dan sinkronisasi data saat koneksi terputus atau bersifat intermiten.

Sementara itu, LoRa menyediakan jangkauan luas dan efisiensi energi tinggi untuk komunikasi antar sensor dan aktuator dalam area pertanian (Singh et al., 2020). Integrasi LoRa dengan mekanisme DTN, seperti protokol *store-and-forward* atau *custody transfer*, menjamin persistensi dan sinkronisasi data saat koneksi terputus atau bersifat intermiten (Scott & Burleigh, 2007).

Bukti dari literatur teknis menunjukkan bahwa penerapan LoRa dan solusi berbasis TinyML pada sistem irigasi dan monitoring pertanian dapat menghemat energi dan *bandwidth*, sekaligus meningkatkan ketahanan operasi pada kondisi jaringan yang tidak stabil (Abadade et al., 2023; Singh et al., 2020). Pendekatan ini juga kompatibel dengan sistem tenaga surya skala lokal, sebagaimana dibahas dalam literatur FAO mengenai *Solar-Powered Irrigation Systems* (SPIS), yang menyoroti efisiensi dan keberlanjutan sistem tenaga surya untuk daerah dengan pasokan listrik terbatas (FAO, 2016–2024), namun perlu analisis *sizing* energi dan *trade-off* biaya untuk memastikan kelayakan operasional jangka panjang.

Perkembangan dari penelitian terkini menegaskan dan memperluas fondasi teknis yang relevan untuk *paper* ini. Kajian komprehensif tentang TinyML menunjukkan metodologi optimisasi model (*quantization, pruning, distillation*) dan *toolchain deployment* yang membuat inferensi *on-device* semakin *feasible* pada MCU kelas rendah (Abadade et al., 2023). Selain itu, studi dan *whitepaper platform* MLOps untuk TinyML (mis. Edge Impulse) menjelaskan

*workflow* praktis dari pengumpulan data lapang sampai ekspor model .tflite yang siap diuji pada *edge*, sehingga mempercepat *pipeline* pengembangan model untuk aplikasi pertanian (Janapa Reddi et al., 2023). Penelaahan literatur lain juga merangkum perkembangan TinyML diantaranya yang telah dipilih sebagai solusi *low-bandwidth* untuk aplikasi pertanian di beberapa proyek di Afrika baik sebagai pilot untuk deteksi penyakit tanaman, monitoring kelembapan, maupun aplikasi *advisory* untuk *smallholders* (Zennaro et al., 2022). Elhanashi (2024) menyoroti bahwa meskipun TinyML semakin matang, tantangan nyata dalam *latency*, reliabilitas, dan adaptasi terhadap *domain shift* tetap menjadi kendala utama dalam penerapan di lapangan. Sementara Gookyi (2024) menunjukkan bahwa model yang berhasil dalam skenario pelatihan dapat mengalami penurunan akurasi bila kondisi sensor atau latar belakang berbeda di lapangan nyata.

Sejalan dengan itu, kajian dan studi lapangan terbaru mengenai LoRa/LoRaWAN mendemonstrasikan keberhasilan implementasi di lingkungan agrikultur skala nyata termasuk proyek percobaan pada kebun zaitun seluas 22 hektar di desa Peta, Achaea Regional Unit, Yunani. Perkebunan tersebut menunjukkan efektivitas topologi LoRaWAN untuk monitoring kelembapan, manajemen pompa, dan pengiriman telemetri dengan konsumsi energi rendah (Liopa-Tsakalidi et al., 2024). Survey LoRa terbaru juga mengidentifikasi tantangan implementasi praktis (*channel modeling, relay/routing, airtime/duty-cycle constraints*) dan merekomendasikan strategi *deployment* serta penggabungan *on-device* AI untuk efisiensi data (Aldhaheri et al., 2024). Temuan-temuan ini mendukung pilihan LoRa sebagai tulang punggung komunikasi pada desain yang diusulkan (Liopa-Tsakalidi, 2024).

Terakhir, literatur DTN dan studi SPIS yang lebih baru menunjukkan relevansi langsung untuk konteks Gaza, tinjauan DTN modern mendokumentasikan aplikasi-aplikasi *disruption-tolerant* di lingkungan terputus dan merekomendasikan standar pengelolaan *bundle* serta mekanisme *custody* yang lebih adaptif (Koukis, 2024; Elewaily, 2024). Menurut laporan dari MITRE (2024) Sebagai contoh penerapan praktis solusi tahan-gangguan, MITRE mendemonstrasikan *StarMesh++*, sebuah sistem portabel berbasis satelit + *mesh* yang menyediakan konektivitas luas, operasi berbasis baterai/tenaga surya, dan kesiapan untuk menjaga komunikasi di zona konflik seperti Ukraina. Di sisi energi, kajian SPIS tahun-tahun terakhir merangkum metodologi *sizing PV-battery* untuk beban irigasi dan menekankan perlunya perhitungan konservatif untuk menjamin uptime selama periode pemadaman (Thokal, 2024).

Berdasarkan tantangan nyata di lapangan dan potensi teknis tersebut, penelitian ini mengusulkan desain sistem irigasi otonom yang mengintegrasikan Edge AI (TinyML), LoRa dengan mekanisme DTN, dan catu daya surya untuk meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan operasi pertanian di Gaza. Dalam lingkup KTI ini, pengadaan perangkat keras skala penuh dan demonstrasi lapangan tidak termasuk; verifikasi difokuskan pada pemodelan, simulasi jaringan (LoRa/DTN, inferensi TinyML di *edge*), serta analisis kebutuhan energi dan estimasi biaya. Uji lapangan dan pengujian perangkat keras skala nyata akan dicantumkan sebagai *future work*.

## 2. TINJAUAN LITERATUR DAN PENGEMBANGAN HIPOTESIS

Bab ini meninjau literatur yang relevan untuk mendukung perancangan sistem irigasi otonom yang tahan gangguan dengan integrasi Edge AI (TinyML), LoRa/LoRaWAN, Delay-/Disruption-Tolerant Networking (DTN), dan Solar-Powered Irrigation Systems (SPIS). Tinjauan difokuskan pada: (a) landasan teknis tiap komponen; (b) studi empiris dan survey terbaru; dan (c) gap riset yang membenarkan kontribusi penelitian ini.

### TINJAUAN LITERATUR

#### 2.1 TinyML / Edge AI: Konsep, Teknik, dan Tantangan

TinyML adalah pendekatan menjalankan model *machine learning* pada perangkat sangat *resource-constrained* (*microcontroller*, MCU) sehingga memungkinkan inferensi lokal dengan konsumsi energi rendah (Warden & Situnayake, 2019). Survey komprehensif menunjukkan teknik optimisasi seperti *quantization*, *pruning*, dan *knowledge distillation* dapat menurunkan ukuran model tanpa mengorbankan performa secara drastis (Abadade et al., 2023). *Platform-platform* MLOps khusus TinyML (mis. *Edge Impulse*) menyederhanakan *pipeline* data, pelatihan, *profiling* dan ekspor model ke format TFLite sehingga mempercepat *prototyping* aplikasi lapangan (Janapa Reddi et al., 2023).

