

LAPORAN PENELITIAN

TENTANG

**Pengembangan Infrastruktur IoT Campus Testbed (C-IoT-TB) untuk
Penelitian Jaringan Sensor Nirkabel dan Aplikasi IoT Terapan**

Penelitian ini dibiayai dengan Dana DIPA
Nomor : SP DIPA 023.18.2.677606/2024
Politeknik Negeri Malang
dengan Surat Perjanjian Nomor : 5583/PL2.1/HK/2024

Oleh:

Indrazno Siradjuddin, ST., MT., PhD.

NIDN. 0024067406

Prof. Dr. Budhy Setiawan, B.SEET., MT

NIDN: 0009046405

Gillang Al Azhar, S.S.T., M.Tr.T

NIDN: 0022069501

Zakiyah Amalia, ST., M.Tr.T

NIDN. 0014019405



POLITEKNIK NEGERI MALANG
15 Oktober 2024

IDENTITAS DAN URAIAN UMUM PENELITIAN

1. Judul Penelitian:

DISAIN DAN IMPLEMENTASI PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM OTOMASI INDUSTRI DENGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL: STUDI KASUS CART-INVERTED PENDULUM

2. Tim Peneliti:

No	Nama	Jabatan	Bidang Keahlian	Jurusan	Alokasi waktu (Jam/Minggu)
1	Indrazno Siradjuddin, S.T., M.T., Ph.D.	Ketua Peneliti Dosen DIV-PSTE	Robotika	Teknik Elektro	10
2	Prof. Dr. Budhy Setiawan, B.SEET., MT,	Anggota Peneliti Dosen DIV-PSTE	Mekatronika	Teknik Elektro	10
3	Gillang Al Azhar, S.S.T., M.Tr.T	Anggota Peneliti Dosen DIII-PSTE	Robotika	Teknik Elektro	10
4	Zakiah Amalia, ST., M.Tr.T	Pembantu Peneliti Dosen DIV-PSTM	Sistem Kontrol	Teknik Mesin	10
5	Ida Lailatul Fitria	Mahasiswa MTTE	Sistem kontrol dan Robotika	Teknik Elektro	10
6	Febby Ayu Salsabillah	Mahasiswa MTTE	Sistem kontrol dan Robotika	Teknik Elektro	10
8	Dimas Adi Prayoga	Mahasiswa MTTE	Sistem kontrol dan Robotika	Teknik Elektro	10
9	Arif Anwar Rosyidin	Mahasiswa MTTE	Sistem kontrol dan Robotika	Teknik Elektro	10

3. Objek Penelitian (jenis material yang akan diteliti dan segi penelitian):

Obyek penelitian adalah produk cart-inverted pendulum yang dilengkapi dengan sensor, embedded system serta software untuk implementasi MPC secara realtime

4. Masa Pelaksanaan:

8 bulan

5. Biaya:

Rp 40.000.000,00

6. Lokasi Penelitian:

Laboratorium MTTE dan Workshop di tempat Mitra

7. TKT Awal: 4 TKT akhir yang akan dihasilkan: 6

8. Grup Riset:

Intelligent Systems and Robotics (ISaR)

9. Instansi lain yang terlibat:

Mitra

10. Temuan yang ditargetkan: Prototipe yang dapat digunakan untuk mendemonstrasikan sistem kontrol MPC secara realtime

11. Kontribusi mendasar pada suatu bidang ilmu (uraikan tidak lebih dari 50 kata, tekankan pada gagasan fundamental dan orisinal yang akan mendukung pengembangan IPTEKSB):

Penelitian akan menghasilkan inovasi sebuah prototipe produk peralatan LAB sistem kontrol yang dapat digunakan untuk melakukan eksperimen-eksperimen disain algoritma sistem control secara real-time, dalam penelitian ini difokuskan pada implementasi Model Predictive Control.

12. Jurnal ilmiah yang menjadi sasaran (tuliskan nama terbitan berkala ilmiah internasional bereputasi, nasional terakreditasi, atau nasional tidak terakreditasi dan tahun rencana publikasi):

Luaran publikasi berupa artikel untuk seminar internasional terindeks Scopus, ICVEE 2024.

13. Rencana luaran HKI, buku, purwarupa atau luaran lainnya yang ditargetkan, tahun rencana perolehan atau penyelesaiannya:

Luaran KI berupa kode program komputer implementasi MPC untuk cart-inverted pendulum secara realtime

Daftar Isi

Daftar Gambar

Daftar Tabel

RINGKASAN

Penelitian dengan judul “Disain Dan Implementasi Perangkat Pembelajaran Sistem Otomasi Industri Dengan Model Predictive Control: Studi Kasus Cart-Inverted Pendulum” berupaya mengembangkan sebuah prototipe sistem kontrol berbasis Model Predictive Control (MPC) yang dapat diaplikasikan dalam sebuah laboratorium sistem kontrol. Pada tahap awal penelitian, asumsi baseline adalah bahwa teknologi yang ada telah mencapai TKT level 4, yang menggambarkan adanya literatur dan pemahaman konseptual yang cukup kuat terkait MPC. Namun, perlu adanya pengembangan lebih lanjut agar teknologi ini dapat ditingkatkan hingga mencapai TKT level 6 di akhir penelitian. Mencapai TKT level 6 dalam kesiapan teknologi akan berarti adanya implementasi prototipe MPC yang berfungsi penuh dan teruji dengan baik. Hal ini akan melibatkan pengembangan perangkat keras yang solid serta pengoptimalan algoritma pendukungnya. Secara terperinci, proses penelitian akan dimulai dengan pemilihan komponen perangkat keras yang tepat untuk implementasi MPC. Pengembangan perangkat lunak untuk mendukung algoritma kontrol juga akan menjadi fokus yang krusial. Keselarasan antara perangkat keras dan perangkat lunak, serta optimalisasi kinerja sistem secara keseluruhan akan menjadi bagian penting dalam pembangunan prototipe ini. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, output yang diharapkan dari penelitian ini sangat komprehensif. Pertama-tama, prototipe cart-inverted pendulum dengan kontrol MPC yang berfungsi penuh akan menjadi pencapaian kunci, menandai sebuah langkah maju dalam penggabungan teori kontrol yang rumit dengan implementasi dunia nyata. Selain itu, artikel ilmiah yang dikembangkan dalam penelitian ini diharapkan akan diterima untuk presentasi pada konferensi internasional terindeks seperti IEEE (ICVE2024). Hal ini akan menjadi suatu pencapaian signifikan yang dapat memberi pengakuan dan kontribusi pengetahuan yang substansial dalam bidang sistem kontrol. Selain itu, penelitian memasukkan juga pengembangan dokumen Feasibility Study serta dokumen Implementation Arrangement dan Hak Cipta berupa KI program komputer. Ini menunjukkan keseriusan dalam menjelajahi potensi komersialisasi prototipe hasil penelitian ini. Estimasi mengenai perhitungan biaya, analisis pasar, serta proyeksi pendapatan akan menjadi bagian utama dalam dokumen feasibility study. Dokumen arrangement implementasi akan memberikan panduan terinci tentang bagaimana prototipe ini dapat diterapkan secara komersial serta menjelaskan langkah demi langkah yang diperlukan untuk mencapai tujuan tersebut. Selain dari aspek pengembangan teknologi dan akademis, penelitian ini juga memiliki dampak yang signifikan pada pendidikan dan pengembangan teknologi di bidang sistem kontrol. Prototipe dan temuan yang dilaporkan dapat bermanfaat bagi siswa, peneliti, dan industri sebagai sumber inspirasi, referensi, dan mungkin juga sebagai produk konkret di pasar.

KATA KUNCI

Pemodelan, sistem dinamik, kontrol, MPC, Cart-Inverted Pendulum

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1.2 Rumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian adalah langkah penting yang mengarahkan fokus studi secara spesifik. Untuk penelitian dengan judul "Disain Dan Implementasi Perangkat Pembelajaran Sistem Otomasi Industri Dengan Model Predictive Control: Studi Kasus Cart-Inverted Pendulum", permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian pada pengembangan perangkat keras dengan menggunakan sistem tertanam seperti Arduino atau ESP32 dan software untuk program sistem tertanam tersebut, batasan masalah harus dijelaskan secara eksplisit. Berikut adalah beberapa batasan masalah yang bisa ditetapkan:

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sebuah perangkat pembelajaran yang berfokus pada aplikasi Model Predictive Control (MPC) dalam sistem dinamik khususnya Cart-Inverted Pendulum menggunakan platform mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Upaya ini bertujuan untuk memfasilitasi pemahaman konseptual yang lebih baik dan penerapan praktis MPC bagi mahasiswa dan peneliti, dengan menyediakan alat praktikum yang mampu mengilustrasikan tantangan nyata sistem kontrol non-linear dan tak stabil. Perangkat pembelajaran ini diharapkan dapat menjadi alat efektif dalam mengatasi kesenjangan antara teori kontrol yang kompleks dengan aplikasi dunia nyata, sekaligus meningkatkan kualitas pendidikan teknik kontrol dan mendukung kurikulum yang ada dengan cara yang inovatif dan interaktif.

Tabel 1.1 Luaran Penelitian

No	Jenis Luaran	Indikator Capaian *)
Luaran Wajib		
1	IPTEKSB berupa prototype	Ada
2	Feasibility study (analisis kebutuhan pelanggan, kondisi pasar, dan teknis)	Ada
3	Dokumen uji yang dikeluarkan/ telah divalidasi Ada oleh lembaga yang kompeten	Ada
4	Dokumen Implementation Arrangement (IA)	Ada
Luaran Tambahan		
1	Prosiding seminar internasional terindeks (SCOPUS, IEEE)	Presented

1.5 Manfaat Penelitian

1.6 Luaran Penelitian

Luaran penelitian dapat dilihat pada Tabel ??.

BAB 2

PROFIL MITRA INDUSTRI



Gambar 2.1 Kegiatan di Kido Robot



Gambar 2.2 Produk dan Workshop di Kido Robot

Kido Robot adalah perusahaan yang berfokus pada produksi dan pelatihan modul edukasi robotika. Inisiatif Kido Robot yang dimulai sejak 2014, memiliki misi untuk menyiapkan sumber daya manusia dalam menghadapi ekonomi digital, khususnya di bidang teknologi robotika. Antara lain dengan melakukan pelatihan private, kursus rutin grup dan workshop robotik. Kido Robot juga berkolaborasi dengan sekolah-sekolah dan ikatan guru dalam pengembangan dan pelatihan robotika. Gambar ?? adalah gambaran kegiatan di Kiddo Robot. Gambar ?? adalah gambaran salah satu produk, situasi workshop dan kerjasama yang pernah dilakukan dengan Politeknik Negeri Malang.

Dedikasi bahwa platform pendidikan dalam aliran berkelanjutan dari fase prasekolah ke fase dewasa harus disediakan untuk kreativitas dan daya pikir mengembangkan pendidikan yang akan menjadi dasar untuk menumbuhkan bakat di setiap bidang, Kido Robot memfasilitasi berbagai platform pendidikan untuk segala usia. Khususnya, alat pendidikan berkualitas baik untuk robot, pengkodean, dan STEM memungkinkan pembelajaran bakat yang efektif.

Kido Robot telah banyak bekerja sama dengan sekolah-sekolah di area Kota Malang, diantaranya sekolah Andalusia Kids, Tweddle Land, Al Muttaqien, dan lain sebagainya. Tidak hanya dalam kegiatan ekstrakurikuler saja namun dalam

berkolaborasi membuat modul belajar robotika juga. Sehingga dapat tercipta modul-modul edukasi yang baik. Selain bekerja sama dengan sekolah, Kido Robot juga menjalin kerjasama kegiatan dengan taman atau lokasi permainan anak. Misi yang dicapai adalah bukan hanya untuk menjadikan siswa-siswa menjadi juara, tapi lebih daripada hal tersebut adalah membuat siswa-siswa senang belajar utamanya dalam hal teknologi dan membuat mereka siap dalam menghadapi perkembangan teknologi yang signifikan.

BAB 3

TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Embedded systems dan IoT

Istilah IoT (Internet of Things) merupakan istilah yang relatif baru tetapi mengacu pada penggunaan lama yang disebut Machine-to-Machine. Machine-to-Machine (M2M) adalah sekumpulan teknologi jaringan kabel atau nirkabel yang memungkinkan pertukaran informasi secara otomatis antar sistem tanpa intervensi manusia. IoT hanyalah visi yang lebih luas dari M2M, di mana perangkat tidak hanya berasal dari dunia industri, tetapi juga dari penggunaan publik umum. Pasar IoT terus berkembang pesat di seluruh dunia. Perkembangan pesat ini mendorong pemain baru untuk mengusulkan teknologi baru pada setiap tahap: pengembangan perangkat keras, cakupan konektivitas, dan layanan cloud (misalnya, platform penyimpanan atau visualisasi data). IoT sering disajikan sebagai revolusi industri baru, dan pemasaran sering menjanjikan bahwa semua kasus penggunaan bersifat "smart": smart building, smart city, smart healthcare, dll. Namun, membuat sesuatu menjadi "smart" tidak selalu mudah dan banyak protokol yang ada.

3.1.1 Embedded System

Embedded systems adalah sistem komputasi khusus yang dirancang untuk menjalankan fungsi tertentu dalam sistem yang lebih besar. Sistem ini biasanya ditandai dengan integrasinya ke dalam perangkat yang dikendalikan, operasi real-time, dan keterbatasan sumber daya (misalnya, daya pemrosesan, memori, dan konsumsi energi yang terbatas). Embedded systems dapat ditemukan dalam berbagai aplikasi, mulai dari elektronik konsumen (misalnya, smartphone, perangkat rumah pintar) hingga otomasi industri (misalnya, robotika, kontrol proses). Dalam konteks IoT, embedded systems memainkan peran penting sebagai "things" yang mengumpulkan dan memproses data dari lingkungan. Sistem ini sering mencakup sensor, aktuator, dan antarmuka komunikasi yang memungkinkannya berinteraksi dengan perangkat lain dan cloud. Desain dan pengembangan embedded systems untuk aplikasi IoT memerlukan pertimbangan hati-hati terhadap faktor-faktor seperti konektivitas, interoperabilitas, keamanan, dan manajemen daya. Secara umum, sistem elektronik dapat dikarakterisasi berdasarkan konsumsi daya, daya komputasi, ukuran, dan harga. Dalam kasus khusus embedded systems yang digunakan dalam IoT, kita dapat memberikan bobot berikut pada masing-masing karakteristik: Meskipun tentu ada pengecualian terhadap definisi sederhana ini, kita mengasumsikan bahwa, dibandingkan dengan sistem elektronik lainnya, embedded systems yang digunakan dalam IoT memiliki:

1. Konsumsi daya rendah (Low-power consumption)

2. Daya komputasi rendah (Low computing power)
3. Ukuran kecil (A small size)
4. Harga rendah (A low price)

Karakteristik-karakteristik ini sering saling terkait. Misalnya, ukuran kecil biasanya menyiratkan konsumsi daya rendah dan harga rendah. Demikian pula, konsumsi daya rendah sering menyiratkan daya komputasi rendah. Desain embedded systems sering merupakan pertukaran (trade-off) antara karakteristik-karakteristik ini, tergantung pada aplikasi dan kebutuhan spesifik.

3.1.2 Protokol nirkabel IoT

Protokol nirkabel IoT dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama berdasarkan jangkauan dan laju data: protokol jangkauan pendek, jangkauan menengah, dan jangkauan jauh.