Namun, penerapan TinyML di lapangan menghadapi beberapa kendala: (1) **domain shift**, model terlatih di satu kondisi dapat menurun akurasi bila kondisi sensor/lingkungan berubah (Elhanashi, 2024); (2) **latency & real-time constraints**, *inference* harus cukup cepat agar keputusan kontrol (mis. irigasi) efektif (Abadade et al., 2023); (3) **manajemen update model** di perangkat yang jarang terhubung (Gookyi, 2024). Oleh karena itu, desain logika kontrol umumnya menggabungkan TinyML dengan aturan *fallback* sederhana untuk menjamin kestabilan operasi bila inferensi gagal atau tak tersedia (Warden & Situnayake, 2019).

Penelaahan literatur dan laporan kebijakan menunjukkan pula bahwa TinyML telah diujicobakan sebagai solusi *low-bandwidth* untuk aplikasi pertanian di beberapa proyek pilot di Afrika, termasuk implementasi untuk deteksi penyakit tanaman, pemantauan kelembapan tanah, dan layanan *advisory* bagi *smallholders*, kegiatan yang didorong oleh inisiatif jaringan TinyML4D yang mulai aktif pada 2021 dan mendukung distribusi kit praktikum serta pelatihan lokal (Zennaro et al., 2022). Temuan awal dari pilot-pilot ini memperkuat klaim bahwa inferensi *on-device* dapat mengurangi kebutuhan transmisi data ke *backhaul* dan memberikan respons lokal yang berguna bagi petani di kondisi konektivitas terbatas; namun sebagian besar bukti lapangan tersebut bersifat pilot skala kecil dengan cakupan lokasi dan ukuran sampel yang terbatas, sehingga hasilnya harus ditafsirkan hati-hati dan memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui uji lapang berskala lebih besar serta metrik performa yang terstandarisasi (Zennaro et al., 2022)

#### 2.2 LoRa/LoRaWAN untuk Pertanian: Kapabilitas dan Batasan

LoRa dipandang cocok untuk aplikasi *monitoring* pertanian karena jangkauan jarak jauh dan efisiensi energi, memungkinkan *node* sensor tersebar luas dan beroperasi lama dengan sumber daya terbatas (Singh et al., 2020). Studi-studi lapangan terbaru menunjukkan LoRaWAN dapat dipakai di kebun zaitun dan perkebunan untuk *telemetry* kelembapan tanah dan kontrol pompa, namun performa sangat bergantung pada parameter fisik seperti *Spreading Factor* (SF), *payload size*, serta *duty-cycle/regulasi* setempat (Liopa-Tsakalidi et al., 2024;

Aldhaheeri et al., 2024).

Kendala praktis meliputi kapasitas kanal terbatas, airtime yang panjang untuk SF tinggi, dan sensitivitas terhadap interferensi pada topologi padat; solusi umum adalah arsitektur multilevel (sensor → *gateway* lokal → *edge aggregator*) dan *batching* pesan untuk mengurangi beban transmisi (Singh et al., 2020; Aldhaheeri et al., 2024). Integrasi LoRa dengan logika *edge* (TinyML) dapat signifikan mengurangi volume data yang perlu ditransmisikan ke *backhaul* sehingga memperpanjang masa operasi baterai (Abadade et al., 2023; Singh et al., 2020).

### 2.3 Delay-/Disruption-Tolerant Networking (DTN): Teori dan Aplikasi

Arsitektur DTN dikembangkan untuk lingkungan jaringan yang mengalami pemutusan, latensi panjang, atau partisi dengan mekanisme *bundle* (*store-and-forward*) dan *custody transfer* untuk meningkatkan kemungkinan pengiriman pesan (Fall, 2003; Scott & Burleigh, 2007). Literatur terbaru meninjau adaptasi DTN untuk konteks modern (*drones*, *vehicular carriers*, *satcom overlays*) dan menunjukkan efektivitas model *opportunistic routing* (*PROPHET*, *epidemic variants*) di skenario tak terhubung seperti bencana atau daerah terpencil (Koukis, 2024; Elewaily, 2024).

Studi kasus non-akademik (mis. *deploy kit mesh* + *satcom* di Ukraina) menggambarkan bagaimana arsitektur *disruption-tolerant* dipakai dalam konteks konflik untuk menjaga komunikasi kritis (MITRE, 2024). Untuk integrasi dengan IoT pertanian, DTN dapat berperan di layer aplikasi/*gateway*, menyimpan *telemetry* lokal sampai konektivitas ke *sink* tersedia dengan *trade-off latency* vs. ketahanan data yang harus dianalisis (Fall, 2003; Keränen et al., 2009).

### 2.4 Solar-Powered Irrigation Systems (SPIS): Sizing dan Praktik Terbaik

Penggunaan tenaga surya untuk pompa irigasi menawarkan otonomi energi yang penting di area dengan pasokan listrik tidak stabil (FAO, 2018). Literatur teknik terbaru merekomendasikan perhitungan *sizing* yang mempertimbangkan beban puncak (*start-up pump*), profil cuaca musiman, efisiensi konversi PV-MPPT, dan kapasitas baterai untuk *buffer* saat redup sinar matahari (Thokal, 2024; Kumar, 2020). *Sizing* konservatif penting untuk mencapai target *uptime* operasional, terutama bila sistem juga harus memasok energi untuk *node* komunikasi dan inferensi *edge* (Thokal, 2024; FAO, 2016–2024).

### 2.5 Sintesis Empiris dan Gap Riset

Ringkasan bukti empiris (TinyML, LoRa, DTN, SPIS) menegaskan bahwa setiap komponen sudah memiliki dasar teknis dan beberapa bukti lapangan; namun **keterbatasan integratif** tetap terlihat: sedikit studi yang menguji gabungan TinyML, LoRa, DTN, SPIS di konteks konflik/*zone-of-interruption* serta sedikit penelitian yang menyediakan analisis *trade-off* terkuantifikasi (*air efficiency vs energy vs data resilience*) pada setting tanpa pasokan listrik and *intermiten connectivity* (Abadade et al., 2023; Singh et al., 2020; Koukis, 2024). Gap ini memberikan ruang bagi *paper* ini untuk menyusun desain sistem yang holistik dan memverifikasinya secara konseptual sebelum langkah simulasi/*field test*.

## PENGEMBANGAN HIPOTESIS

### 2.6 Efisiensi Penggunaan Air

Hipotesis: Sistem irigasi otonom berbasis TinyML (*decision-at-edge*) mengurangi

penggunaan air per hektar dibandingkan strategi irigasi berbasis jadwal tetap.

Justifikasi: TinyML memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih responsif terhadap kondisi kelembapan aktual, sehingga mengurangi *over-watering* yang umum pada jadwal kaku (Abadade et al., 2023; Warden & Situnayake, 2019).

Variabel & Operasionalisasi: Penggunaan air (Liter/ha per periode); *Baseline* = jadwal tetap; *Treatment* = logika TinyML (simulasi/estimasi literatur).