1. Protokol jangkauan pendek: Protokol ini dirancang untuk komunikasi pada jarak pendek, biasanya dalam beberapa meter. Protokol ini umum digunakan untuk jaringan area pribadi (PANs) dan aplikasi otomasi rumah. Contoh protokol jangkauan pendek termasuk Bluetooth, Zigbee, dan Wi-Fi.
2. Protokol jangkauan menengah: Protokol ini dirancang untuk komunikasi pada jarak sedang, biasanya hingga beberapa ratus meter. Protokol ini umum digunakan untuk jaringan area lokal (LANs) dan aplikasi otomasi industri. Contoh protokol jangkauan menengah termasuk Wi-Fi, Z-Wave, dan Thread.
3. Protokol jangkauan jauh: Protokol ini dirancang untuk komunikasi pada jarak jauh, biasanya beberapa kilometer atau lebih. Protokol ini umum digunakan untuk jaringan area luas (WANs) dan aplikasi smart city. Contoh protokol jangkauan jauh termasuk LoRaWAN, Sigfox, dan NB-IoT.
4. Protokol jangkauan sangat jauh: Protokol ini dirancang untuk komunikasi pada jarak yang sangat jauh, biasanya puluhan kilometer. Protokol ini umum digunakan untuk aplikasi yang memerlukan jangkauan ekstrem, seperti pemantauan lingkungan dan pertanian cerdas. Contoh protokol jangkauan sangat jauh termasuk Long Range (LoRa) dan Weightless.

Setiap protokol ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, dan pemilihan protokol tergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi IoT, seperti jangkauan, laju data, konsumsi daya, dan biaya. Sigfox dan LoRaWAN dianggap sebagai protokol dengan jangkauan sangat jauh dan daya sangat rendah. Jenis jaringan ini semuanya disebut sebagai Low Power Wide Area Network (LPWANs). Dalam penelitian ini, kami fokus pada LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) yang merupakan standar jangkauan jauh yang menggunakan laju data rendah dengan kebutuhan konsumsi daya rendah.

3.2 Ikhtisar Dasar-dasar dan Arsitektur LoRaWAN

LoRaWAN adalah protokol Low Power Wide Area Network (LPWAN) yang dirancang untuk mendukung komunikasi jarak jauh, daya rendah, dan laju data rendah untuk aplikasi Internet of Things (IoT). Dikembangkan dan dipelihara oleh LoRa Alliance, protokol ini mendefinisikan lapisan Media Access Control (MAC) yang beroperasi di atas lapisan fisik yang disediakan oleh modulasi LoRa. Sejak rilis awalnya pada Januari 2015, LoRaWAN telah berkembang melalui beberapa versi spesifikasi, dengan LoRaWAN 1.0.4 dan 1.1 mewakili iterasi stabil terbaru pada saat penulisan. Bagian ini memberikan ikhtisar teknis singkat tentang dasar-dasar LoRaWAN, termasuk karakteristik utamanya, arsitektur, model komunikasi, mekanisme keamanan, dan domain aplikasi khas.

3.2.1 Karakteristik Utama LoRaWAN

LoRaWAN menampilkan beberapa fitur utama yang membuatnya sangat cocok untuk penyebaran IoT:

1. **Jangkauan Jauh:** Jangkauan komunikasi hingga 10+ km di lingkungan pedesaan dan 2–5 km di lingkungan perkotaan yang padat dapat dicapai, tergantung pada medan dan kondisi interferensi.
2. **Konsumsi Daya Rendah:** Perangkat akhir dapat beroperasi selama 5–10 tahun atau lebih dengan satu baterai karena pengoptimalan siklus tugas (duty cycling) dan mode tidur.
3. **Komunikasi Aman:** Kerahasiaan dan integritas data end-to-end dijamin melalui enkripsi berbasis AES simetris.
4. **Komunikasi Dua Arah:** Protokol ini mendukung pengiriman pesan uplink (perangkat-ke-server) dan downlink (server-ke-perangkat).
5. **Skalabilitas:** Jaringan LoRaWAN dapat mendukung jutaan perangkat per gateway karena skema akses berbasis ALOHA dan mekanisme Adaptive Data Rate (ADR).
6. **Dukungan Geolokasi:** LoRaWAN memungkinkan geolokasi perangkat tanpa GPS melalui teknik time difference of arrival (TDOA) menggunakan beberapa gateway.
7. **Adaptive Data Rate (ADR):** Protokol ini secara dinamis menyesuaikan laju data dan daya transmisi berdasarkan kualitas link untuk mengoptimalkan kapasitas jaringan dan masa pakai baterai.
8. **Standardisasi Global:** LoRaWAN distandardisasi oleh LoRa Alliance, memastikan interoperabilitas di seluruh perangkat dan jaringan di seluruh dunia.

3.2.2 Batasan Laju Data dan Payload

LoRaWAN dioptimalkan untuk transmisi data kecil dan tidak sering. Batasan utama meliputi:

1. **Ukuran Payload:** Berkisar antara 51 hingga 242 byte per pesan, tergantung pada peraturan regional dan laju data yang dipilih.
2. **Laju Data:** Bervariasi antara 0,3 kbps hingga 50 kbps, ditentukan oleh spreading factor (SF) dan konfigurasi bandwidth.
3. **Frekuensi Pesan:** Perangkat biasanya dirancang untuk mengirimkan 1–100 pesan per hari.
4. **Duty Cycle:** Tunduk pada batasan peraturan nasional (misalnya, 1% di Eropa berdasarkan peraturan ETSI).
5. Spreading factor adalah parameter transmisi kritis yang menukar laju data dengan jangkauan komunikasi dan ketahanan: spreading factor yang lebih tinggi (misalnya, SF12) memungkinkan komunikasi jarak jauh dengan biaya throughput yang lebih rendah, sedangkan spreading factor yang lebih rendah (misalnya, SF7) mendukung laju data yang lebih tinggi pada jarak yang lebih pendek.

3.2.3 Domain Aplikasi Khas

LoRaWAN banyak diadopsi dalam skenario yang menuntut masa pakai baterai yang panjang, cakupan luas, efisiensi biaya, dan pertukaran data minimal. Kasus penggunaan representatif meliputi:

1. **Pertanian Cerdas:** Pemantauan kelembaban tanah, pelacakan kesehatan tanaman, manajemen ternak.
2. **Pemantauan Lingkungan:** Pemantauan kualitas udara, pemantauan ketinggian air, stasiun cuaca.
3. **Gedung Cerdas:** Kontrol HVAC, manajemen pencahayaan, deteksi hunian.
4. **Pelacakan Aset:** Manajemen armada, pelacakan inventaris, pemantauan rantai dingin.
5. **Kota Cerdas:** Kontrol pencahayaan jalan, pemantauan lalu lintas dan parkir, manajemen limbah.
6. **Pertanian:** Pemantauan kelembaban tanah, otomasi irigasi, pelacakan ternak.
7. **Rantai Pasok dan Logistik:** Pelacakan aset, pemantauan rantai dingin, manajemen inventaris.

8. **Utilitas:** Pengukuran pintar untuk air, gas, dan listrik; deteksi kebocoran dan kerusakan.
9. **IoT Industri:** Pemantauan kondisi, perawatan prediktif, pemantauan lingkungan.

3.2.4 LoRa vs. LoRaWAN

Penting untuk membedakan antara LoRa dan LoRaWAN:

1. **LoRa** adalah teknik modulasi lapisan fisik berpaten yang berbasis Chirp Spread Spectrum (CSS). LoRa mengkodekan data menggunakan pulsa chirp yang dimodulasi frekuensi linear, menawarkan anggaran link (link budget) yang tinggi dan ketahanan terhadap fading multipath dan pergeseran Doppler.
2. **LoRaWAN** adalah protokol lapisan MAC yang mendefinisikan bagaimana perangkat yang diaktifkan LoRa mengakses jaringan, menyusun pesan, mengelola sesi, dan memastikan keamanan. LoRaWAN menstandarkan perilaku perangkat di berbagai penyebaran heterogen dan memungkinkan interoperabilitas.

Dengan demikian, LoRa menyediakan mekanisme transmisi fisik, sedangkan LoRaWAN mengatur aturan komunikasi tingkat jaringan.

3.2.5 Arsitektur Jaringan

Jaringan LoRaWAN standar terdiri dari empat komponen utama:

1. **End Devices:** Node sensor atau aktuator yang menghasilkan atau menerima data aplikasi. Mereka berkomunikasi secara nirkabel menggunakan modulasi LoRa.
2. **Gateways:** Transceiver multi-saluran dan multi-modem yang menerima pesan uplink dari end devices dan meneruskannya ke Network Server melalui backhaul (misalnya, Ethernet, seluler). Gateway juga meneruskan pesan downlink dari server ke end devices.
3. **Network Server (LNS):** Perangkat lunak terpusat yang bertanggung jawab atas manajemen jaringan, termasuk deduplikasi pesan, kontrol adaptive data rate (ADR), dan routing.
4. **Application Server:** Memproses data lapisan aplikasi yang didekripsi dan berinteraksi dengan layanan pengguna akhir atau dashboard.

3.2.6 Alur Pesan

LoRaWAN menggunakan topologi star-of-stars, di mana end devices berkomunikasi langsung dengan beberapa gateway. Alur pesan dapat dirangkum sebagai berikut:

Komunikasi Uplink

Pesan uplink berasal dari end devices dan dikirim melalui udara menggunakan skema akses acak berbasis ALOHA—tidak diperlukan pemasangan berpasangan dengan gateway tertentu. Semua gateway dalam jangkauan radio menerima pesan dan meneruskannya ke Network Server. Server melakukan deduplikasi dengan menyimpan hanya satu salinan dari penerimaan yang berulang dan kemudian memisahkan payload lapisan jaringan dan lapisan aplikasi.

Komunikasi Downlink

Pesan downlink diprakarsai oleh Network Server atau Application Server dan dijadwalkan untuk transmisi selama jendela penerimaan yang telah ditentukan (RX1 dan RX2) setelah uplink. Network Server memilih gateway yang sesuai untuk mengirimkan pesan berdasarkan kualitas link dan batasan waktu.

3.2.7 Model Keamanan

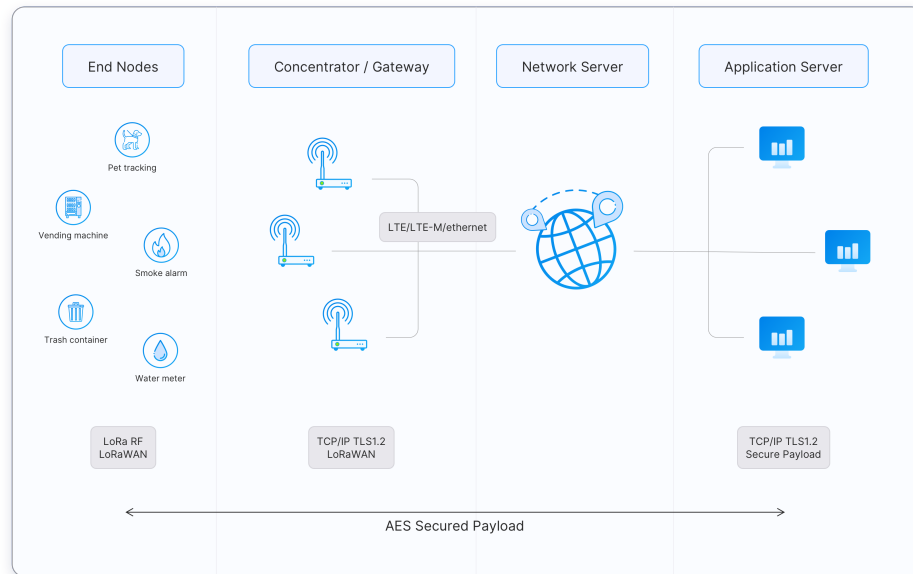
LoRaWAN menggunakan skema enkripsi kunci simetris dua lapis untuk memastikan pemisahan perhatian antara fungsi jaringan dan aplikasi:

1. **Network Session Key (NwkSKey):** Mengenkripsi perintah MAC dan memastikan integritas payload lapisan jaringan. Hanya diketahui oleh end device dan Network Server.
2. **Application Session Key (AppSKey):** Mengenkripsi data aplikasi. Dibagikan secara eksklusif antara end device dan Application Server.

Kunci sesi ini diturunkan dari kunci root selama prosedur join (baik Over-the-Air Activation—OTAA—atau Activation-by-Personalization yang telah ditentukan sebelumnya—ABP). Kunci sesi diputar ulang saat bergabung kembali ke jaringan, meningkatkan kerahasiaan ke depan (forward secrecy).

3.2.8 The Things Stack

The Things Stack adalah implementasi open-source kelas enterprise dari LoRaWAN Network Server yang mengintegrasikan fungsi Network Server dan Application Server. The Things Stack mendukung onboarding aman, manajemen, dan pemantauan jutaan perangkat LoRaWAN dalam skala besar. Dengan mengabstraksi detail



Gambar 3.1 Arsitektur Jaringan LoRaWAN

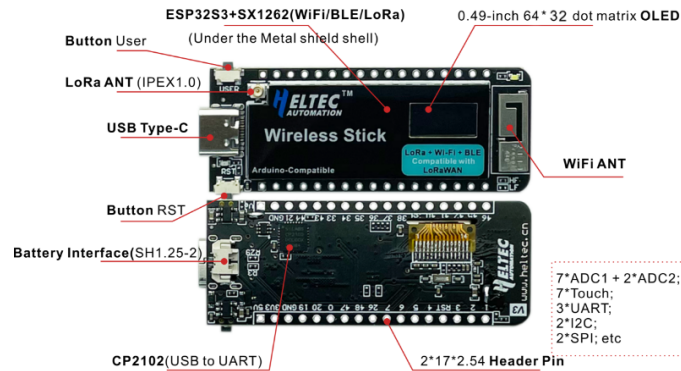
protokol tingkat rendah, The Things Stack memungkinkan penyebaran solusi LoRaWAN siap produksi yang cepat di berbagai vertikal. LoRaWAN merupakan solusi yang kuat, distandardisasi, dan dapat diskalakan untuk penyebaran IoT berbasis LPWAN. Kombinasi kemampuan jangkauan jauh, efisiensi energi, keamanan yang kuat, dan kemampuan beradaptasi dengan peraturan telah mendorong adopsi global di infrastruktur cerdas, pertanian, logistik, dan otomasi industri. Memahami arsitektur berlapisnya—mulai dari modulasi fisik (LoRa), protokol MAC (LoRaWAN), hingga perangkat lunak jaringan (misalnya, The Things Stack)—sangat penting untuk merancang dan menyebarkan sistem IoT yang andal.

3.3 Arsitektur LoRaWAN

Jaringan LoRaWAN diterapkan menggunakan topologi *star-of-stars*. Gambar ?? menunjukkan arsitektur tingkat tinggi dari jaringan LoRaWAN dan komponen utamanya. Penyebaran LoRaWAN khas terdiri dari elemen fungsional berikut:

1. **End Devices:** Sensor atau aktuator yang mengirim atau menerima pesan nirkabel LoRa-modulated melalui gateway.
2. **Gateways:** Penerima radio multi-saluran yang meneruskan pesan antara end devices dan Network Server.
3. **Network Server:** Perangkat lunak terpusat yang bertanggung jawab atas operasi tingkat jaringan.
4. **Application Servers:** Komponen perangkat lunak yang memproses data spesifik aplikasi secara aman.
5. **Join Server:** Entitas khusus yang menangani aktivasi perangkat aman dan turunan kunci (tidak selalu digambarkan dalam diagram tingkat tinggi).

Hardware Resources



Gambar 3.2 End Device LoRaWAN Heltec stick V3

End devices berkomunikasi dengan semua gateway dalam jangkauan radio. Gateway, pada gilirannya, terhubung ke Network Server melalui tautan backhaul (misalnya, Ethernet, seluler, atau Wi-Fi). Mekanisme akses medium didasarkan pada protokol tipe ALOHA; oleh karena itu, end devices tidak membuat asosiasi persisten dengan gateway tertentu. Pesan uplink dapat diterima oleh beberapa gateway secara bersamaan. Network Server melakukan *deduplikasi pesan* dengan menyimpan hanya satu instance dari setiap pesan unik dan membuang salinan berlebih.

3.3.1 End Devices

End device LoRaWAN biasanya merupakan sensor daya rendah, aktuator, atau kombinasi keduanya, sering kali dioperasikan dengan baterai yang memiliki masa pakai mulai dari beberapa bulan hingga lebih dari satu dekade. Perangkat ini berinteraksi dengan jaringan secara eksklusif melalui komunikasi RF berbasis LoRa. Modalitas penginderaan umum meliputi suhu, kelembaban, gerakan, dan parameter lingkungan. End devices beroperasi di bawah batasan peraturan yang ketat mengenai daya transmisi, duty cycle, dan penggunaan saluran, yang bersifat spesifik wilayah dan diberlakukan oleh spesifikasi parameter regional LoRaWAN. Gambar ?? menunjukkan contoh end device LoRaWAN.