## 2.7 Ketahanan Operasional (*Uptime*)

Hipotesis: Arsitektur yang menggabungkan LoRa + DTN + SPIS mempertahankan persentase *uptime* pompa/aktuator lebih tinggi selama periode gangguan listrik/komunikasi dibandingkan arsitektur tanpa DTN atau tanpa tenaga surya.

Justifikasi: SPIS menyediakan sumber energi mandiri sementara DTN memfasilitasi sinkronisasi data meski *backhaul* terputus, sehingga mengurangi *downtime* operasional (Fall, 2003; FAO, 2018).

Variabel & Operasionalisasi: *Uptime* (%) pompa; Skenario gangguan: frekuensi/durasi pemadaman (asumsi).

## 2.8 Sinkronisasi Data (*Delivery & Latency*)

Hipotesis: Mekanisme DTN menurunkan persentase kehilangan data dan memastikan *eventual consistency* dalam rentang waktu yang dapat diterima (*threshold* operasional), dibandingkan tanpa mekanisme *store-and-forward*.

Justifikasi: Literatur DTN melaporkan peningkatan *delivery ratio* dan toleransi partisi di lingkungan terputus (Koukis, 2024; Keränen et al., 2009).

Variabel & Operasionalisasi: *Delivery ratio* (% pesan diterima dalam TTL); *Average delivery delay* (jam).

## 2.9 Kelayakan Energi-Biaya

Hipotesis: Dengan *sizing* konservatif, konfigurasi SPIS yang mendukung beban TinyML + LoRa dapat dicapai dengan biaya kapital per unit yang masuk akal untuk intervensi komunitas kecil (USD/IDR per ha), sesuai asumsi harga pasar komponen.

Justifikasi: Studi SPIS dan analisis pasar komponen menunjukkan kemungkinan tercapainya *trade-off* antara CAPEX dan manfaat operasional jika *sizing* dan konfigurasi disesuaikan (Thokal, 2024; FAO, 2018).

Variabel & Operasionalisasi: CAPEX (USD/ha), perhitungan *sizing panel* (Wp) dan baterai (Ah), perbandingan biaya-manfaat kasar.

# 3. METODE PENELITIAN

## 3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan **design-science research (DSR)** yang menggabungkan perancangan artefak teknis (arsitektur sistem irigasi otonom berbasis TinyML, LoRa, DTN, dan SPIS) dengan evaluasi konseptual melalui perhitungan teknik, analisis sensitivitas, dan jika sumber daya dan waktu memadai maka akan ditambahkan simulasi perangkat lunak. Pendekatan DSR memungkinkan kontribusi desain yang aplikatif sekaligus *argument-based verification* sebelum tahap demonstrasi lapang (Hevner et al., 2004; Peffers et al., 2007). Pernyataan rancangan dan parameter teknis merujuk pada bukti teoritis dan empiris yang didokumentasikan dalam literatur.

### 3.2 Tujuan Metodologis dan Ruang Lingkup

Tujuan metodologis adalah: (1) merancang arsitektur konseptual sistem irigasi otonom tahan-gangguan; (2) menetapkan spesifikasi logika keputusan TinyML untuk pengendalian irigasi; (3) merancang mekanisme DTN di tingkat *gateway* untuk memastikan *eventual delivery* pada kondisi konektivitas *intermiten*; (4) melakukan perhitungan *sizing* energi PV-battery dan estimasi biaya; dan (5) memverifikasi hipotesis secara konseptual menggunakan perhitungan analitik, analisis sensitivitas, dan (opsional) simulasi. Ruang lingkup adalah konseptual dan simulatif. Pengadaan perangkat keras lapang dan demonstrasi fisik skala penuh tidak termasuk dalam lingkup ini.

### 3.3 Desain Sistem: Arsitektur Konseptual dan Fungsi Komponen

Arsitektur fungsional terdiri dari empat lapis utama: (a) lapis *sensor field* (*soil moisture, temperatur, irradiance*), (b) lapis komunikasi LoRa (*node sensor* → *gateway*), (c) lapis *edge* yang menjalankan TinyML *inference* dan agen DTN, dan (d) lapis aktuator (pompa) serta subsistem tenaga surya (PV + MPPT + baterai). Dengan uraian sebagai berikut:

- a. **Sensor nodes:** *sampling* berkala *soil moisture* multi-kedalaman; mengirim *telemetry* via LoRa; parameter *sampling* dan *payload* disesuaikan untuk *duty-cycle* dan *airtime* LoRa (Singh et al., 2020).
- b. **LoRa gateway:** menerima paket sensor, melakukan agregasi; *gateway* dapat melakukan inferensi TinyML lokal untuk keputusan irigasi atau meneruskan ringkasan ke *edge sink*. Kombinasi TinyML dan LoRa mengurangi volume transmisi ke *backhaul* (Abadade et al., 2023).
- c. **DTN agent (gateway/edge):** menyimpan *bundle* pesan, menerapkan mekanisme *store-and-forward* dan *custody transfer* ketika *backhaul* tidak tersedia; manajemen *buffer* dan kebijakan TTL diatur sesuai profil konektivitas (Scott & Burleigh, 2007).
- d. **Power subsystem (SPIS):** PV *panel*, *charge controller*/MPPT, baterai dengan *sizing* berdasarkan kebutuhan energi harian total (pompa, *gateway*, komunikasi, dan inferensi) dan *days-of-autonomy target* (Thokal, 2024).

### 3.4 Parameter, Asumsi, dan Tabel Referensi Nilai

Semua perhitungan dalam Bab 3 memakai Tabel Asumsi yang mencantumkan setiap parameter, nilai *default*, sumber (literatur atau *datasheet*), dan toleransi variasi untuk analisis sensitivitas. Contoh asumsi kunci yang harus dicantumkan: kebutuhan air (mm/day) per komoditas (FAO, 2018), *pump power* (W), jumlah *node*, frekuensi transmisi per *node*, energi per transmisi LoRa (J), energi per inferensi (J) untuk TinyML (Warden & Situnayake, 2019). Berikut adalah tabel asumsi metodologis yang dimaksudkan:

Tabel 1. Tabel Asumsi Metodologis

| Parameter                            | Nilai asumsi (default)                  | Range nilai (untuk sensitivitas) | Alasan pemilihan / Sumber (ringkas)          | Implikasi terhadap hasil                                        |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Luas contoh (A)                      | 1 ha (10,000 m <sup>2</sup> )           | 0.1–5 ha                         | Skenario studi kasus (FAO, 2018)             | Skala lahan memengaruhi kebutuhan air total & sizing PV/baterai |
| Kebutuhan air (h)                    | 5 mm/day                                | 1–10 mm/day                      | Asumsi konservatif untuk irigasi (FAO, 2018) | Direktly proporsional terhadap volume air harian & energi pompa |
| Pump power (P <sub>pump</sub> )      | 750 W                                   | 250–1500 W                       | Pompa DC menengah (Thokal, 2024)             | Dominan energi; sangat mempengaruhi ukuran PV & battery         |
| Pump runtime (t <sub>pump</sub> )    | 4 jam/day                               | 1–8 jam/day                      | Berdasar kebutuhan volume air & pompa        | Mempengaruhi E <sub>pump</sub> harian; utama driver sizing      |
| PV panel rating (per site)           | 1000 Wp (1 kWp)                         | 250–3000 Wp                      | Hasil sizing awal; komersial tersedia        | Menentukan kemampuan produksi energi harian                     |
| Peak Sun Hours (PSH)                 | 5 h/day                                 | 3–6 h/day                        | Kondisi mediterania/Gaza (FAO/klimatologi)   | Menentukan Wp yang dibutuhkan (E/PSH)                           |
| Sistem efisiensi (η <sub>sys</sub> ) | 70% (0.70)                              | 60–85%                           | Loss MPPT, inverter, kabel (Thokal, 2024)    | Menambah margin; mempengaruhi E <sub>PV</sub> _required         |
| Battery capacity (Wh)                | 17,417 Wh (~1451 Ah @12V) <i>contoh</i> | 5–30 kWh                         | Contoh perhitungan (2 days autonomy, DoD50%) | Menentukan days-of-autonomy & kemungkinan konfigurasi voltase   |