3.3.2 Gateways

Gateway berfungsi sebagai jembatan transparan antara lapisan RF dan jaringan inti berbasis IP. Setiap gateway dikonfigurasi sebelumnya untuk berkomunikasi dengan Network Server yang ditentukan. Setelah menerima frame LoRa-modulated, gateway memberi stempel waktu, mengenkapsulasi dalam protokol standar (misalnya, LoRaWAN Backend Interfaces atau Semtech UDP Packet Forwarder), dan meneruskannya melalui backhaul ke Network Server. Gambar ?? menunjukkan contoh gateway LoRaWAN. Gateway LoRaWAN secara luas diklasifikasikan ke dalam dua kategori:



Gambar 3.3 Gateway LoRaWAN

1. Gateway Indoor (Picocell):

- (a) Dirancang untuk penyebaran di lingkungan indoor residensial, komersial, atau industri.
- (b) Biasanya memiliki antena terintegrasi atau antena eksternal pendek (misalnya, konektor pigtail).
- (c) Hemat biaya dan cocok untuk cakupan di skenario indoor yang dalam seperti ruang bawah tanah atau bangunan bertingkat.
- (d) Meskipun bentuknya kecil, beberapa gateway indoor dapat menerima sinyal dari perangkat yang berjarak beberapa kilometer di bawah kondisi propagasi yang menguntungkan.

2. Gateway Outdoor (Macrocell):

- (a) Dirancang untuk cakupan area luas di lingkungan perkotaan dan pedesaan.
- (b) Sering dipasang pada struktur tinggi seperti menara seluler, atap gedung, atau tiang.
- (c) Dilengkapi antena eksternal gain tinggi (misalnya, antena omnidirectional fiberglass) yang dihubungkan melalui kabel koaksial.
- (d) Menunjukkan sensitivitas penerima yang lebih unggul dibandingkan rekan indoor.
- (e) Dapat mendukung opsi konektivitas tambahan (misalnya, 3G/4G, GPS) untuk sinkronisasi dan redundansi backhaul.
- (f) Dengan kandang lingkungan yang sesuai dan modifikasi antena, gateway indoor tertentu dapat digunakan kembali untuk penggunaan outdoor.

3.3.3 Network Server

Network Server (NS) adalah komponen orkestrasi inti dari infrastruktur LoRaWAN. NS mengelola status jaringan, menegakkan kepatuhan protokol, dan memastikan routing data yang aman dan efisien. Tanggung jawab utama meliputi:

1. Membangun keamanan end-to-end melalui enkripsi AES 128-bit menggunakan kunci sesi (NwkSKey untuk lapisan jaringan, AppSKey untuk lapisan aplikasi).
2. Memvalidasi keaslian end devices dan integritas pesan yang diterima.
3. Melakukan deduplikasi pesan uplink yang diterima dari beberapa gateway.
4. Memilih gateway optimal untuk transmisi downlink berdasarkan kualitas sinyal dan waktu.
5. Menjalankan algoritma Adaptive Data Rate (ADR) untuk secara dinamis menyesuaikan laju data perangkat dan daya transmisi demi efisiensi jaringan.
6. Memverifikasi alamat perangkat (DevAddr) dan mengelola sesi perangkat.
7. Mengakui frame uplink yang dikonfirmasi sesuai dengan persyaratan lapisan MAC.
8. Merutekan payload aplikasi ke Application Server yang sesuai.
9. Meneruskan pesan Join-Request dan Join-Accept antara end devices dan Join Server.
10. Memproses dan merespons semua perintah MAC yang didefinisikan dalam spesifikasi LoRaWAN.

3.3.4 Application Server

Application Server (AS) bertanggung jawab atas penanganan logika lapisan aplikasi. AS menerima payload aplikasi yang didekripsi dari Network Server, menafsirkan data sesuai dengan kebutuhan spesifik domain, dan dapat memprakarsai komunikasi downlink dengan menghasilkan payload aplikasi. Payload ini dikirim kembali ke end device target melalui Network Server. Penyebaran LoRaWAN tunggal dapat meng-host beberapa Application Server, masing-masing melayani kasus penggunaan atau penyewa yang berbeda. Analitik lanjutan, termasuk teknik machine learning dan artificial intelligence, sering diterapkan pada data yang dikumpulkan untuk menghasilkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti dan mendukung pengambilan keputusan.

3.3.5 Join Server

Join Server (JS) adalah komponen kritis keamanan yang diperkenalkan dalam LoRaWAN 1.1 dan juga didukung dalam LoRaWAN 1.0.4 untuk keamanan yang ditingkatkan. Fungsi utamanya adalah:

1. Penyimpanan aman kunci root (misalnya, AppKey dalam LoRaWAN 1.0, atau AppKey dan NwkKey dalam LoRaWAN 1.1).
2. Memproses pesan Join-Request yang diprakarsai oleh end devices selama Over-the-Air Activation (OTAA).
3. Menurunkan kunci sesi (NwkSKey dan AppSKey) setelah otentikasi berhasil.
4. Mendistribusikan NwkSKey ke Network Server dan AppSKey ke Application Server secara aman.

Pemisahan manajemen kunci ini meningkatkan keamanan dengan memastikan bahwa tidak ada entitas tunggal yang memiliki kunci sesi jaringan dan aplikasi, sehingga menegakkan prinsip hak akses minimal (least privilege) dan memungkinkan penyebaran multi-penyewa yang aman.

3.4 Parameter Regional

LoRaWAN beroperasi dalam pita spektrum radio Industrial, Scientific, and Medical (ISM) tanpa lisensi yang tersedia secara global. Mirip dengan Wi-Fi di pita 2,4 GHz dan 5 GHz, LoRaWAN memungkinkan penyebaran tanpa memerlukan lisensi spektrum individu. Namun, karena penggunaan frekuensi yang lebih rendah—biasanya antara 433 MHz dan 928 MHz—transmisi LoRaWAN mencapai jangkauan yang lebih jauh tetapi tunduk pada batasan peraturan yang lebih ketat dan spesifik negara. Untuk mendamaikan interoperabilitas global dengan kepatuhan lokal, LoRa Alliance telah mendefinisikan *Parameter Regional* yang distandardisasi yang menentukan konfigurasi lapisan fisik dan MAC spesifik wilayah. Parameter Regional ini menetapkan dasar teknis umum untuk setiap domain peraturan tetapi tidak mendefinisikan secara lengkap semua detail operasional. Operator jaringan dapat menerapkan saluran atau kebijakan tambahan di luar spesifikasi, yang sering disebut sebagai parameter *Other*. Di beberapa yurisdiksi, beberapa rencana frekuensi diperbolehkan; misalnya, di Belanda, kedua pita EU863–870 dan EU433 diizinkan untuk penggunaan LoRaWAN. Parameter Regional mencakup:

1. Spesifikasi lapisan fisik, termasuk:
 - (a) Rencana frekuensi (saluran)
 - (b) Saluran wajib untuk join jaringan
 - (c) Laju data dan spreading factor yang diizinkan
 - (d) Batas daya transmisi (EIRP)

2. Batasan lapisan MAC, seperti:
 - (a) Ukuran payload maksimum per laju data
 - (b) Waktu dan frekuensi jendela penerimaan
 - (c) Batasan duty cycle dan dwell time (jika berlaku)

Dokumen Parameter Regional resmi (RP002-1.0.4) mendefinisikan tiga belas rencana frekuensi berbeda, masing-masing diberi ID Rencana unik dan nama umum, sebagaimana dirangkum di bawah ini.

3.4.1 Rencana Frekuensi

1. Plan ID 1: EU863–870 (nama umum: EU868)
2. Plan ID 2: US902–928 (nama umum: US915)
3. Plan ID 3: CN779–787 (nama umum: CN779)
4. Plan ID 4: EU433 (nama umum: EU433)
5. Plan ID 5: AU915–928 (nama umum: AU915)
6. Plan ID 6: CN470–510 (nama umum: CN470)
7. Plan ID 7: AS923-1 (nama umum: AS923)
8. Plan ID 8: AS923-2 (nama umum: AS923-2)
9. Plan ID 9: AS923-3 (nama umum: AS923-3)
10. Plan ID 10: KR920–923 (nama umum: KR920)
11. Plan ID 11: IN865–867 (nama umum: IN865)
12. Plan ID 12: RU864–870 (nama umum: RU864)
13. Plan ID 13: AS923-4 (nama umum: AS923-4)

Setiap rencana sesuai dengan satu atau lebih negara, sebagaimana dirinci dalam Tabel Referensi Silang Negara LoRa Alliance. Meskipun pengetahuan komprehensif tentang semua rencana tidak diperlukan, pita EU863–870 dan US902–928 ditekankan dalam konteks sertifikasi karena adopsinya yang luas.

3.4.2 Pengaturan Default untuk Semua Wilayah

Parameter waktu dan operasional tertentu direkomendasikan secara seragam di semua implementasi regional untuk memastikan interoperabilitas dasar. Nilai default ini adalah sebagai berikut:

1. **RECEIVE_DELAY1 (RX1 Delay):** 1 detik
2. **RECEIVE_DELAY2 (RX2 Delay):** 2 detik (didefinisikan sebagai RX1 Delay + 1 detik)
3. **JOIN_ACCEPT_DELAY1:** 5 detik
4. **JOIN_ACCEPT_DELAY2:** 6 detik

Default ini dapat diganti melalui perintah MAC (misalnya, `RXTimingSetupReq`) atau selama provisioning perangkat, tetapi penyimpangan harus dikomunikasikan ke Network Server selama komisioning. Network Server dapat menolak konfigurasi waktu non-standar untuk menjaga integritas jaringan.

3.4.3 Indonesia: Pita AS923-2

Di Indonesia, operasi LoRaWAN diatur di bawah rencana frekuensi **AS923-2**, yang merupakan varian dari spesifikasi regional AS923 yang lebih luas yang didefinisikan dalam dokumen Parameter Regional LoRaWAN RP002-1.0.4. Rencana ini mengakomodasi sub-pita spesifik yang dialokasikan oleh otoritas peraturan Indonesia, yaitu pita ISM **920–923 MHz**. Kerangka kerja regional AS923 menggunakan mekanisme offset frekuensi untuk mendukung beberapa implementasi nasional menggunakan spesifikasi dasar yang sama. Untuk Indonesia, rencana ini ditetapkan sebagai **AS923-2**, sesuai dengan offset frekuensi:

1. **AS923_FREQ_OFFSET** = 0xFFFFB9B0 (bilangan bulat bertanda 32-bit)
2. **AS923_FREQ_OFFSET_HZ** = −1.80 MHz

Offset ini menggeser saluran default nominal AS923 dari 923.2/923.4 MHz ke **921.4 MHz** dan **921.6 MHz**, yang merupakan saluran default wajib untuk semua end-device AS923-2 di Indonesia.

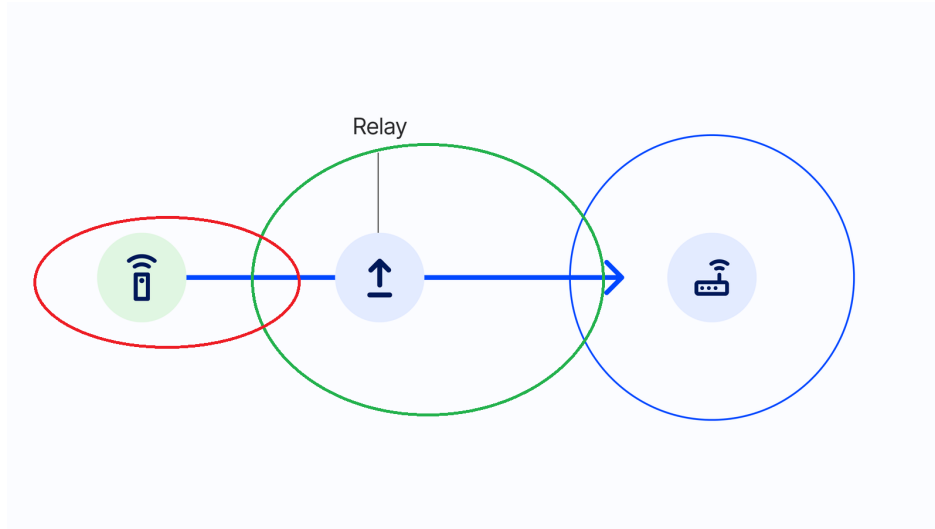
1. **Saluran Default dan Join:** Setiap end-device harus mengimplementasikan dua saluran default berikut untuk operasi normal dan transmisi Join-Request:
2. Uplink/Downlink: 921.4 MHz (DR2–DR5)
3. Uplink/Downlink: 921.6 MHz (DR2–DR5) Saluran ini menggunakan modulasi LoRa dengan bandwidth 125 kHz. Laju data Join-Request dibatasi pada DR2–DR5 (SF10–SF7) untuk memastikan kompatibilitas dengan batasan dwell time 400 ms yang diberlakukan di banyak yurisdiksi AS923 hingga dikonfigurasi ulang oleh jaringan.

4. **Pengkodean Laju Data dan TXPower:** Laju data yang didukung adalah:
5. DR0–DR5 (minimum untuk sertifikasi)
6. DR0–DR7 (dukungan opsional penuh, termasuk DR6: LoRa SF7/250 kHz dan DR7: FSK 50 kbps) EIRP maksimum adalah **+16 dBm**. Level TXPower didefinisikan relatif terhadap maksimum ini dalam langkah 2 dB (TXPower 0 = +16 dBm, TXPower 1 = +14 dBm, dll.).
7. **Dwell Time dan Kepatuhan Peraturan:** Perangkat AS923-2 di Indonesia harus mendukung perintah MAC `TxParamSetupReq` untuk menerima konfigurasi dwell time dari Network Server. Secara default, perangkat mengasumsikan `UplinkDwellTime` = 1 (batas 400 ms) hingga dikonfigurasi ulang secara eksplisit. Dwell time downlink selalu diatur ke 0 (tanpa batasan).
8. **Jendela Penerimaan:**
9. RX1 menggunakan saluran yang sama dengan uplink. Laju data downlink ditentukan oleh DR uplink dan `RX1DROffset` (0–7).
10. RX2 menggunakan frekuensi tetap **921.4 MHz** (yaitu, 923.2 MHz + `AS923_FREQ_OFFSET_HZ`) dengan DR2 (SF10, 125 kHz).
11. **Fleksibilitas Rencana Saluran:** Meskipun hanya dua saluran default yang diwajibkan, end-device harus mendukung struktur data saluran untuk setidaknya 24 saluran. Saluran tambahan dapat dikonfigurasi melalui `CFList` dalam pesan Join-Accept atau melalui perintah MAC (misalnya, `NewChannelReq`, `LinkADRReq`).
12. **Listen-Before-Talk (LBT):** Meskipun tidak secara eksplisit diwajibkan untuk Indonesia dalam RP002-1.0.4, perangkat AS923 yang beroperasi di wilayah dengan persyaratan LBT (misalnya, Jepang) harus mematuhi ARIB STD-T108. Produsen perangkat yang menargetkan Indonesia harus memverifikasi peraturan lokal saat ini, karena kebijakan manajemen spektrum dapat berkembang.

Secara ringkas, penyebaran LoRaWAN di Indonesia harus mematuhi profil AS923-2, yang memastikan kepatuhan peraturan sekaligus mempertahankan interoperabilitas dalam ekosistem AS923 yang lebih luas. Operator jaringan dan vendor perangkat harus mengonfigurasi offset frekuensi dan parameter dwell time secara tepat selama komisioning untuk menjamin operasi yang benar.

3.5 Relay LoRaWAN

Relay LoRaWAN menyediakan solusi hemat biaya untuk memperluas cakupan jaringan dalam skenario di mana komunikasi langsung antara end devices dan gateway terganggu karena jarak yang berlebihan, hambatan fisik, atau redaman sinyal. Relay beroperasi sebagai perantara berdaya rendah dan berbiaya rendah yang meneruskan pesan antara end devices dan infrastruktur LoRaWAN. Dari perspektif Network Server, relay secara fungsional tidak dapat dibedakan dari end device standar. Gambar ?? menggambarkan arsitektur sistem relay LoRaWAN.