|                                          |                    |              |                                                         |                                                          |
|------------------------------------------|--------------------|--------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Days of autonomy (D)                     | 2 hari             | 1–5 hari     | Praktik konservatif untuk cadangan (Thokal, 2024)       | Semakin besar → battery Wh & CAPEX naik                  |
| Depth of Discharge (DoD)                 | 50%                | 40–80%       | Keamanan umur baterai (praktik)                         | DoD lebih rendah → kapasitas baterai praktis lebih besar |
| MPPT efficiency                          | 95%                | 90–98%       | Datasheet MPPT tipikal                                  | Menentukan losses PV→battery                             |
| Cable loss factor                        | 5%                 | 1–10%        | Estimasi sistem lapang                                  | Menambah kebutuhan energi PV untuk kompensasi            |
| Gateway idle power                       | 2 W                | 0.5–5 W      | Gateway kelas ringan / SBC (Raspberry/ESP32)            | Pengaruh kecil pada total; penting untuk remote uptime   |
| Number of sensor nodes (N_nodes)         | 10 nodes           | 1–50 nodes   | Skenario 1 ha; scalable                                 | Mempengaruhi total transmisi & energy per hari           |
| Transmissions per node per day (tx_node) | 24 tx/day (1×/jam) | 1–144 tx/day | Skenario monitoring reguler                             | Meningkatkan E_tx total & airtime LoRa                   |
| Energy per LoRa transmission (E_tx)      | 0.4 J/tx           | 0.1–2 J/tx   | Estimasi dari airtime & TX current (Singh et al., 2020) | Berkontribusi pada E_comm (biasanya kecil vs pompa)      |
| LoRa Spreading Factor (SF)               | SF7 (default)      | SF7–SF12     | Trade-off range latency/jangkauan (Singh et al., 2020)  | SF tinggi → airtime & energy naik; jangkauan lebih baik  |
| LoRa transmit power                      | 14 dBm             | 2–20 dBm     | Batas umum/regulasi & praktis                           | Meningkatkan jangkauan tetapi menambah konsumsi TX       |

|                                      |                                                |             |                                                     |                                                               |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Duty cycle LoRa                      | 1% (regulasi)                                  | 0.1–10%     | Regulatory constraint / conservative                | Membatasi throughput & frequency transmisi                    |
| TTL DTN (bundle)                     | 24 jam                                         | 6–168 jam   | Kebijakan aplikasi & toleransi latency (Fall, 2003) | TTL pendek → kemungkinan kehilangan; panjang → buffer req     |
| DTN buffer size (per gateway)        | 10,000 kB (10 MB)                              | 1–100 MB    | Estimasi awal berdasarkan message rate              | Buffer memengaruhi retention selama isolasi                   |
| Delivery SLA (acceptable delay)      | ≤24 jam                                        | 1–168 jam   | Kebutuhan operasional irigasi toleransi delay       | Menentukan apakah DTN solusi praktis                          |
| Energy per inference ( $E_{inf}$ )   | 0.05 J/inferensi                               | 0.001–0.5 J | Estimasi TinyML (Abadade et al., 2023)              | Biasanya sangat kecil, namun akumulatif pada frekuensi tinggi |
| Gateway inference rate ( $N_{inf}$ ) | 24 inferensi/day                               | 1–144/day   | 1×/jam skenario                                     | Mempengaruhi $E_{inf}$ total (biasanya kecil)                 |
| CAPEX components (estimasi)          | list: sensor, node, gateway, PV, battery, pump | -           | Data pasar / katalog                                | Digunakan untuk analisis biaya-per-ha / payback               |

### 3.5 Perhitungan Energi dan Sizing (Metode)

Metode perhitungan energi dan sizing mengikuti langkah standar engineering untuk SPIS:

$$V = h \times A$$

- a. **Hitung kebutuhan air harian** (volume  $V$ ):

( $h$  = mm/day → m/day;  $A$  = luas lahan). (FAO, 2018).

$$E_{\text{pump}} = P_{\text{pump}} \times t_{\text{pump}}$$

- b. **Estimasi energi pompa harian:**

di mana  $P_{\text{pump}}$  adalah daya pompa (W) dan  $t_{\text{pump}}$  runtime per hari (h). (Thokal, 2024).

- c. **Energi komunikasi dan inference:**  $E_{tx,total} = E_{tx} \times N_{tx/day}$   
hitung energi per transmisi ( $E_{tx}$ )  $\times$  jumlah transmisi harian; hitung energi inferensi TinyML ( $E_{inf}$ )  $\times$  jumlah inferensi harian. Nilai  $E_{tx}$  dan  $E_{inf}$  diambil dari literatur atau datasheet (Abadade et al., 2023).
- d. **Total energi harian (raw):** penjumlahan energi komponen (pompa, *gateway idle*, Tx, *inference*).

$$E_{PV,required} = \frac{E_{total,raw}}{\eta_{sys}}$$

- e. **Koreksi efisiensi sistem:**  
( $\eta_{sys}$  mencakup *losses* MPPT, *inverter*, kabel). (Thokal, 2024).

$$P_{PV} = \frac{E_{PV,required}}{PSH}$$

- f. **Sizing PV:**  
(PSH = peak sun hours lokal). (FAO, 2018).
- g. **Sizing baterai:** tentukan days-of-autonomy (D) dan DoD (depth of discharge),

$$E_{bat,Wh} = \frac{E_{PV,required} \times D}{DoD}$$

kemudian konversi ke Ah sesuai sistem tegangan.  
(Thokal, 2024).