Gambar 3.4 Arsitektur Relay LoRaWAN

3.5.1 Strategi Penempatan Relay

Penyebaran relay secara ekonomis dibenarkan ketika hanya sejumlah kecil end devices yang mengalami masalah konektivitas. Sebaliknya, jika kekurangan cakupan memengaruhi sebagian besar jaringan, pemasangan gateway tambahan biasanya lebih tepat.

3.5.2 Persyaratan Relay

Persyaratan fungsional dan teknis untuk relay LoRaWAN secara formal didefinisikan dalam *Spesifikasi Relay LoRaWAN[®]* (TS011-1.0.0). Prasyarat implementasi utama meliputi:

1. End device harus mengimplementasikan:
 - (a) Spesifikasi Lapisan MAC LoRaWAN (TS001) versi 1.0.4.
 - (b) Spesifikasi Parameter Regional RP2-1.0.3.
 - (c) Firmware LoRa Basics Modem (rilis eksperimental tersedia dari Semtech).
2. Perangkat keras end device harus menggabungkan salah satu transceiver LoRa sub-GHz berikut:
 - (a) SX1261/2
 - (b) LR1110
 - (c) LR1120
 - (d) LR1121
3. LoRaWAN Network Server (misalnya, The Things Stack) harus mendukung spesifikasi relay.

4. Gateway tidak memerlukan modifikasi atau pembaruan firmware untuk mendukung fungsionalitas relay.

3.5.3 Operasi Relay

Komunikasi antara end device dan Network Server melalui relay mengikuti urutan terstruktur:

1. Sebelum komunikasi, end device dan relay dikonfigurasi sebelumnya dengan parameter saluran bersama (frekuensi, laju data) untuk tautan langsung mereka.
2. Untuk memulai komunikasi, end device mengirimkan frame *Wake-on-Radio* (WOR). Frame ini memiliki dua tujuan:
 - (a) Membangunkan relay dari mode tidur.
 - (b) Menyampaikan parameter radio (frekuensi dan laju data) untuk transmisi uplink berikutnya.
3. Dua jenis frame WOR didefinisikan, dapat dibedakan berdasarkan konten payload:
 - (a) Relay Join-Request
 - (b) Relay Uplink (uplink Kelas A)
4. Relay beroperasi dalam keadaan tidur berdaya rendah dan secara berkala melakukan *Channel Activity Detection* (CAD) untuk memantau frame WOR masuk. Parameter waktu utama meliputi:
 - (a) Durasi CAD: 25 ms hingga 1 s (tergantung konfigurasi default).
 - (b) Periodisitas CAD: interval antara operasi CAD berturut-turut.
 - (c) Panjang preamble WOR: hingga 1 s, memastikan probabilitas deteksi tinggi selama jendela CAD singkat.
5. Setelah mendeteksi aktivitas LoRa selama CAD, relay beralih ke mode penerima setelah penundaan *CadToRx*. Jika frame WOR yang didemodulasi valid, relay merespons dengan frame *WOR-ACK* yang berisi:
 - (a) *CadToRx*: penundaan dari deteksi CAD ke kesiapan penerimaan.
 - (b) *Forward*: status kemampuan penerusan relay.
 - (c) *RelayDataRate*: laju data untuk penerusan upstream ke Network Server.
 - (d) *XTALAccuracy*: akurasi osilator kristal relay.
 - (e) *CADPeriodicity*: interval antara pemindaian CAD.
 - (f) *TOffset*: waktu antara awal CAD dan akhir penerimaan preamble WOR.

6. End device menggunakan parameter WOR-ACK untuk menyinkronkan transmisi berikutnya dengan relay.
7. End device kemudian mengirimkan frame uplink LoRaWAN-nya. Relay menerima frame ini, menambahkan header metadata 6-byte, dan mengenkapsulasi hasilnya sebagai *Relay Uplink FRMPayload*. Payload ini dikirim ke Network Server menggunakan FPort 226.
8. Pesan downlink dari Network Server (FPort 226) diterima oleh relay di jendela RX1 atau RX2. Relay mengekstrak payload asli dan meneruskannya ke end device selama jendela *Relay Receive* (RXR) yang didedikasikan.

3.5.4 Parameter Regional untuk Relay

Parameter lapisan fisik khusus relay didefinisikan per pita regional. Contohnya meliputi:

1. **EU868 (EU863–870 MHz):**
 - (a) Saluran WOR (end device → relay):
 - i. Saluran 0: 856.1 MHz
 - ii. Saluran 1: 865.5 MHz
 - (b) Saluran WOR-ACK (relay → end device):
 - i. Saluran 0: 865.3 MHz
 - ii. Saluran 1: 865.9 MHz
 - (c) Bandwidth: 125 kHz
 - (d) Spreading Factor: SF9
2. **US915 (US902–928 MHz):**
 - (a) Saluran WOR (end device → relay):
 - i. Saluran 0: 916.7 MHz
 - ii. Saluran 1: 919.9 MHz
 - (b) Saluran WOR-ACK (relay → end device):
 - i. Saluran 0: 918.3 MHz
 - ii. Saluran 1: 918.3 MHz
 - (c) Bandwidth: 500 kHz
 - (d) Spreading Factor: SF10
3. Untuk wilayah lain (AU915, CN470, AS923, KR920, IN865, RU864), frekuensi saluran relay, bandwidth, dan spreading factor ditentukan dalam dokumen Parameter Regional LoRaWAN RP002-1.0.4.

3.5.5 Model Keamanan

Komunikasi relay menggunakan kerangka kerja keamanan khusus untuk memastikan integritas dan kerahasiaan frame WOR dan WOR-ACK:

1. Kunci sesi standar (**AppSKey**, **NwkSKey**) tidak cukup untuk mengamankan frame kontrol relay.
2. Kunci root baru, *Root Relay Session Key* (**RootWorSKey**), diturunkan oleh end device:
 - (a) Dari **NwkSKey** dalam LoRaWAN 1.0.x.
 - (b) Dari **NwkSEncKey** dalam LoRaWAN 1.1.x dan seterusnya.
3. Network Server menyediakan **RootWorSKey** yang sama ke relay selama komisioning.
4. End device dan relay secara independen menurunkan dua kunci sesi dari **RootWorSKey** dan **DevAddr**:
 - (a) **WorSIntKey**: digunakan untuk menghitung dan memverifikasi Message Integrity Code (MIC) frame WOR dan WOR-ACK.
 - (b) **WorSEncKey**: digunakan untuk mengenkripsi dan mendekripsi payload frame WOR dan WOR-ACK.

3.6 Jenis Pesan

LoRaWAN mendefinisikan serangkaian jenis pesan terstruktur untuk memfasilitasi komunikasi aman dan efisien antara end devices, gateway, dan entitas jaringan. Pesan-pesan ini mengangkut perintah Medium Access Control (MAC) dan data lapisan aplikasi. Memahami klasifikasi pesan, struktur, enkripsi, dan mekanisme integritas sangat penting untuk interoperabilitas dan kepatuhan keamanan, terutama dalam versi LoRaWAN 1.0.x dan 1.1.

3.6.1 Pesan Uplink dan Downlink

Pesan dalam LoRaWAN dikategorikan berdasarkan arah transmisinya:

1. **Pesan uplink**: Berasal dari end devices dan diteruskan ke Network Server melalui satu atau lebih gateway. Bergantung pada tujuannya, Network Server meneruskan pesan ini ke Application Server atau Join Server.
2. **Pesan downlink**: Dikirim oleh Network Server ke end device tertentu dan dikirim melalui gateway yang dipilih. Pesan ini dapat berasal dari Network Server itu sendiri, Application Server, atau Join Server.

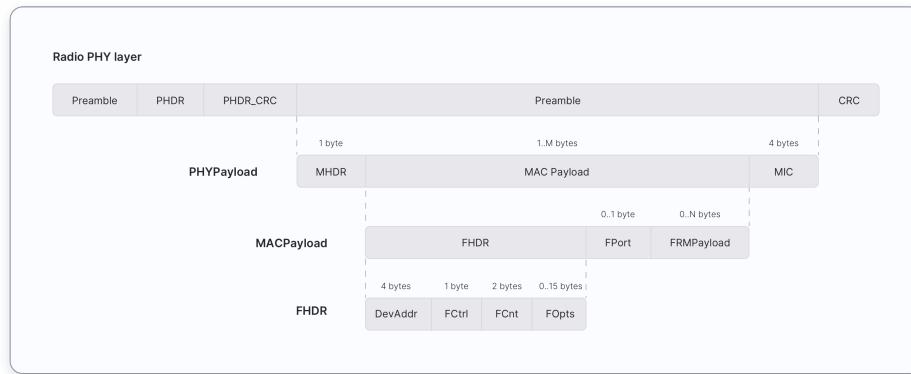
3.6.2 Jenis Pesan MAC

LoRaWAN menentukan jenis pesan MAC yang berbeda untuk kontrol jaringan dan transportasi data. Enumerasi berikut menguraikan jenis pesan yang didukung dalam LoRaWAN 1.0.x dan 1.1:

1. **Join-request:** Pesan uplink yang digunakan selama Over-the-Air Activation (OTAA) untuk memulai sesi.
2. **Join-accept:** Respons downlink terhadap Join-request, menyediakan parameter sesi.
3. **Unconfirmed Data Up:** Frame data uplink yang tidak memerlukan acknowledgment.
4. **Unconfirmed Data Down:** Frame data downlink yang tidak memerlukan acknowledgment.
5. **Confirmed Data Up:** Frame data uplink yang memerlukan acknowledgment dari penerima.
6. **Confirmed Data Down:** Frame data downlink yang memerlukan acknowledgment dari end device.
7. **Rejoin-request** (hanya LoRaWAN 1.1): Pesan uplink yang digunakan untuk membuat ulang konteks sesi tanpa reaktivasi penuh; mendukung tiga subtype (0, 1, 2).
8. **Proprietary:** Dicadangkan untuk ekstensi khusus vendor.
9. **RFU** (LoRaWAN 1.0.x): Dicadangkan untuk penggunaan di masa depan; digunakan kembali sebagai Rejoin-request dalam 1.1.

3.6.3 Pesan Join-Request, Rejoin-Request, dan Join-Accept

1. **Join-request:**
 - (a) Diprakarsai oleh end device.
 - (b) Dalam LoRaWAN 1.0.4 dan sebelumnya, diteruskan oleh Network Server ke Application Server.
 - (c) Dalam LoRaWAN 1.1 dan 1.0.4+, diteruskan ke Join Server.
 - (d) Dikirim tanpa enkripsi.
2. **Join-accept:**
 - (a) Dihasilkan oleh Join Server (1.1 dan 1.0.4+) atau Application Server (sebelum 1.0.4).
 - (b) Dirutekan ke end device melalui Network Server.



Gambar 3.5 Struktur Pesan Data LoRaWAN

- (c) Kunci enkripsi tergantung pada versi LoRaWAN dan pesan pemicu:
 - i. LoRaWAN 1.0: dienkripsi dengan **AppKey**.
 - ii. LoRaWAN 1.1:
 - iii. Dipicu oleh Join-request: dienkripsi dengan **NwkKey**.
 - iv. Dipicu oleh Rejoin-request (Tipe 0, 1, 2): dienkripsi dengan **JSEncKey**.

3. Rejoin-request (hanya LoRaWAN 1.1):

- (a) Diprakarsai oleh end device untuk menyegarkan kunci sesi atau bergabung kembali setelah roaming.
- (b) Tiga tipe didefinisikan (0, 1, 2), berbeda dalam cakupan pengenalan (NetID vs. JoinEUI).
- (c) Selalu direspons dengan pesan Join-accept.

3.6.4 Pesan Data

Pesan data mengangkut payload aplikasi dan/atau perintah MAC. Empat tipe ada, konsisten di seluruh LoRaWAN 1.0.x dan 1.1: Gambar ?? menggambarkan struktur pesan data LoRaWAN.

1. Unconfirmed Data Up
2. Unconfirmed Data Down
3. Confirmed Data Up
4. Confirmed Data Down

Pesan data terdiri dari payload MAC yang disusun sebagai berikut:

1. **Frame Header (FHDR)**: 7–22 byte, berisi:
 - (a) **DevAddr** (4 byte)

- (b) **FCtrl** (1 byte)
 - (c) **FCnt** (2 byte)
 - (d) **FOpts** (0–15 byte)
2. **FPort** (0–1 byte, opsional): Menunjukkan konten FRMPayload.
 3. **FRMPayload** (0–N byte, opsional): Mengangkut perintah MAC atau data aplikasi.

Panjang payload MAC maksimum tergantung pada wilayah dan laju data, sebagaimana didefinisikan dalam spesifikasi Parameter Regional.

3.6.5 Mengirim Perintah MAC dan Data Spesifik Aplikasi

Perintah MAC dan data aplikasi saling eksklusif dalam field FRMPayload tetapi dapat berdampingan dalam pesan jika perintah MAC ditempatkan di FOpts dan data aplikasi di FRMPayload.

1. Perintah MAC di FOpts:

- (a) Panjang total tidak boleh melebihi 15 byte.
- (b) Dalam LoRaWAN 1.0.x: dikirim tanpa enkripsi.
- (c) Dalam LoRaWAN 1.1: dienkripsi menggunakan **NwkSEncKey**.

2. Perintah MAC atau data aplikasi di FRMPayload:

- (a) Memerlukan keberadaan field FPort.
- (b) Interpretasi FPort:
 - i. **FPort** = 0: FRMPayload hanya berisi perintah MAC.
 - ii. **FPort** = 1–223: FRMPayload berisi data aplikasi.
 - iii. **FPort** = 224: Dicapangkan untuk protokol uji lapisan MAC LoRaWAN.
 - iv. **FPort** = 255: Dicapangkan untuk Penggunaan Mendatang (RFU).
- (c) Enkripsi FRMPayload:
 - i. Perintah MAC (**FPort** = 0):
 - ii. LoRaWAN 1.0.x: dienkripsi dengan **NwkSKey**.
 - iii. LoRaWAN 1.1: dienkripsi dengan **NwkSEncKey**.
 - iv. Data aplikasi (**FPort** = 1–223): dienkripsi dengan **AppSKey** di kedua versi.

3.6.6 Perhitungan Message Integrity Code (MIC)

MIC memastikan keaslian dan integritas pesan. MIC dihitung berdasarkan field tertentu dan ditambahkan ke pesan. Field dan kunci yang digunakan tergantung pada versi LoRaWAN dan jenis pesan.

1. Field yang digunakan dalam perhitungan MIC:

- (a) LoRaWAN 1.0.x:
 - i. Join-request: MHDR | AppEUI | DevEUI | DevNonce
 - ii. Join-accept: MHDR | AppNonce | NetID | DevAddr | DLSettings | RxDelay | CFList
 - iii. Pesan data (up/down): MHDR | FHDR | FPort | FRMPayload
- (b) LoRaWAN 1.1:
 - i. Join-request: MHDR | JoinEUI | DevEUI | DevNonce
 - ii. Join-accept: MHDR | JoinNonce | NetID | DevAddr | DLSettings | RxDelay | CFList
 - iii. Rejoin-request Tipe 0/2: MHDR | Rejoin Type | NetID | DevEUI | RJcount0
 - iv. Rejoin-request Tipe 1: MHDR | Rejoin Type | JoinEUI | DevEUI | RJcount1
 - v. Pesan data (up/down): MHDR | FHDR | FPort | FRMPayload

2. Kunci yang digunakan untuk perhitungan MIC:

- (a) LoRaWAN 1.0.x:
 - i. Join-request: AppKey
 - ii. Join-accept: AppKey
 - iii. Data uplink: NwkSKey
 - iv. Data downlink: NwkSKey
- (b) LoRaWAN 1.1:
 - i. Join-request: NwkKey
 - ii. Join-accept: JSIntKey
 - iii. Rejoin-request Tipe 0/2: SNwkSIntKey
 - iv. Rejoin-request Tipe 1: JSIntKey
 - v. Data uplink: FNwkSIntKey (untuk verifikasi MIC) dan SNwkSIntKey (untuk pembuatan dalam beberapa konteks)
 - vi. Data downlink: SNwkSIntKey
- (c) Perangkat LoRaWAN 1.1 yang beroperasi dengan Network Server 1.0.x:
 - i. Join-request: NwkKey
 - ii. Join-accept: NwkKey
 - iii. Data uplink: FNwkSIntKey
 - iv. Data downlink: FNwkSIntKey

3.7 Keamanan

LoRaWAN menggunakan kerangka kerja keamanan yang kuat berdasarkan kriptografi simetris untuk memastikan kerahasiaan, integritas, dan keaslian komunikasi. Model keamanan dibangun di atas serangkaian kunci 128-bit dan menggunakan Advanced Encryption Standard (AES-128), konsisten dengan praktik kriptografi dalam standar seperti IEEE 802.15.4.