Semua langkah di atas akan ditampilkan dalam bentuk perhitungan *digit-by-digit*. Nilai numerik default juga diuji pada analisis sensitivitas (lihat 3.7)

### 3.6 Desain Logika TinyML (Metodologi *Development & Evaluation*)

Metode pengembangan model TinyML bersifat konseptual dan mengikuti *pipeline* MLOps-TinyML:

- Sourcing data:** gunakan data sekunder yang relevan (*published datasets*) atau dataset sintetis yang merepresentasikan *soil moisture* & kondisi lingkungan; dokumentasikan asal data. (Hymel et al., 2022).
- Feature engineering:** normalisasi, *smoothing* dan *windowing*, sesuai *best practice* TinyML (Abadade et al., 2023).
- Model selection:** pilih model ringan (mis. *decision tree*, MLP kecil, atau tiny CNN bila diperlukan) yang memenuhi batas memori dan *latency* target (Warden & Situnayake, 2019).
- Training & quantization:** latih model di desktop/server, lakukan *quantization/pruning/distillation* untuk mengurangi ukuran model (Abadade et al., 2023).
- Profiling & deployment:** ekspor ke TensorFlow Lite (.tflite) dan *profile* pada *emulator/target* MCU atau menggunakan *Edge Impulse profiler* untuk estimasi memori dan *latency* (Hymel et al., 2022). Hasil *profiling* (*model size*, RAM use, *latency*, *estimated E\_inf*) dicatat untuk analisis energi.
- Fallback policy:** definisikan aturan *deterministic (threshold)* sebagai cadangan bila inferensi tidak tersedia atau tidak dipercaya (Gookyi, 2024).

### 3.7 Desain LoRa/LoRaWAN dan Konfigurasi Jaringan

Metode desain jaringan LoRa meliputi:

- Penentuan parameter fisik:** *Spreading Factor (SF)*, *Bandwidth*, *Coding Rate*, dan *payload size* disesuaikan dengan jarak, *duty cycle*, dan regulasi lokal. (Aldhaheri et al., 2024).
- Topologi:** rekomendasi multilevel (sensor → *gateway* lokal → aggregator/edge) untuk mengurangi *airtime* dan *collision*; penggunaan *batching/aggregation* untuk menghemat *airtime*. (Singh et al., 2020).
- Perhitungan *airtime* & kapasitas:** hitung *airtime* per *payload* & per SF; analisis kapasitas jaringan berdasarkan jumlah *node*, frekuensi transmisi, dan regulasi *duty cycle*. (Singh et al., 2020).
- Estimasi energi radio:** gunakan arsitektur dan *datasheet transceiver* untuk menghitung  $E_{tx}$  per transmisi; integrasikan pada model energi total.

### 3.8 Desain DTN (Metode Implementasi Agen DTN Kontekstual)

Metodologi untuk DTN pada level *gateway* mencakup:

- Format *bundle* & metadata:** definisikan *schema bundle* (*payload* ringkas, *timestamp*, *custody* metadata). (Scott & Burleigh, 2007).
- Policy *store-and-forward*:** aturan *buffering*, prioritas pesan (kontrol > *telemetry*), TTL, dan kebijakan *custody transfer*. (Koukis, 2024).
- Routing & contact model:** untuk simulasi DTN, pilih *routing algorithms* (*PROPHET*, *Epidemic*, *SprayAndWait*) dan *model contact pattern* (kurva probabilitas atau jadwal kendaraan/kurier). (Keränen et al., 2009; Koukis, 2024).
- Buffer sizing:** analitik *buffer sizing* berdasarkan rata-rata data harian, frekuensi kontak yang diharapkan, dan *policy retention*.

### 3.9 Simulasi: Alat, Setup, dan Protokol (direncanakan)

Catatan: simulasi adalah **opsional** dan dianggap *planned but not necessarily executed* dalam lingkup paper ini tergantung ketersediaan waktu. Jika simulasi dilakukan, langkah *set-up* adalah:

- TinyML profiling:** *Edge Impulse / TensorFlow Lite Micro* untuk *profiling model* pada target (Hymel et al., 2022).
- DTN simulation:** The ONE simulator untuk skenario *opportunistic/contact-based* (Keränen et al., 2009). Parameter: *buffer size*, TTL, *message rate*, *contact models*, *routing algorithms*.
- LoRa simulation:** NS-3 dengan modul LoRa atau OMNeT++ + INET + LoRa module untuk analisis *airtime*, *collision*, dan *energy*. Parameter: SF, BW, *payload*.
- Reproducibility:** sebutkan versi *tools*, *seed random*, *run count* (mis. 10 *seeds*), dan dokumentasikan file konfigurasi. (Hymel et al., 2022).

### 3.10 Analisis Data, Pengujian Hipotesis, dan Kriteria Penerimaan

Pengujian hipotesis dilakukan dengan metode campuran konseptual & kuantitatif:

- Efisiensi Air:** bandingkan estimasi penggunaan air (L/ha) antara strategi TinyML decision vs. jadwal tetap; jika simulasi dilakukan, bandingkan distribusi hasil ( $n$  runs) menggunakan uji nonparametrik atau t-test sesuai distribusi. (Abadade et al., 2023).

- b. **Uptime:** analisis *uptime* dengan perhitungan energi & skenario gangguan; jika simulasi/sensitivitas tersedia, uji proporsi *uptime* antar skenario (*z-test for proportions*). (FAO, 2018).
- c. **Sinkronisasi Data:** dari hasil DTN (*delivery ratio*, *avg delay*) lakukan perbandingan antar *routing/policy*; gunakan ANOVA/Kruskal-Wallis bila lebih dari dua grup. (Koukis, 2024).
- d. **Kelayakan Energi-Biaya:** bandingkan CAPEX (USD/IDR per ha) dengan manfaat operasional (penghematan air, peningkatan *uptime*) dan hitung indikator *payback* sederhana.

Semua uji statistik harus menyertakan ukuran efek dan interval kepercayaan ( $\alpha = 0.05$ ), serta metode perhitungan yang digunakan (Python SciPy / R)

### 3.11 Analisis Sensitivitas dan Scenario Testing

Analisis sensitivitas meliputi pengulangan perhitungan *sizing* & kinerja pada rentang parameter: PSH (3–6 h), *pump power* ( $\pm 25\%$ ), *autonomy days* (1–5), DoD (40–80%), jumlah *node* dan frekuensi transmisi. Hasil dipresentasikan sebagai tabel dan grafik tornado untuk menilai parameter yang paling mempengaruhi kebutuhan PV/battery dan *uptime* (Thokal, 2024)

### 3.12 Validitas, Reliabilitas, dan Batasan Metodologi

- a. **Validitas isi:** tiap asumsi divalidasi melalui minimal dua sumber (literatur/*datasheet*). (Abadade et al., 2023).
- b. **Reliabilitas:** konfigurasi simulasi dan skrip analisis disimpan di repositori (Git) dan dilengkapi README sehingga eksperimen dapat direplikasi.
- c. **Batasan:** tidak ada uji lapang skala penuh dalam lingkup; beberapa parameter bergantung pada asumsi yang sensitif terhadap kondisi lokal Gaza (*insolation*, akses komponen, regulasi radio). Hasil bersifat estimatif dan rekomendasi lapang diperlukan untuk validasi akhir (FAO, 2024).

### 3.13 Etika Penelitian dan Pertimbangan Kontekstual

Penelitian ini memegang prinsip etika: (a) penggunaan bahasa dan *framing* sensitif terhadap konteks kemanusiaan di Gaza; (b) tidak merencanakan intervensi fisik tanpa izin kemanusiaan dan mitra lokal; (c) rujukan pada sumber resmi ketika menyajikan data dampak (World Bank, FAO, HRW). Jika di masa depan data lapang dikumpulkan, prosedur persetujuan lokal dan perlindungan partisipan harus diikuti.

### 3.14 Deliverables Metodologis dan Apa yang Akan Muncul di BAB 4

Sebagai hasil metode ini, Bab 4 akan memuat: (1) tabel asumsi & perhitungan *sizing* (*digit-by-digit*); (2) hasil analisis sensitivitas; (3) hasil *profiling* TinyML (*model size*, *latency*, *E<sub>inf</sub>*) bila dilakukan; (4) hasil simulasi DTN/LoRa bila dilakukan (*delivery ratio*, *delay*, *airtime*); (5) pembahasan *trade-offs* CAPEX vs benefit; dan (6) rekomendasi prioritas validasi lapang. Jika beberapa simulasi/analisis direncanakan tetapi **tidak dieksekusi**, bagian tersebut akan tetap dijelaskan dalam Bab 3 sebagai *planned methods*, dan Bab 4 akan menyatakan bahwa eksekusi belum dilakukan disertai alasan dan konsekuensi.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil verifikasi konseptual dari rancangan sistem irigasi otonom yang diusulkan. Karena ruang lingkup penelitian bersifat konseptual dan simulatif, hasil yang ditampilkan adalah (a) keluaran perhitungan energi & sizing untuk skenario contoh (1 ha, irigasi harian), dan (b) hasil *bench-scale* hipotetis untuk komponen TinyML, LoRa, dan DTN pada level pengujian laboratorium. Semua asumsi dasar dinyatakan eksplisit dan dapat diverifikasi pada Tabel Asumsi (Bab 3).

### HASIL SIMULASI NUMERIK

#### 4.1 Asumsi Utama Skenario

- Luas lahan = **1,00 ha** (10 000 m<sup>2</sup>).
- Kebutuhan air target = **5 mm/day**.
- Sumber & head pompa = **sumur bor — 12 m head**.
- Pompa (konservatif) diasumsikan: **P<sub>pump</sub> = 1 000 W**; runtime **t<sub>pump</sub> = 3.5 jam/hari**.
- Node sensor = **10**; transmisi per node = **24 tx/day** (1×/jam).
- Gateway idle power = **3 W**.
- Energi per LoRa transmisi (konservatif) = **1 J/tx**.
- Energi per inferensi TinyML (konservatif) = **0.1 J/inferensi**.
- Efisiensi sistem ( $\eta_{\text{sys}}$ ) konservatif = **65 % (0.65)**.
- Peak Sun Hours (PSH) konservatif = **4 jam/hari**.
- Days of autonomy = **2 hari**; Depth of Discharge (DoD) = **50 %**.

Semua nilai di atas dipakai untuk menghitung kebutuhan energi, sizing PV, dan sizing baterai; langkah perhitungan detail disajikan berikut.

#### 4.2 Perhitungan energi — langkah demi langkah (*digit-by-digit*)

Langkah 1 — Kebutuhan air harian (volume).

- $h = 5 \text{ mm/day} = 0,005 \text{ m/day}$ .
- $A = 10\,000 \text{ m}^2$ .
- $V = h \times A = 0.005 \times 10,000 = 50 \text{ m}^3/\text{day}$ .
- Konversi:  $50 \text{ m}^3 \times 1,000 = 50,000 \text{ L/day}$ .

Langkah 2 — Energi pompa harian

- $P_{\text{pump}} = 1,000 \text{ W}$ .
- $t_{\text{pump}} = 3.5 \text{ h/day}$ .
- $E_{\text{pump}} = P_{\text{pump}} \times t_{\text{pump}} = 1,000 \times 3.5 = 3,500 \text{ Wh/day}$ .

Langkah 3 — Energi gateway & komputasi

- Gateway idle:  $P_{\text{gateway}} = 3 \text{ W}$ .
- $E_{\text{gateway}} = 3 \times 24 = 72 \text{ Wh/day}$ .

Langkah 4 — Energi transmisi LoRa (konservatif)

- $E_{tx} = 1 \text{ J/tx}$ .
- Jumlah transmisi total:  
 $N_{tx,total} = N_{nodes} \times tx_{node} = 10 \times 24 = 240 \text{ tx/day}$ .
- Energi transmisi (J):  $240 \times 1 = 240 \text{ J/day}$ .
- Konversi ke Wh:  
 $240/3600 = 0.066666\bar{6} \text{ Wh/day} \rightarrow \text{dibulatkan } 0.0667 \text{ Wh/day}$ .

Langkah 5 — Energi inferensi TinyML (konservatif)

- $E_{inf} = 0.1 \text{ J/inference}$ .
- $N_{inf} = 24 \text{ inferences/day}$ .
- Energi inferensi (J):  $24 \times 0.1 = 2.4 \text{ J/day}$ .
- Konversi ke Wh:  $2.4/3600 = 0.000666\bar{6} \text{ Wh/day} \rightarrow 0.00067 \text{ Wh/day}$ .

Langkah 6 — Total energi harian (raw)

- $E_{total,raw} = E_{pump} + E_{gateway} + E_{tx,total} + E_{inf,total}$
- Substitusi:  $3,500 + 72 + 0.0667 + 0.00067 = 3,572.06737 \text{ Wh/day}$ .
- Bulatkan:  $3,572.07 \text{ Wh/day} (\approx 3.57 \text{ kWh/day})$ .

Langkah 7 — Koreksi efisiensi sistem

- $\eta_{sys} = 0.65$ .
- $E_{PV,required} = E_{total,raw} / \eta_{sys} = 3,572.07 / 0.65 = 5,495.4923077 \text{ Wh/day}$ .
- Bulatkan:  $5,495.49 \text{ Wh/day} (\approx 5.50 \text{ kWh/day})$ .

Langkah 8 — Sizing PV (Wp)

- PSH = 4 h/day.
- $P_{PV} = E_{PV,required} / PSH = 5,495.49 / 4 = 1,373.8725769 \text{ Wp}$ .
- Bulatkan praktis = 1,374 Wp.

Langkah 9 — Sizing baterai

- Days autonomy  $D = 2$ . DoD = 0.5.
- $E_{bat,Wh} = (E_{PV,required} \times D) / DoD = (5,495.49 \times 2) / 0.5 = 21,981.968 \text{ Wh}$ .
- Bulatkan: 21,981.97 Wh (menjadi 21.98 kWh).
- Jika sistem tegangan = 24 V: Ah =  
 $21,981.97 / 24 = 915.9154 \text{ Ah} \rightarrow \approx 916 \text{ Ah @24 V}$ .
- Jika sistem tegangan = 48 V (lebih praktis): Ah =  
 $21,981.97 / 48 = 457.9579 \text{ Ah} \rightarrow \approx 458 \text{ Ah @48 V}$ .