3.7.1 Kunci Keamanan

Spesifikasi LoRaWAN 1.0 mendefinisikan tiga kunci kriptografi utama, masing-masing 128 bit:

1. **AppKey** (Application Key): Kunci root yang digunakan secara eksklusif selama prosedur Over-the-Air Activation (OTAA) untuk menurunkan kunci sesi. Kunci ini hanya dibagikan antara end-device dan Join Server (atau Application Server dalam penyebaran pra-1.1).
2. **NwkSKey** (Network Session Key): Kunci sesi yang digunakan untuk mengamankan komunikasi antara end-device dan Network Server.
3. **AppSKey** (Application Session Key): Kunci sesi yang digunakan untuk enkripsi end-to-end payload lapisan aplikasi antara end-device dan Application Server.

3.7.2 Kunci Sesi

Setelah aktivasi jaringan berhasil—baik melalui OTAA atau Activation-by-Personalization (ABP) yang telah ditentukan sebelumnya—dua kunci sesi ditetapkan:

1. **Network Session Key (NwkSKey)** digunakan untuk:
 - (a) Menghitung dan memverifikasi Message Integrity Code (MIC) semua pesan MAC dan data menggunakan AES-CMAC.
 - (b) Memastikan keaslian pesan dan mencegah perusakan.
 - (c) Membantu Network Server dalam memetakan alamat perangkat non-unik (DevAddr) ke pengenalan unik global DevEUI dan AppEUI.
2. **Application Session Key (AppSKey)** digunakan untuk:
 - (a) Mengenkripsi dan mendekripsi payload aplikasi (FRMPayload) pesan uplink dan downlink.
 - (b) Memberikan kerahasiaan end-to-end antara end-device dan Application Server.

- (c) Memastikan bahwa entitas jaringan perantara (misalnya, gateway, Network Server) tidak dapat mengakses data aplikasi.

Kunci sesi ini unik per perangkat dan per sesi. Dalam OTAA, kunci dibuat ulang pada setiap permintaan join. Dalam ABP, kunci tetap statis kecuali diperbarui secara manual.

3.7.3 Application Key

Application Key (AppKey) berfungsi sebagai rahasia root untuk perangkat OTAA:

1. Tidak pernah dikirim melalui udara.
2. Digunakan selama prosedur join untuk menurunkan **NwkSKey** dan **AppSKey** melalui fungsi turunan kunci yang ditentukan dalam spesifikasi lapisan MAC LoRaWAN.
3. Dalam penyebaran jaringan seperti The Things Network, **AppKey** default dapat dikonfigurasi per aplikasi, atau kunci individual dapat ditetapkan per perangkat untuk keamanan yang ditingkatkan.

3.7.4 Penghitung Frame

Untuk mengurangi serangan replay—di mana penyerang menangkap dan mengirim ulang pesan yang valid—LoRaWAN menggunakan penghitung uplink dan downlink:

1. **FCntUp**: Dinaikkan oleh end-device untuk setiap transmisi uplink.
2. **FCntDown**: Dinaikkan oleh Network Server untuk setiap transmisi downlink.
3. Kedua penghitung diinisialisasi ke nol setelah pembentukan sesi.
4. Penerima (perangkat atau server) membuang pesan apa pun dengan penghitung frame kurang dari atau sama dengan nilai penghitung yang diterima terakhir kali.
5. Mekanisme ini memastikan bahwa setiap pesan diproses hanya sekali, bahkan jika dicegat dan dikirim ulang.

Untuk perangkat ABP, penghitung frame biasanya diatur ulang ke nol pada setiap siklus daya atau pembaruan firmware. Akibatnya, Network Server akan menolak pesan berikutnya hingga penghitung melebihi nilai yang dicatat sebelumnya. Untuk menghindari hal ini selama pengembangan, disarankan untuk mendaftarkan ulang perangkat ABP di server jaringan setelah setiap reset atau menyimpan penghitung frame dalam memori non-volatil.

3.7.5 Spread Spectrum dan Pertimbangan Keamanan

LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS), bentuk spread spectrum urutan langsung (DSSS). Meskipun teknik spread spectrum secara historis memberikan probabilitas intersepsi rendah (LPI) dalam komunikasi militer, penggunaan CSS oleh LoRa terutama dimotivasi oleh:

1. Ketahanan terhadap fading multipath dan pergeseran Doppler.
2. Anggaran link tinggi dan kemampuan jangkauan jauh.
3. Koeksistensi di lingkungan spektral padat melalui keuntungan pemrosesan (processing gain).

Perlu ditekankan bahwa CSS dalam LoRaWAN *tidak* merupakan mekanisme keamanan kriptografi. Kerahasiaan dan integritas pesan semata-mata dijamin oleh kerangka kerja berbasis AES yang dijelaskan di atas, bukan oleh modulasi lapisan fisik. Oleh karena itu, ketergantungan pada spread spectrum untuk keamanan terhadap penyadapan tidak dapat dibenarkan; perlindungan kriptografi tetap penting.

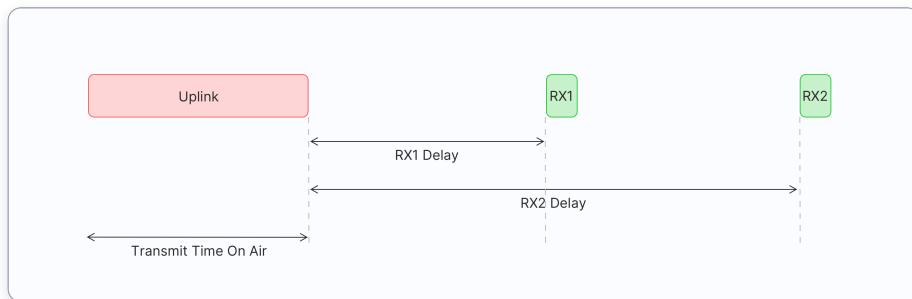
3.8 Kelas Perangkat

Spesifikasi LoRaWAN mendefinisikan tiga kelas perangkat—Kelas A, Kelas B, dan Kelas C—untuk mengakomodasi berbagai kebutuhan aplikasi dalam hal konsumsi daya, latensi, dan pola komunikasi. Semua end-device LoRaWAN diwajibkan untuk mengimplementasikan fungsionalitas Kelas A. Kelas B dan Kelas C adalah ekstensi opsional yang dibangun di atas Kelas A. Semua kelas mendukung komunikasi dua arah (uplink dan downlink). Selama Pembaruan Firmware Over-The-Air (FUOTA), perangkat harus beroperasi dalam Kelas B atau Kelas C untuk memungkinkan pengiriman payload firmware besar secara tepat waktu. Penting untuk dicatat bahwa end-device tidak dapat mengirim pesan uplink saat menerima pesan downlink karena batasan radio half-duplex.

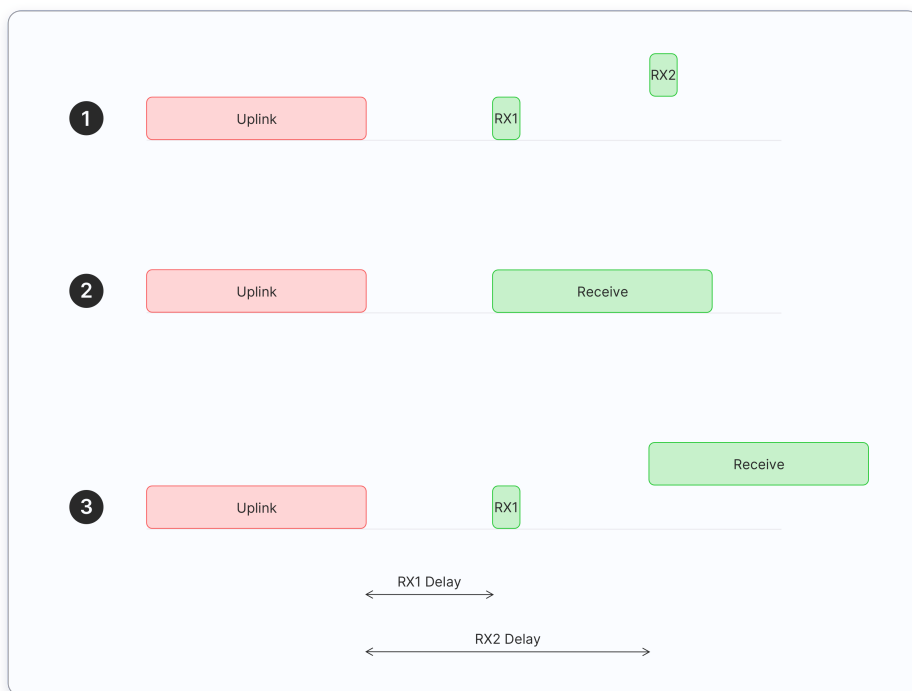
3.8.1 Kelas A

Kelas A adalah kelas perangkat dasar dan wajib dalam LoRaWAN. Desainnya memprioritaskan konsumsi daya ultra-rendah, menjadikannya cocok untuk aplikasi berbaterai dengan kebutuhan komunikasi tidak sering. Gambar ?? dan ?? menggambarkan waktu transmisi uplink dan downlink dalam perangkat Kelas A.

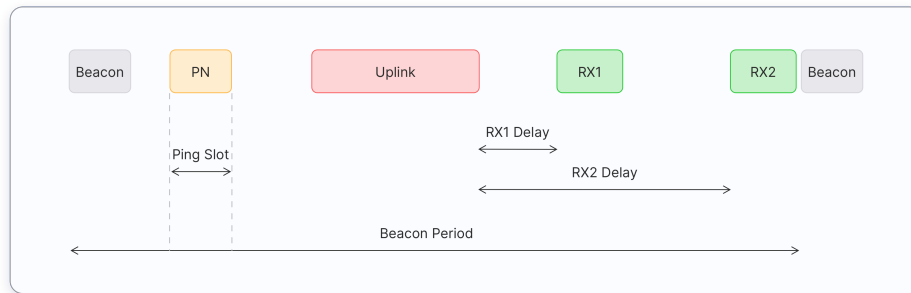
1. End-device dapat memulai transmisi uplink kapan saja.
2. Setelah menyelesaikan transmisi uplink, perangkat membuka dua jendela penerimaan berurutan:
 - (a) **RX1**: Dibuka setelah penundaan tetap (**RECEIVE_DELAY1**, biasanya 1 detik).



Gambar 3.6 Operasi LoRaWAN Kelas A



Gambar 3.7 Operasi Alternatif LoRaWAN Kelas A



Gambar 3.8 Operasi LoRaWAN Kelas B

- (b) **RX2**: Dibuka setelah penundaan tetap kedua (`RECEIVE_DELAY2`, biasanya 2 detik), yaitu 1 detik setelah RX1.
3. Network Server dapat menjadwalkan downlink di RX1 atau RX2, tetapi tidak keduanya.
 4. Jika tidak ada downlink yang diterima di kedua jendela, kesempatan berikutnya untuk downlink hanya terjadi setelah perangkat mengirim uplink berikutnya.
 5. RX2 menggunakan frekuensi dan laju data tetap yang dikonfigurasi per parameter regional, sedangkan RX1 menggunakan saluran yang sama dengan uplink dan laju data yang diimbangi oleh `RX1DROffset`.

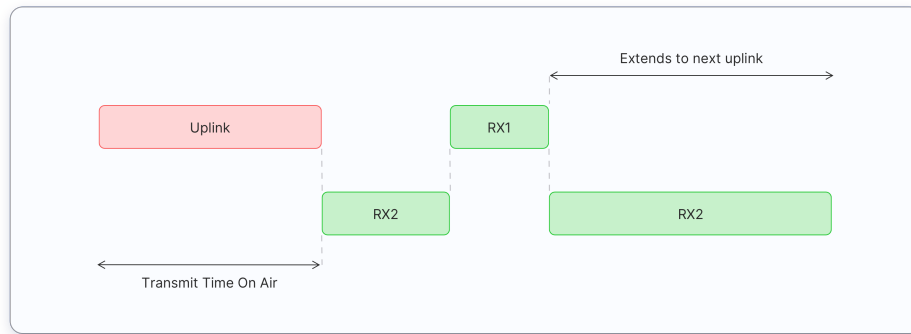
Perangkat Kelas A menunjukkan latensi downlink tinggi tetapi mencapai efisiensi energi luar biasa dengan tetap dalam mode tidur antar transmisi. Aplikasi khas meliputi:

1. Pemantauan lingkungan (misalnya, suhu, kelembaban, kualitas udara)
2. Pelacakan hewan dan aset
3. Deteksi kebakaran hutan dan kebocoran air
4. Sistem parkir pintar dan manajemen limbah

3.8.2 Kelas B

Kelas B memperluas Kelas A dengan memperkenalkan slot penerimaan terjadwal—dikenal sebagai *ping slots*—untuk mengurangi latensi downlink sambil mempertahankan efisiensi daya yang wajar. Gambar ?? menggambarkan waktu transmisi uplink dan downlink dalam perangkat Kelas B.

1. Gateway secara berkala menyiarkan *beacon* yang disinkronkan (setiap 128 detik secara default), yang memberikan referensi waktu umum.
2. End-device menggunakan beacon ini untuk menyelaraskan jam internalnya dengan waktu jaringan.



Gambar 3.9 Operasi LoRaWAN Kelas C

3. Berdasarkan sinkronisasi ini, Network Server dapat menjadwalkan downlink selama ping slots yang telah ditentukan untuk perangkat individual atau grup multicast.
4. Setelah setiap uplink, perangkat masih membuka jendela RX1 dan RX2 seperti pada Kelas A.
5. Ping slots terjadi pada interval reguler yang ditentukan oleh PING_SLOT_PERIODICITY (default: $2^7 = 128$ detik).

Kelas B menawarkan latensi downlink sedang dan cocok untuk aplikasi yang memerlukan aktuasi sesekali atau interaksi downlink lebih sering daripada yang diizinkan Kelas A. Konsumsi daya lebih tinggi daripada Kelas A karena penerimaan beacon berkala dan pendengaran ping slot, tetapi banyak perangkat Kelas B tetap beroperasi dengan baterai dengan masa pakai yang dapat diterima. Kasus penggunaan khas meliputi:

1. Meteran utilitas (listrik, air, gas)
2. Sistem pencahayaan jalan pintar

Perangkat Kelas B dapat kembali ke operasi Kelas A ketika fungsionalitas ping slot tidak diperlukan.

3.8.3 Kelas C

Kelas C memberikan latensi downlink serendah mungkin dengan menjaga penerima hampir selalu aktif, dengan mengorbankan konsumsi daya yang jauh lebih tinggi. Gambar ?? menggambarkan waktu transmisi uplink dan downlink dalam perangkat Kelas C.

1. Setelah transmisi uplink, perangkat membuka RX1 dan RX2 seperti pada Kelas A.

2. Setelah RX2, perangkat menjaga jendela penerimaan RX2 *terus terbuka* hingga transmisi uplink berikutnya dimulai.
3. Ini memungkinkan Network Server mengirim pesan downlink kapan saja, hanya tunduk pada batasan duty cycle peraturan.
4. Transmisi uplink hanya dimungkinkan ketika tidak ada downlink yang sedang berlangsung.