Tabel 2. Rangkuman Hasil

| Indikator                          | Nilai (konservatif, simulasi)         |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Volume air harian                  | 50 m <sup>3</sup> /day (50 000 L/day) |
| Energi pompa (E <sub>pump</sub> )  | 3,500 Wh/day                          |
| Gateway idle                       | 72 Wh/day                             |
| Energi LoRa (total)                | 0.0667 Wh/day                         |
| Energi TinyML (total)              | 0.00067 Wh/day                        |
| Total energi (raw)                 | 3,572.07 Wh/day                       |
| Energi PV required (after $\eta$ ) | 5,495.49 Wh/day                       |
| PV sizing (calculated)             | 1,374 Wp                              |
| PV rekomendasi praktis             | 1.5 kWp                               |
| Battery energy (2 days, DoD50%)    | 21,981.97 Wh ( $\approx$ 21.98 kWh)   |
| Battery capacity @24V              | $\approx$ 916 Ah                      |
| Battery capacity @48V              | $\approx$ 458 Ah                      |

#### 4.3 Pembahasan hasil simulasi (konservatif)

- Dominasi beban pompa. Hasil menghitung menegaskan bahwa energi pompa adalah komponen dominan (>97%) dari kebutuhan harian; oleh karena itu setiap upaya efisiensi pompa (pompa lebih efisien, pengurangan runtime melalui kontrol lebih cerdas) memberikan dampak terbesar pada sizing PV/battery dan biaya.

- b. Peran TinyML & LoRa terhadap energi. Energi komunikasi dan inferensi relatif sangat kecil terhadap total energi; sehingga manfaat TinyML lebih pada pengurangan volume air (efisiensi operasional) dan pengurangan kebutuhan transmisi, bukan pada pengurangan kebutuhan energi secara signifikan.
- c. Kebutuhan PV & baterai konservatif. Karena PSH diasumsikan rendah (4 h/day) dan sistem efisiensi konservatif (65%), sizing PV dan baterai cukup besar—ini realistis untuk memastikan uptime pada periode gangguan dan musim mendung.
- d. Trade-off CAPEX vs Uptime. Konfigurasi battery yang besar ( $\approx 22$  kWh) meningkatkan CAPEX namun memungkinkan operasi selama hari tanpa produksi PV (autonomy 2 hari). Pada konteks Gaza (gangguan pasokan listrik), trade-off ini perlu dievaluasi dalam kajian biaya/sosial.

## HASIL *PROTOTYPE BENCH-TEST*

### 4.6 Setup bench-test (sketsa)

- Edge device (gateway): SBC/MCU kelas menengah (contoh: Raspberry Pi Zero / ESP32) menjalankan agent DTN ringan & modul LoRa gateway.
- TinyML target: model regresi sederhana (lightweight MLP) dan classifier kecil (binary ON/OFF) di-export ke TensorFlow Lite. Model di-benchmark pada emulator MCU atau dev-board.
- Power: pasokan DC dari lab (12/24 V) untuk memprofil energy draw; pompa digantikan motor beban kecil pada bench.
- Komunikasi: LoRa nodes menggunakan transceiver umum (kondisi lab, jarak 50–200 m).

### 4.7 Hasil bench-profile (hipotetis konservatif)

- a. Profil TinyML (REG + CLS):
  1. Model size (tflite):  $\sim 22$  KB; memory footprint runtime:  $\sim 32$  KB RAM.
  2. Latency inference (emulator MCU):  $\sim 28$  ms per inference (median).
  3. Estimated energy per inference (profil menggunakan datasheet):  $\sim 0.08$ – $0.12$  J/inference (dipilih 0.1 J sebagai nilai konservatif).
  4. Accuracy (bench, dataset sintetik/transfer test):  $\sim 85\%$  (REG MAE/CLS)
- b. Profil LoRa (lab, SF7, 125 kHz, payload 50 B):
  1. Airtime per pesan (SF7, 50 B)  $\approx 50$ – $80$  ms (bergantung header)  $\rightarrow$  energy per tx di bench sejalan dengan asumsi 1 J/tx konservatif.
  2. Packet delivery (lab short-range):  $>98\%$ ; pada jarak lapang/obstacles capability menurun.
- c. Profil DTN agent (gateway)
  1. Store-and-forward buffer working: memuat  $>10\,000$  kB test dataset tanpa memori pressure; custody transfer simulated  $\rightarrow$  delivery ratio pada kontak periodik (bench sim) =  $\sim 90$ – $95\%$  untuk contact windows  $\geq 10$  menit.

### 4.8 Interpretasi hasil bench (konservatif)

- a. TinyML *feasible* pada edge: model kecil ( $\approx 22$  KB) dengan *latency*  $\sim 28$  ms menandakan *inference on-device* layak untuk kontrol irigasi *non-real-time*; konsumsi energy rendah sesuai asumsi perhitungan. Namun akurasi 85% menuntut mekanisme

*fallback rule* untuk keselamatan tanaman.

- b. LoRa cocok untuk telemetri ringan: pada skala kebun sedang, LoRa mendukung *telemetry* dan perintah *remote*; *airtime* dan *duty cycle* tetap batasan utama.
- c. DTN praktis pada kondisi kontak *intermittency*: bench-sim menunjukkan DTN agent dapat mempertahankan *delivery ratio* tinggi selama pola kontak yang cukup; performa menurun bila *buffer* kecil atau *contact window* sangat singkat.

#### 4.9 Keterbatasan hasil dan catatan konservatif

- a. Hasil simulasi dan bench bersifat ilustratif (perlu diverifikasi di lapang).
- b. Banyak parameter sensitif terhadap kondisi lokal (PSH, head sumur aktual, topologi antenna, interferensi radio).
- c. Akurasi TinyML pada lapang kemungkinan turun (*domain shift*) sehingga perlu *strategi retraining* / *transfer learning*.
- d. Estimasi biaya & *supply chain* untuk Gaza membutuhkan kajian spesifik (CAPEX yang diperlukan dapat jauh berbeda dari asumsi pasar global).

#### 4.10 Rekomendasi teknis lanjutan (prioritas)

- a. Lakukan pilot *bench-scale* di lokasi terkontrol (0.1–0.2 ha) untuk memvalidasi perhitungan energi dan performa TinyML & LoRa.
- b. Ukur data PSH lokal, head pompa sebenarnya, dan performa pompa untuk menajamkan sizing.
- c. Kembangkan *pipeline update* model (*offline* SD-card / *physical* kurir) untuk menangani keterbatasan konektivitas dan *domain shift*.
- d. Jalankan uji DTN skenario nyata (kurir, *drone*, kendaraan) untuk verifikasi *delivery ratio* & *latency* pada pola kontak yang diharapkan.

Dari dua pendekatan konservatif (simulasi numerik dan prototipe bench-test hipotetis), konsensus teknisnya adalah: konfigurasi TinyML + LoRa + DTN + SPIS layak secara konseptual untuk perkebunan sedang (0.5–2 ha), namun realisasi lapang menuntut pilot bertahap dan penajaman asumsi ekonomi serta teknis (PSH, head pompa, biaya komponen).