Karena aktivitas radio yang hampir terus-menerus, perangkat Kelas C umumnya tidak cocok untuk operasi baterai jangka panjang dan biasanya menggunakan daya listrik. Aplikasi umum meliputi:

1. Meteran utilitas yang memerlukan kontrol real-time
2. Lampu jalan dengan peredupan dinamis atau perintah hidup/mati
3. Lampu suar dan sistem alarm yang memerlukan respons segera

Perangkat Kelas C dapat beroperasi dalam mode Kelas A selama periode aktivitas rendah untuk menghemat energi, meskipun ini memerlukan peralihan mode eksplisit melalui perintah MAC atau logika aplikasi.

3.9 Aktivasi End Device

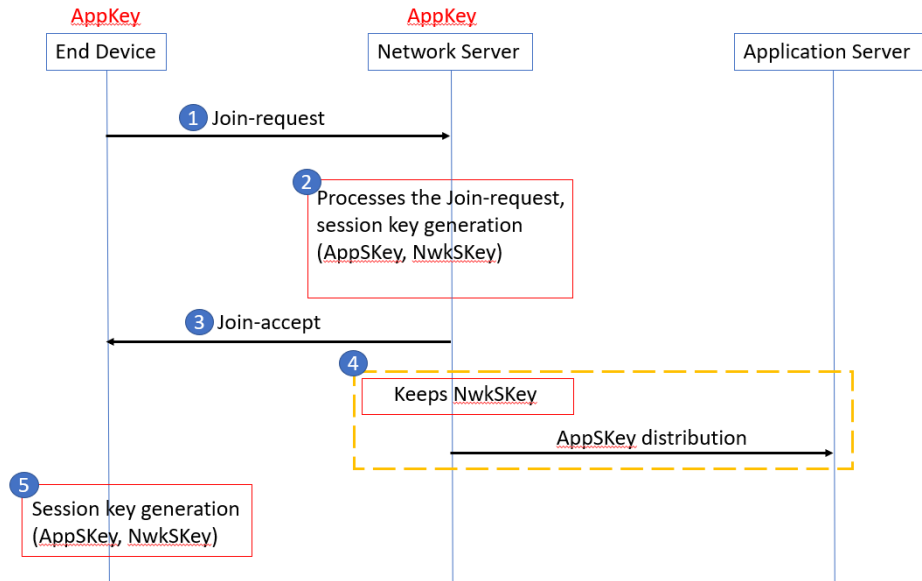
Sebelum berpartisipasi dalam jaringan LoRaWAN, setiap end device harus menjalani prosedur aktivasi untuk menetapkan kredensial kriptografi dan mendapatkan alamat jaringan. Dua metode aktivasi berbeda didefinisikan dalam spesifikasi LoRaWAN: Over-the-Air Activation (OTAA) dan Activation by Personalization (ABP). OTAA adalah pendekatan yang direkomendasikan dan lebih aman, memungkinkan turunan kunci dinamis dan roaming jaringan, sedangkan ABP melibatkan pra-konfigurasi kunci dan alamat statis, membatasi fleksibilitas dan keamanan.

3.9.1 Over-the-Air Activation dalam LoRaWAN 1.0.x

Dalam LoRaWAN 1.0.x, OTAA dicapai melalui jabat tangan dua pesan antara end device dan Network Server, difasilitasi oleh kunci root bersama. Prosedurnya adalah sebagai berikut: Gambar ?? menggambarkan proses OTAA dalam LoRaWAN 1.0.x.

1. **Prasyarat:** End device harus disediakan dengan parameter non-volatil berikut:
 - (a) AppEUI: Pengenal IEEE EUI-64 64-bit dari server aplikasi.
 - (b) DevEUI: Pengenal unik IEEE EUI-64 64-bit dari end device.
 - (c) AppKey: Kunci root rahasia AES 128-bit, dibagikan dengan Network Server.

AppKey tidak pernah dikirim melalui udara.



Gambar 3.10 Prosedur Over-the-Air Activation (OTAA) LoRaWAN 1.0.x

2. **Transmisi Join-request:** End device memulai prosedur join dengan mengirimkan pesan **Join-request** yang berisi:

- (a) AppEUI (8 byte)
- (b) DevEUI (8 byte)
- (c) DevNonce (2 byte): nonce acak atau meningkat secara monoton untuk mencegah serangan replay.

Message Integrity Code (MIC) dihitung berdasarkan field ini menggunakan **AppKey** dalam AES-CMAC. Pesan dikirim tanpa enkripsi pada salah satu saluran join spesifik wilayah (misalnya, 868.10/868.30/868.50 MHz dalam EU868).

3. **Pembuatan Join-accept:** Setelah validasi berhasil, Network Server menghasilkan:

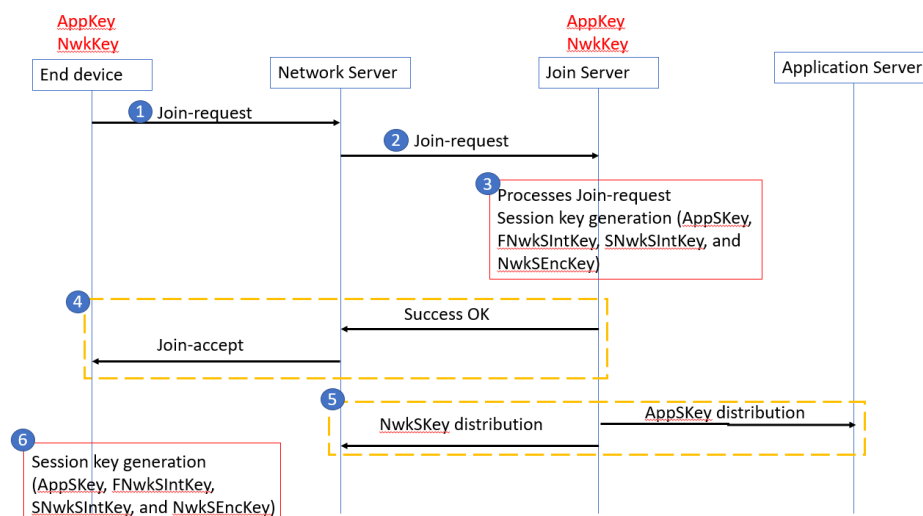
- (a) DevAddr dinamis 32-bit.
- (b) Dua kunci sesi 128-bit: **NwkSKey** (untuk integritas lapisan jaringan dan enkripsi perintah MAC) dan **AppSKey** (untuk enkripsi payload aplikasi).
- (c) Pesan **Join-accept** yang terdiri dari:
- (d) AppNonce (3 byte): nonce yang disediakan server.
- (e) NetID (3 byte): pengenalan jaringan.
- (f) DevAddr (4 byte)
- (g) DLSettings (1 byte): konfigurasi downlink.
- (h) RxDelay (1 byte): penundaan jendela penerimaan.
- (i) CFList (0 atau 16 byte, opsional): frekuensi saluran tambahan.

MIC dari **Join-accept** dihitung menggunakan **AppKey**, dan seluruh payload dienkripsi dengan **AppKey** menggunakan AES-128 dalam mode ECB.

4. **Pengiriman Join-accept:** **Join-accept** yang dienkripsi dikirim ke end device melalui downlink di RX1 atau RX2. Tidak ada respons yang dikirim jika permintaan ditolak.
5. **Turunan dan aktivasi kunci sesi:** End device mendekripsi **Join-accept** dan menurunkan **NwkSKey** dan **AppSKey** menggunakan **AppKey** dan **AppNonce**. Perangkat menyimpan:
 - (a) **DevAddr**
 - (b) **NwkSKey**
 - (c) **AppSKey**

Network Server menyimpan **NwkSKey**, sedangkan **AppSKey** diteruskan ke Application Server.

3.9.2 Over-the-Air Activation dalam LoRaWAN 1.1



Gambar 3.11 Prosedur Over-the-Air Activation (OTAA) LoRaWAN 1.1

LoRaWAN 1.1 meningkatkan keamanan dengan memisahkan kunci root jaringan dan aplikasi serta memperkenalkan Join Server khusus. Prosedur OTAA melibatkan langkah-langkah berikut: Gambar ?? menggambarkan proses OTAA dalam LoRaWAN 1.1.

1. **Prasyarat:** End device disediakan dengan:
 - (a) **JoinEUI:** Pengenal 64-bit dari Join Server (menggantikan AppEUI).
 - (b) **DevEUI:** Pengenal perangkat 64-bit.

- (c) **AppKey**: Kunci root untuk turunan sesi aplikasi.
- (d) **NwkKey**: Kunci root untuk turunan sesi jaringan.

Kedua **AppKey** dan **NwkKey** dirahasiakan dan tidak pernah dikirim.

2. **Transmisi Join-request**: End device mengirim **Join-request** yang berisi:

- (a) **JoinEUI** (8 byte)
- (b) **DevEUI** (8 byte)
- (c) **DevNonce** (2 byte): biasanya penghitung yang dinaikkan per upaya join.

MIC dihitung menggunakan **NwkKey**. Pesan tidak dienkripsi dan dikirim pada saluran join spesifik wilayah.

3. **Penerusan ke Join Server**: Network Server meneruskan **Join-request** yang divalidasi ke Join Server yang diidentifikasi oleh **JoinEUI**.

4. **Pembuatan kunci sesi**: Join Server menurunkan empat kunci sesi:

- (a) **AppSKey**: untuk kerahasiaan payload aplikasi.
- (b) **FNwkSIntKey**: untuk MIC uplink (bagian pertama).
- (c) **SNwkSIntKey**: untuk MIC uplink (bagian kedua) dan semua MIC downlink.
- (d) **NwkSEncKey**: untuk enkripsi perintah MAC dalam kedua arah.

5. **Konstruksi dan enkripsi Join-accept**: Network Server menyusun pesan **Join-accept** dengan:

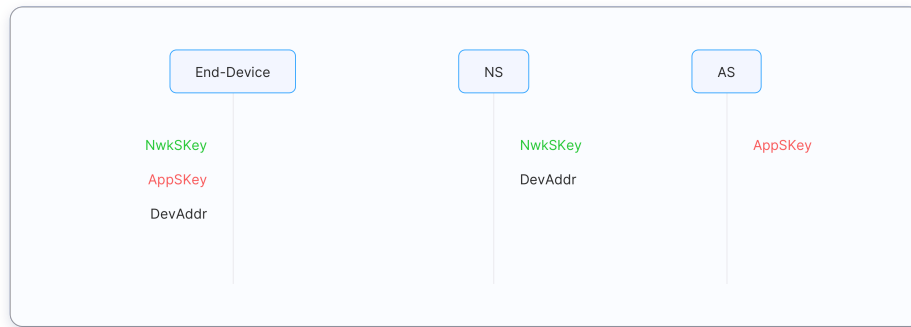
- (a) **JoinNonce** (1 byte): nonce yang disediakan Join Server.
- (b) **NetID** (3 byte)
- (c) **DevAddr** (4 byte)
- (d) **DLSettings** (1 byte)
- (e) **RxDelay** (1 byte)
- (f) **CFList** (0 atau 16 byte, opsional)

MIC dihitung menggunakan **JSIntKey** (diturunkan dari **NwkKey**), dan payload dienkripsi dengan **NwkKey** (untuk **Join-request**) atau **JSEncKey** (untuk **Rejoin-request**).

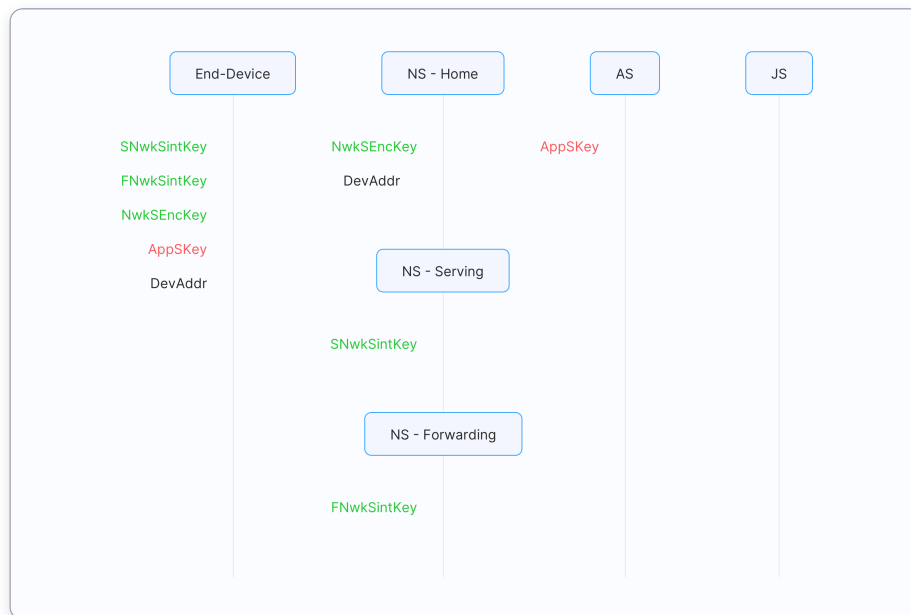
6. **Distribusi kunci**: Join Server mengirim **AppSKey** ke Application Server dan tiga kunci jaringan (**FNwkSIntKey**, **SNwkSIntKey**, **NwkSEncKey**) ke Network Server.

7. **Aktivasi perangkat**: End device mendekripsi **Join-accept** dan menurunkan keempat kunci sesi menggunakan **AppKey**, **NwkKey**, dan **JoinNonce**. Perangkat menyimpan:

- (a) **DevAddr**
- (b) **AppSKey**



Gambar 3.12 Prosedur Activation by Personalization (ABP) LoRaWAN



Gambar 3.13 Prosedur Activation by Personalization (ABP) LoRaWAN 1.1

- (c) FNwkSintKey
- (d) SNwkSintKey
- (e) NwkSEncKey

3.9.3 Activation by Personalization

Activation by Personalization (ABP) melewati prosedur join dengan mengonfigurasi parameter sesi langsung ke end device. Metode ini kurang aman dan tidak mendukung roaming jaringan. Gambar ?? menggambarkan proses ABP. Dalam LoRaWAN 1.1, ABP memerlukan pra-konfigurasi beberapa kunci sesi untuk menyelaraskan dengan model keamanan yang ditingkatkan. Gambar ?? menggambarkan proses ABP dalam LoRaWAN 1.1.

1. **ABP dalam LoRaWAN 1.0.x:** Parameter berikut dipra-konfigurasi:

- (a) DevAddr (32 bit)
- (b) NwkSKey (128 bit)
- (c) AppSKey (128 bit)

Parameter ini harus disinkronkan secara manual dengan Network Server (DevAddr, NwkSKey) dan Application Server (AppSKey).

2. ABP dalam LoRaWAN 1.1: Empat kunci sesi dipra-konfigurasi:

- (a) DevAddr (32 bit)
- (b) FNwkSIntKey (128 bit)
- (c) SNwkSIntKey (128 bit)
- (d) NwkSEncKey (128 bit)
- (e) AppSKey (128 bit)

Network Server menyimpan tiga kunci jaringan dan DevAddr, sedangkan Application Server menyimpan AppSKey.

- 3. Implikasi keamanan:** Perangkat ABP menggunakan kunci sesi statis sepanjang masa pakainya, meningkatkan kerentanan terhadap kompromi kunci. Selain itu, mengganti penyedia jaringan memerlukan rekonfigurasi manual semua materi kriptografi.

3.10 Spreading Factors

LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS), di mana informasi dikodekan dalam pulsa yang dimodulasi frekuensi linear yang dikenal sebagai *chirps* atau *symbols*. *Spreading factor* (SF) adalah parameter mendasar yang mengatur durasi dan struktur setiap chirp, sehingga secara langsung memengaruhi karakteristik transmisi utama termasuk laju data, jangkauan komunikasi, time-on-air, sensitivitas penerima, dan konsumsi energi.

3.10.1 Definisi dan Dampak Spreading Factor

1. Spreading factor menentukan laju sapuan chirp: spreading factor yang lebih tinggi sesuai dengan chirp yang lebih lambat, yang meningkatkan durasi simbol dan mengurangi laju data.
2. Untuk setiap kenaikan satu unit dalam spreading factor (misalnya, dari SF7 ke SF8), durasi chirp berlipat ganda, dan akibatnya laju data berkurang separuhnya untuk bandwidth dan laju pengkodean tetap.
3. LoRa mendukung enam spreading factor, dilambangkan SF7 hingga SF12, di mana SF7 menghasilkan laju data tertinggi dan jangkauan terpendek, sedangkan SF12 memberikan laju data terendah dan jangkauan terpanjang.

4. Spreading factor bersifat ortogonal: transmisi yang menggunakan spreading factor berbeda pada frekuensi yang sama dan pada waktu yang sama tidak saling mengganggu, memungkinkan penggunaan ulang spektrum dan manajemen kemacetan di jaringan padat.

3.10.2 Data Rate

1. Untuk bandwidth dan coding rate tetap, data rate berbanding terbalik dengan spreading factor.
2. Data rate berbanding lurus dengan bandwidth: menggandakan bandwidth akan menggandakan data rate untuk spreading factor yang sama.
3. Contoh bit rate untuk SF7 dengan coding rate $4/5$ (sering disederhanakan sebagai $CR = 1$ dalam perhitungan nominal) adalah:
 - (a) 5.5 kbit/s pada bandwidth 125 kHz
 - (b) 10.9 kbit/s pada bandwidth 250 kHz
 - (c) 21.9 kbit/s pada bandwidth 500 kHz

3.10.3 Communication Range

1. Spreading factor yang lebih tinggi meningkatkan processing gain, sehingga meningkatkan ketahanan sinyal terhadap noise dan memungkinkan penerimaan pada rasio signal-to-noise (SNR) yang lebih rendah.
2. Akibatnya, transmisi yang menggunakan SF12 mencapai jangkauan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan yang menggunakan SF7 dalam kondisi daya dan lingkungan yang identik.
3. Sifat ini memungkinkan jaringan untuk secara dinamis menyesuaikan spreading factor per perangkat guna menyeimbangkan data rate dan jangkauan berdasarkan kualitas link.

3.10.4 Time-on-Air

1. Time-on-air mengacu pada durasi perangkat menduduki kanal untuk mentransmisikan payload tertentu.
2. Untuk ukuran payload dan bandwidth tetap, time-on-air meningkat secara eksponensial seiring peningkatan spreading factor.
3. Time-on-air yang lebih lama dapat memperparah keterbatasan duty cycle di pita frekuensi yang diatur dan meningkatkan kerentanan terhadap interferensi.

4. Operator jaringan sering menggunakan kalkulator airtime (misalnya, LoRaWAN airtime calculator dari The Things Network) untuk memperkirakan durasi transmisi berdasarkan ukuran payload, bandwidth, dan spreading factor.

3.10.5 Receiver Sensitivity

1. Receiver sensitivity—daya sinyal minimum di mana penerima dapat mendekode transmisi dengan benar—meningkat dengan spreading factor yang lebih tinggi.
2. Untuk bandwidth tetap 125 kHz, nilai receiver sensitivity tipikal adalah:
 - (a) SF7: -123 dBm
 - (b) SF8: -126 dBm
 - (c) SF9: -129 dBm
 - (d) SF10: -132 dBm
 - (e) SF11: -134.5 dBm
 - (f) SF12: -137 dBm
3. Peningkatan sensitivitas ini pada spreading factor tinggi sangat penting untuk menjaga konektivitas di lingkungan dengan sinyal rendah, seperti di dalam gedung atau area pedesaan.

3.10.6 Battery Life

1. Transmisi radio merupakan sumber utama konsumsi energi pada perangkat end LoRaWAN.
2. Spreading factor yang lebih tinggi meningkatkan time-on-air, yang secara langsung meningkatkan waktu transmisi aktif dan konsumsi energi per pesan.
3. Akibatnya, perangkat yang beroperasi terutama pada SF12 akan memiliki masa pakai baterai lebih pendek dibandingkan dengan perangkat yang beroperasi pada SF7, dengan asumsi ukuran payload dan frekuensi transmisi yang sama.
4. Mekanisme Adaptive Data Rate (ADR) dalam LoRaWAN bertujuan untuk meminimalkan spreading factor (dan konsumsi daya) sambil mempertahankan keandalan link, sehingga mengoptimalkan umur baterai.

3.11 Adaptive Data Rate

Adaptive Data Rate (ADR) adalah mekanisme yang dikendalikan jaringan yang dirancang untuk mengoptimalkan pertukaran antara keandalan komunikasi, pemanfaatan waktu udara (*airtime*), dan konsumsi energi dalam jaringan LoRaWAN. Dengan menyesuaikan parameter transmisi secara dinamis berdasarkan kualitas tautan yang teramati, ADR memungkinkan penggunaan spektrum yang efisien sekaligus menjaga konektivitas yang andal.

3.11.1 Transmission Parameters Controlled by ADR

Mekanisme ADR mengatur parameter lapisan fisik berikut dari perangkat akhir:

1. Spreading factor
2. Bandwidth
3. Transmission power

Perangkat yang berada dekat dengan gateway biasanya beroperasi dengan spreading factor yang lebih rendah dan data rate yang lebih tinggi untuk meminimalkan airtime dan konsumsi energi. Sebaliknya, perangkat di tepi sel menggunakan spreading factor yang lebih tinggi untuk mencapai anggaran tautan (*link budget*) yang diperlukan agar penerimaan tetap andal.

3.11.2 Conditions for ADR Activation

ADR sebaiknya hanya diaktifkan dalam kondisi frekuensi radio (RF) yang stabil. Oleh karena itu:

1. Perangkat akhir statis umumnya dapat mengaktifkan ADR, asalkan lingkungan RF tetap konsisten.
2. Jika perangkat statis mendeteksi degradasi RF sementara (misalnya karena adanya penghalang lingkungan seperti kendaraan yang diparkir di atas sensor), perangkat tersebut harus menonaktifkan ADR sementara.
3. Perangkat akhir bergerak harus menerapkan logika untuk mendeteksi periode operasi stasioner yang berkepanjangan dan mengaktifkan ADR selama interval tersebut.
4. Keputusan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan ADR berada sepenuhnya pada perangkat akhir; baik server aplikasi maupun server jaringan tidak boleh mengesampingkan keputusan ini.

3.11.3 ADR Operation in The Things Stack

The Things Stack mengimplementasikan ADR menggunakan algoritma optimasi berbasis pengukuran yang diturunkan dari strategi adaptasi laju yang direkomendasikan oleh Semtech. Aspek operasional utama meliputi:

1. Saat bit ADR diatur dalam frame uplink, Network Server mulai mengumpulkan 20 pengukuran uplink terbaru. Setiap pengukuran mencakup:
 - (a) Frame counter

- (b) Signal-to-Noise Ratio (SNR) yang dilaporkan oleh gateway penerima terbaik
 - (c) Jumlah gateway yang menerima pesan tersebut
2. Ketika bit ADR dibersihkan oleh perangkat (misalnya karena mobilitas atau kondisi RF yang tidak stabil), semua pengukuran sebelumnya dibuang. Pengumpulan pengukuran dilanjutkan hanya setelah bit ADR diaktifkan kembali.
 3. Untuk setiap pengukuran, *margin* dihitung sebagai:

$$\text{Margin} = \text{Measured SNR} - \text{Required SNR for current data rate}$$

Margin ini mengkuantifikasi kelebihan anggaran tautan, yang menjadi dasar potensi peningkatan data rate atau pengurangan daya transmisi.

4. Permintaan ADR dipicu dalam kondisi berikut:
 - (a) **Initial ADR Request (hanya untuk US915 dan AU915):** Dikirim segera setelah join dalam implementasi pra-LoRaWAN 1.1 untuk mengonfigurasi mask saluran. Permintaan ini mencakup margin keamanan karena pengukuran tautan belum mencukupi saat join. LoRaWAN 1.1 menghilangkan kebutuhan permintaan ini dengan memungkinkan konfigurasi mask saluran dalam pesan **JoinAccept**.
 - (b) **Regular ADR Request:** Dijadwalkan ketika pengukuran yang cukup menunjukkan pengaturan data rate atau daya yang tidak optimal. Permintaan ini disisipkan (*piggybacked*) pada downlink lapisan aplikasi yang sudah ada (misalnya ACK atau payload).
 - (c) **Lowest Data Rate Trigger:** Dikirim ketika perangkat beroperasi pada DR0 (biasanya SF12/125 kHz), terlepas dari margin, untuk mendorong adaptasi laju.
 - (d) **ADR Acknowledgment Request:** Dipicu ketika perangkat mengatur bit **ADRackReq**, biasanya setelah mengirim 64 uplink tanpa menerima downlink (tergantung implementasi).
5. Jika perangkat akhir berulang kali menolak perintah ADR, Network Server akan berhenti menjadwalkan permintaan ADR lebih lanjut. Perilaku ini dapat mengindikasikan adanya masalah firmware perangkat atau ketidakcocokan versi antara perangkat dan server.

3.12 Limitations and Design Recommendations

LoRaWAN adalah protokol Low Power Wide Area Network (LPWAN) khusus yang dioptimalkan untuk kelas aplikasi Internet of Things (IoT) tertentu. Meskipun menawarkan keunggulan signifikan dalam hal jangkauan, efisiensi energi, dan biaya, protokol ini secara inheren tidak cocok untuk kasus penggunaan yang memerlukan data rate tinggi, latensi rendah, atau komunikasi kontinu. Memahami keterbatasan ini sangat penting untuk desain sistem dan pemanfaatan sumber daya yang efektif.

3.12.1 Appropriate Use Cases for LoRaWAN

LoRaWAN cocok untuk aplikasi yang memiliki karakteristik berikut:

1. **Komunikasi jarak jauh:** Mampu mencapai cakupan beberapa kilometer di lingkungan pedesaan dan ratusan meter hingga beberapa kilometer di lingkungan perkotaan.
2. **Konsumsi daya sangat rendah:** Perangkat akhir dapat beroperasi selama beberapa tahun dengan satu baterai berkat operasi berbasis duty cycle dan mode tidur yang efisien.
3. **Biaya modal dan operasional rendah:** Biaya perangkat keras biasanya di bawah 20 € per node, dengan biaya operasional berulang yang minimal.
4. **Kebutuhan data rate rendah:** Laju bit lapisan fisik berkisar antara sekitar 250 bit/s hingga 11 kbit/s di pita EU868 (menggunakan modulasi LoRa), tergantung pada spreading factor dan bandwidth yang dipilih.
5. **Penyebaran jaringan terdesentralisasi:** Pengguna dapat menyebar gateway pribadi untuk mencapai cakupan di area terpencil atau kurang terlayani tanpa bergantung pada infrastruktur pihak ketiga.
6. **Keamanan end-to-end:** Semua payload aplikasi dienkripsi menggunakan AES 128-bit, menjamin kerahasiaan dan integritas.

3.12.2 Inappropriate Use Cases for LoRaWAN

LoRaWAN tidak dirancang untuk skenario berikut:

1. **Transmisi data real-time atau frekuensi tinggi:** Protokol ini menerapkan duty cycle regulasi dan dioptimalkan untuk transmisi infrekuensi (misalnya sekali setiap beberapa menit).
2. **Komunikasi suara atau audio:** Teknologi seperti GPRS, 3G, atau LTE lebih sesuai untuk layanan berbasis suara.
3. **Sistem kendali jarak pendek dengan interaksi tinggi:** Protokol seperti Zigbee atau Bluetooth Low Energy (BLE) lebih cocok untuk otomasi rumah (misalnya pengendalian pencahayaan).
4. **Aplikasi bandwidth tinggi:** Transmisi gambar, streaming video (misalnya Netflix), atau file besar tidak layak; Wi-Fi atau broadband seluler sebaiknya digunakan sebagai gantinya.

3.12.3 Uplink Transmission Best Practices

Untuk memaksimalkan efisiensi spektrum, masa pakai baterai, dan kapasitas jaringan, pedoman berikut harus diperhatikan untuk komunikasi uplink:

1. **Minimalkan ukuran payload:** Data harus dikodekan dalam format biner ringkas, bukan representasi verbose seperti JSON atau teks ASCII. Format Cayenne Low Power Payload (LPP) direkomendasikan karena kesederhanaan dan dukungan luasnya.
2. **Optimalkan frekuensi transmisi:** Pesan harus dikirim dengan interval beberapa menit. Strategi agregasi data—seperti melaporkan nilai minimum, rata-rata, dan maksimum selama suatu jendela—atau transmisi berbasis peristiwa (misalnya dipicu oleh pelanggaran ambang batas atau deteksi gerakan) dapat secara signifikan mengurangi lalu lintas yang tidak perlu.
3. **Gunakan data rate tertinggi yang memungkinkan:** Data rate yang lebih tinggi (misalnya SF7 dengan bandwidth 125 kHz) meminimalkan time-on-air dan konsumsi energi. Jika margin tautan tidak mencukupi, spreading factor dapat ditingkatkan secara bertahap. Adaptive Data Rate (ADR) harus diaktifkan jika kondisi RF stabil, memungkinkan server jaringan untuk mengoptimalkan data rate dan daya transmisi secara dinamis.

3.12.4 Downlink Transmission Best Practices

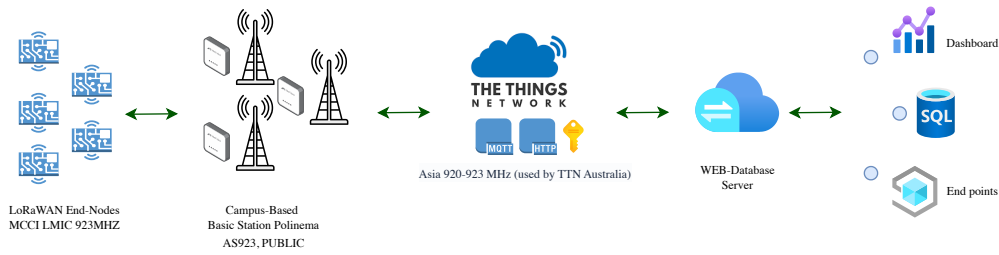
Karena sifat half-duplex dari sebagian besar gateway LoRaWAN, transmisi downlink sementara menonaktifkan kemampuan gateway untuk menerima pesan uplink di semua saluran. Hal ini berdampak pada kapasitas dan keandalan jaringan. Oleh karena itu, batasan berikut berlaku:

1. **Minimalkan penggunaan downlink:** Pesan downlink harus dihindari kecuali benar-benar diperlukan untuk fungsionalitas aplikasi.
2. **Jaga agar payload downlink tetap kecil:** Jika downlink diperlukan, ukuran payload harus diminimalkan untuk mengurangi airtime.
3. **Optimalkan uplink untuk meningkatkan efisiensi downlink:** Data rate downlink diturunkan dari data rate uplink dan RX1DROffset. Konfigurasi uplink yang efisien (misalnya data rate tinggi) memungkinkan downlink yang lebih efisien pula.
4. **Hindari uplink confirmed kecuali benar-benar diperlukan:** Pesan uplink confirmed memicu acknowledgment downlink wajib, meningkatkan beban jaringan. Aplikasi harus dirancang untuk mentolerir kehilangan pesan sesekali bila memungkinkan, menggunakan mekanisme keandalan lapisan aplikasi jika diperlukan.

BAB 4

METODE PENELITIAN

4.1 Campus-Based LoRaWAN Architecture with Basic Station Gateway



Gambar 4.1 Campus-based LoRaWAN architecture using Basic Station gateway compliant with AS923 (Indonesia).

Figure ?? illustrates the proposed campus-scale LoRaWAN architecture deployed at Polinema, utilizing the Basic Station gateway model compliant with Indonesian regulatory requirements. The system integrates end-devices, a LoRaWAN gateway, cloud infrastructure, and application endpoints into a cohesive IoT test bed. The components and data flow are described as follows:

1. LoRaWAN End-Nodes

- (a) Located on the left side of the diagram, these represent sensor or actuator devices deployed across the campus (e.g., environmental monitors, smart meters).
- (b) Each end-node is implemented using the MCCI LMIC stack configured for the AS923 frequency plan (920–923 MHz), in accordance with Permenkominfo No. 21/2019.
- (c) Devices transmit uplink messages using LoRa modulation and adhere to the 10% duty cycle and 14 dBm EIRP power limit mandated for Indonesia.