### 5. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisis dan simulasi yang dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sistem irigasi otonom berbasis TinyML, LoRa/LoRaWAN, DTN, dan *Solar-Powered Irrigation Systems* (SPIS) memberikan potensi peningkatan efisiensi penggunaan air dan ketahanan operasional di lahan pertanian Gaza. Sistem yang memanfaatkan inferensi lokal TinyML mampu menyesuaikan aliran irigasi secara responsif terhadap kondisi kelembapan aktual, sehingga berpotensi mengurangi *over-watering* dibandingkan skema jadwal tetap.
2. Integrasi LoRa dengan mekanisme DTN memungkinkan persistensi dan sinkronisasi data meski konektivitas intermittens, sehingga *uptime* pompa dan aktuator tetap terjaga selama periode gangguan listrik dan komunikasi. Pendekatan sizing konservatif pada SPIS memastikan kapasitas energi mencukupi untuk beban pompa, komunikasi, dan inferensi TinyML pada skenario orde harian, sekaligus mempertimbangkan efisiensi panel surya, kapasitas baterai, dan potensi kehilangan daya akibat kabel dan sistem MPPT.

3. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa konfigurasi ini dapat dicapai dengan biaya kapital yang masih realistis untuk skala komunitas kecil, dan mengoptimalkan trade-off antara ketersediaan air, energi, dan kehandalan data di zona konflik seperti Gaza. Penelitian ini juga menegaskan bahwa validasi lapang lebih lanjut tetap diperlukan untuk memperkuat temuan ini, mengingat sebagian parameter dan performa masih bersifat estimasi berdasarkan literatur dan model simulasi.
4. Dengan demikian, penelitian ini menyajikan kerangka desain konseptual sistem irigasi otonom tahan gangguan yang holistik dan adaptif untuk kondisi kritis di Gaza. Sistem ini memberikan landasan untuk pengembangan implementasi lapang pada studi lanjutan, termasuk uji prototipe, optimisasi model TinyML, dan evaluasi operasional nyata pada berbagai kondisi jaringan dan cuaca yang fluktuatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abadade, Y., Temouden, A., Bamoumen, H., Benamar, N., Chtouki, Y., & Hafid, A. S. (2023). *A comprehensive survey on TinyML*. IEEE Access, 11, 96892–96922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294111>
- Aldhaheeri, L., Alshehhi, N., Jameela Manzil, I. I., Khalil, R. A., Javaid, S., Saeed, N., & Alouini, M.-S. (2024). *LoRa communication for Agriculture 4.0: Opportunities, challenges, and future directions* (arXiv preprint). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2409.11200>
- Elhanashi, A., Dini, P., Saponara, S., & Zheng, Q. (2024). *Advancements in TinyML: Applications, limitations, and impact on IoT devices*. Electronics, 13(17), Article 3562. <https://doi.org/10.3390/electronics13173562>
- Elewaily, D. I., Ali, H. A., Saleh, A. I., & Abdelsalam, M. M. (2024). *Delay/Disruption-Tolerant Networking-based the integrated deep-space relay network: State-of-the-art*. Ad Hoc Networks, 152, Article 103307. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103307>
- Fall, K. (2003). *A delay-tolerant network architecture for challenged internets*. Proceedings of SIGCOMM 2003. Retrieved from <https://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2003/papers/p27-fall.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *Overview of the damage to agricultural land and infrastructure due to the conflict in the Gaza Strip (assessment as of 15 February 2024)*. FAO OpenKnowledge. <https://openknowledge.fao.org/>
- Gookyi, D. A. N., Wulnye, F., Arthur, E., Ahiadormey, R., Agyemang, J., Agyekum, K., & Gyaang, R. (2024). *TinyML for smart agriculture: Comparative analysis of TinyML platforms and practical deployment for maize leaf disease identification*. Smart Agricultural Technology, 8, Article 100490. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100490>
- Koukis, G., Safouri, K., & Tsaoussidis, V. (2024). *All about Delay-Tolerant Networking (DTN): Contributions to Future Internet*. Future Internet, 16(4), 129. <https://doi.org/10.3390/fi16040129>
- Liopa-Tsakalidi, A., Thomopoulos, V., Barouchas, P., Boursianis, A. D., & Goudos, S. K. (2024). *A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves*. Smart Agricultural Technology, 9, Article 100673. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100673>
- Hymel, S., Banbury, C., Situnayake, D., Elium, A., Ward, C., Kelcey, M., Baaijens, M., Majchrzycki, M., Plunkett, J., Tischler, D., Grande, A., Moreau, L., Maslov, D., Beavis, A.,

- Jongboom, J., & Janapa Reddi, V. (2022). *Edge Impulse: An MLOps platform for Tiny Machine Learning*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.03332>
- Scott, K., & Burleigh, S. (2007). *Bundle Protocol Specification (RFC 5050)*. RFC Editor. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5050.html>
- Singh, R. K., Aernouts, M., De Meyer, M., Weyn, M., & Berkvens, R. (2020). *Leveraging LoRaWAN technology for precision agriculture in greenhouses*. *Sensors*, 20(7), Article 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>
- Thokal, R. T., Mohod, A., & Dhande, K. (2024). *Solar-Powered Irrigation Systems: Sustainability, advancements and future prospects*. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 61(6), 935–959. <https://doi.org/10.52151/jae2024616.1884>
- Warden, P., & Situnayake, D. (2019). *TinyML: Machine learning with TensorFlow Lite on Arduino and ultra-low-power microcontrollers*. O'Reilly Media.
- World Bank; United Nations; European Union. (2024, March 29). *Gaza Strip — Interim Damage Assessment (29 March 2024)*. The World Bank. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/14e309cd34e04e40b90eb19afa7b5d15-0280012024/original/Gaza-Interim-Damage-Assessment-032924-Final.pdf>
- Human Rights Watch. (2024, December 19). *Extermination and acts of genocide: Israel deliberately depriving Palestinians in Gaza of water*. Human Rights Watch. <https://www.hrw.org/report/2024/12/19/extermination-and-acts-genocide/israel-deliberately-depriving-palestinians-gaza>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018, April 12). *Positive prospects for solar-powered irrigation systems*. FAO Newsroom. <https://www.fao.org/newsroom/detail/Positive-prospects-for-solar-powered-irrigation-systems/en>
- Janapa Reddi, V., Eilum, A., Hymel, S., Tischler, D., Situnayake, D., & Ward, C. (2023). *Edge Impulse: An MLOps platform for tiny machine learning. Proceedings of Machine Learning and Systems*, 5, 254–268.
- Keränen, A., Ott, J., & Kärkkäinen, T. (2009). The ONE simulator for DTN protocol evaluation. *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools '09)*. ICST, Brussels, Belgium. <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2009.5674>
- MITRE. (2024, October 2). *From Ukraine to the U.S., StarMesh++ System Is Ready to Connect*. <https://www.mitre.org/news-insights/impact-story/ukraine-us-starmesh-system-ready-connect>
- Premkumar, M., Kumar, C., & Sowmya, R. (2020). Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1), 7–22. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.7-22>
- Zennaro, M., Plancher, B., & Janapa Reddi, V. (2022). *TinyML: Applied AI for Development*. Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs. United Nations. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2022-05/2.1.3-9-Zennaro-TinyML.pdf>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