2. Basic Station Gateway (Campus-Based)

- (a) Positioned at the center-left, the gateway is labeled *Campus-Based Basic Station Polinema* and operates in the AS923 (PUBLIC) mode.
- (b) The gateway hardware (e.g., SenseCAP M1 or equivalent) runs the Basic Station software stack, enabling secure communication with The Things Network (TTN) via WebSocket over TLS.
- (c) It receives LoRa frames from multiple end-nodes simultaneously across different spreading factors and channels within the 920–923 MHz band.

- (d) The gateway forwards all received packets to the LoRaWAN Network Server (LNS) in the cloud using the LNS protocol, while also receiving downlink commands via the same secure channel.

3. Cloud Infrastructure (The Things Network)

- (a) Represented by the central cloud icon, this layer corresponds to TTN’s **au1** or **eu1** cluster (configured as **AS923** for compatibility with Indonesian devices).
- (b) The LNS performs frame validation, deduplication, and routing of application data to the appropriate integration endpoints.
- (c) The gateway authenticates with TTN using its unique Gateway EUI and an API key, ensuring secure and authorized traffic exchange.

4. Application and Data Endpoints

- (a) On the right side, three primary endpoints are shown:
 - i. *Dashboard*: A web-based monitoring interface (e.g., Grafana, TTN Console) for real-time visualization of sensor data.
 - ii. *Time Series Data Sets*: A database or time-series storage system (e.g., InfluxDB, Azure Time Series Insights) for historical data logging and analytics.
 - iii. *Web-Database Server*: A custom application server hosting business logic, user management, and RESTful APIs for campus services (e.g., smart lighting, occupancy tracking).
- (b) Data flows from TTN to these endpoints via HTTP/MQTT integrations, as indicated by the protocol icons (HTTP, MQTT, and policy/access symbols) above the cloud layer.

5. Data Flow and Protocols

- (a) Bidirectional arrows between components indicate full-duplex communication:
 - i. End-nodes ↔ Gateway: LoRa RF communication (920–923 MHz, AS923).
 - ii. Gateway ↔ TTN: Secure WebSocket (port 8887) using Basic Station LNS protocol.
 - iii. TTN ↔ Endpoints: Standard internet protocols (HTTP/HTTPS, MQTT over TLS).
- (b) All cloud-to-application links are encrypted and authenticated, ensuring end-to-end security from sensor to dashboard.

This architecture enables scalable, secure, and regulatory-compliant IoT deployment across the Polinema campus. By leveraging Basic Station and TTN, the system supports remote gateway management, over-the-air updates, and seamless integration with existing campus IT infrastructure—making it suitable for both research and operational use cases.

4.2 Configuring Gateway: Basic Station

This section provides a step-by-step guide to configuring a LoRaWAN gateway using the Basic Station software stack on The Things Network (TTN). The instructions are tailored for the Sreed Studio SenseCAP M1 gateway, which natively supports Basic Station and offers a user-friendly WebUI for initial setup.

4.2.1 Setting-up Basic Station on TTN

To integrate a Basic Station-compatible gateway (such as the SenseCAP M1) with The Things Network (TTN), the following steps must be performed. These steps assume the gateway has internet connectivity and has been powered on.

1. Create a Gateway Entry in The Things Network Console

- (a) Log in to your account at <https://console.cloud.thethings.network/>.
- (b) Navigate to the desired application or create a new one if necessary.
- (c) In the left-hand menu, click on *Gateways* and then select *+ Add gateway*.
- (d) Fill in the required fields:
 - i. *Gateway ID*: Enter a unique, lowercase identifier (e.g., `univ-campus-gw-01`). This ID must be globally unique across TTN.
 - ii. *Gateway EUI*: Enter the 64-bit Gateway EUI (typically printed on the device label or found in the WebUI under device information). It must be entered in hexadecimal format without colons or dashes (e.g., `ABCDEF1234567890`).
 - iii. *Gateway Server Address*: Set to `eu1.cloud.thethings.network` (or the appropriate cluster region, e.g., `nam1`, `au1`, etc.).
 - iv. *Frequency Plan*: Select the correct regional plan. For Indonesia, choose `AS923` (specifically `AS923 - Group 1` or as defined by local regulations).
 - v. Leave other fields at their default values unless advanced configuration is required.
- (e) Click *Create gateway*.

2. Obtain Gateway Authentication Credentials

- (a) After creating the gateway, navigate to the gateway's overview page in the TTN Console.
- (b) Go to the *General Settings* tab.
- (c) Scroll down to the *Gateway Authentication* section.
- (d) Click *Generate API key*.
- (e) In the pop-up window:
 - i. Provide a name for the key (e.g., `basic-station-key`).

- ii. Under *Rights*, ensure at least the following permissions are selected:
 - A. **View gateway information**
 - B. **Link as Gateway to a Gateway Server for traffic exchange**
 - iii. Click *Create API key*.
- (f) Copy the generated API key immediately—it will not be shown again.

3. Configure the Gateway to Use TTN as LNS

- (a) The SenseCAP M1 uses Basic Station, which requires two server endpoints:
 - i. *LNS (LoRa Network Server)*: For real-time packet forwarding (e.g., `wss://[cluster].cloud.thethings.network:8887`).
 - ii. *CUPS (Configuration and Update Server)*: For secure provisioning and updates (e.g., `https://[cluster].cloud.thethings.network:443`).
- (b) These endpoints are typically configured automatically via the WebUI when TTN is selected as the network provider (see next subsection).
- (c) The Gateway EUI and API key obtained above are used by the gateway to authenticate with TTN's LNS and CUPS services.

4.2.2 Configuring Basic Station SenseCAP M1: WEBUI

The SenseCAP M1 provides a built-in web-based user interface (WebUI) accessible over Wi-Fi or Ethernet. The following steps detail the configuration process through this interface.

1. Access the WebUI

- (a) Power on the SenseCAP M1 gateway.
- (b) Connect your computer or mobile device to the gateway's default Wi-Fi hotspot (SSID typically starts with **SenseCAP_M1_XXXX**).
- (c) Open a web browser and navigate to `http://192.168.100.1`.
- (d) Log in using the default credentials (usually username: `admin`, password: printed on the device label or set during first boot).

2. Connect to Local Network

- (a) In the WebUI, go to *Network Settings*.
- (b) Configure internet connectivity:
 - i. For Wi-Fi: Select your campus or lab Wi-Fi network and enter the password.
 - ii. For Ethernet: Ensure a cable is connected; DHCP is enabled by default.
- (c) Save settings and wait for the gateway to obtain an IP address on the local network.

- (d) Note the new local IP address (e.g., 192.168.1.50) to access the WebUI from the local network.

3. Select Network Provider

- (a) Navigate to *LoRaWAN Settings* or *Network Provider*.
- (b) Choose *The Things Network (TTN)* from the list of available providers.
- (c) The WebUI will automatically populate the following fields:
 - i. LNS Server: `wss://[region].cloud.thethings.network:8887`
 - ii. CUPS Server: `https://[region].cloud.thethings.network:443`
- (d) If your region is not auto-detected, manually select the correct TTN cluster (e.g., `eu1` for Europe, `nam1` for North America). For Indonesia, `au1` or `eu1` may be used depending on latency and policy.

4. Enter Gateway Credentials

- (a) In the same *LoRaWAN Settings* section, enter the following:
 - i. *Gateway EUI*: The 16-character hexadecimal EUI registered in TTN (e.g., `ABCDEF1234567890`).
 - ii. *API Key*: Paste the API key generated in Subsection ??.
- (b) Ensure the *Frequency Plan* is set to `AS923` to comply with Indonesian regulations (Permenkominfo No. 21/2019).
- (c) Optionally, adjust the *Transmission Power* and *Duty Cycle* settings to respect the 14 dBm EIRP limit and 10% duty cycle requirement for the 920–923 MHz band.

5. Apply and Reboot

- (a) Click *Save* or *Apply Configuration*.
- (b) The gateway will restart and initiate a secure WebSocket connection to TTN's LNS using TLS.
- (c) Monitor the WebUI status page for connection indicators (e.g., "Connected to LNS").

6. Verify Operation in TTN Console

- (a) Return to the TTN Console gateway page.
- (b) Check the *Live Data* tab to confirm uplink messages are being received.
- (c) Verify that the gateway status shows as *Connected*.
- (d) If no data appears, check:
 - i. Internet connectivity of the gateway,
 - ii. Correctness of Gateway EUI and API key,
 - iii. Regional frequency plan alignment (`AS923` for Indonesia),
 - iv. Firewall or proxy settings that may block WebSocket (port 8887) or HTTPS (port 443) traffic.

4.3 End-Nodes Using Lilygo T3S3

The end-nodes for this campus-based LoRaWAN architecture are implemented using the Lilygo T3S3 development board, which features the ESP32 microcontroller and an integrated SX1276 LoRa transceiver. The following outlines the configuration and programming steps to set up the Lilygo T3S3 as LoRaWAN end-nodes compliant with the AS923 frequency plan.

4.3.1 Hardware Setup

1. Lilygo T3S3 Board

- (a) Ensure you have the Lilygo T3S3 board with the SX1276 LoRa module.
- (b) Connect the board to your computer via USB for programming and power.

2. Antenna Connection

- (a) Attach a suitable antenna for the 920–923 MHz frequency range to the LoRa module to ensure optimal signal transmission and reception.

4.3.2 Software Setup

1. Arduino IDE Configuration

- (a) Install the Arduino IDE if not already installed.
- (b) Add the ESP32 board support by including the following URL in the Additional Board Manager URLs:
`https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json`.
- (c) Install the ESP32 board package via the Board Manager.
- (d) Select the Lilygo T3S3 board from the Tools > Board menu.

2. Library Installation

- (a) Install the MCCI LoRaWAN LMIC library via the Library Manager (Sketch > Include Library > Manage Libraries).
- (b) Ensure the library version supports the AS923 frequency plan.

4.3.3 Programming the End-Nodes

1. LoRaWAN Configuration

- (a) Configure the LMIC library for the AS923 frequency plan by defining the appropriate parameters in your sketch.
- (b) Set the device EUI, application EUI, and application key as provided by TTN for your end-node.

2. Uplink Message Implementation

- (a) Implement code to read sensor data (e.g., temperature, humidity) and format it into a payload suitable for LoRaWAN transmission.
- (b) Use the LMIC library functions to send uplink messages at defined intervals, adhering to duty cycle regulations.

3. Testing and Deployment

- (a) Upload the sketch to the Lilygo T3S3 board.
- (b) Monitor the TTN Console to verify that uplink messages are being received correctly.
- (c) Deploy the end-nodes across the campus as needed, ensuring they are within range of the gateway.

4.3.4 LoRaWAN TTN End-Device Registration

To register the Lilygo T3S3 end-nodes on The Things Network (TTN), follow these steps:

1. Log in to your TTN Console account.
2. Navigate to the application where you want to register the end-device.
3. Click on *End devices* and then select *+ Add end device*.
4. Fill in the required fields:
 - (a) *End device ID*: A unique identifier for the end-device (e.g., `lilygo-t3s3-node-01`).
 - (b) *Device EUI*: The 64-bit unique identifier for the device, which can be generated or obtained from the board.
 - (c) *Application EUI*: The 64-bit identifier for the application, provided by TTN.
 - (d) *App Key*: A 128-bit key used for encryption, also provided by TTN.
 - (e) *Frequency Plan*: Select **AS923** to comply with Indonesian regulations.
 - (f) Leave other fields at their default values unless specific configurations are needed.
 - (g) Click *Create end device*.
 - (h) Repeat the process for each Lilygo T3S3 end-node you wish to register.
 - (i) After registration, monitor the *Live Data* tab for each end-device to verify successful uplink message reception.
 - (j) Ensure that the end-nodes are configured to use OTAA (Over-The-Air Activation) for secure network joining.

- (k) Deploy the end-nodes in their intended locations and ensure they are within range of the gateway for optimal performance.

Table ?? summarizes the frequency plans available on TTN, highlighting the AS923 plan used in this architecture.

Tabel 4.1 TTN Frequency Plans Summary

Frequency Plan	Region	Uplink Frequencies (MHz)	Downlink Frequencies (MHz)
AS923	Asia-Pacific (Indonesia)	920-923	920-923
EU868	Europe	863-870	863-870
US915	North America	902-928	923-928
AU915	Australia	915-928	923-928
CN470	China	470-510	470-510

4.3.5 LoRaWAN specifications and Regional Parameters

The Lilygo T3S3 end-nodes are configured to operate under the LoRaWAN specifications defined for the AS923 frequency plan, which is compliant with Indonesian regulations as per Permenkominfo No. 21/2019. Key specifications include:

- **Frequency Range:** 920–923 MHz for both uplink and downlink communications.
- **Maximum EIRP:** 14 dBm, adhering to local regulatory limits.
- **Duty Cycle:** 10% maximum duty cycle for transmissions to minimize interference.
- **Spreading Factors:** Configurable from SF7 to SF12, allowing for trade-offs between data rate and range.
- **Channel Plan:** Multiple channels are defined within the AS923 plan to support simultaneous transmissions from multiple end-nodes.
- **Data Rates:** Ranging from DR0 (SF12, 250 bps) to DR5 (SF7, 5470 bps), enabling flexible communication based on application requirements.

Table ?? shows LoRaWAN versions and specifications available in TTN.

Regional parameter is defined in Table ?? shows regional parameters versions available on TTN and its description. RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A is used for AS923 frequency plan. Describes all option available for regional pa

Tabel 4.2 LoRaWAN Versions and Specifications in TTN

LoRaWAN Version	Max Payload Size (bytes)	Max Data Rate (bps)	Spreading Fa
1.0.0	51	5470	SF7 to SF1
1.0.1	51	5470	SF7 to SF1
1.0.2	222	5470	SF7 to SF1
1.0.3	222	5470	SF7 to SF1
1.1	242	5470	SF7 to SF1

4.4 Tahapan Penelitian

Langkah-langkah yang harus dilakukan (lihat Gambar ??) untuk menyelesaikan penelitian ini dengan baik yang juga memungkinkan untuk menghasilkan prototipe yang dapat digunakan pada laboratorium sistem kontrol, serta tulisan yang dapat dipresentasikan pada seminar internasional terindeks IEEE, dan dokumen feasibility study, implementation arrangement, KI, untuk tujuan komersialisasi prototipe adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dan Studi Literatur yang Mendalam. Langkah awal yang krusial adalah melakukan penelitian dan studi literatur yang menyeluruh terkait dengan Model Predictive Control (MPC), sistem kontrol, serta pengembangan prototipe perangkat keras. Tersedianya informasi yang tepat dan pemahaman yang kuat merupakan kunci utama untuk memulai penelitian ini dengan baik. Indikator Keberhasilan: Identifikasi jurnal terkemuka, buku, dan sumber daya tepercaya tentang Model Predictive Control (MPC) dan sistem kontrol. Membangun pemahaman yang kuat tentang konsep MPC, sejarah, dan penerapannya.
2. Identifikasi Spesifikasi Prototipe. Selanjutnya adalah mengidentifikasi spesifikasi dan persyaratan yang diperlukan untuk mengembangkan prototipe yang dapat digunakan pada laboratorium sistem kontrol. Ini meliputi desain perangkat keras yang cocok, pilihan perangkat lunak yang tepat, serta integrasi komponen yang diperlukan sesuai kebutuhan. Indikator Keberhasilan: Dokumen spesifikasi yang jelas dan terinci yang mencakup persyaratan perangkat keras, perangkat lunak, output yang diharapkan, dan kriteria evaluasi prototipe.
3. Desain Perangkat Keras dan Perangkat Lunak. Setelah spesifikasi prototipe teridentifikasi, langkah selanjutnya adalah merancang perangkat keras dan perangkat lunak yang sesuai dengan persyaratan yang ada. Ini mencakup pemilihan komponen, perancangan sirkuit, dan implementasi perangkat lunak untuk kontrol dan interaksi sistem. Indikator Keberhasilan: Penyelesaian desain perangkat keras yang dilengkapi dengan skematik dan layout PCB, serta pengembangan perangkat lunak dengan beroperasinya fungsi kontrol sesuai spesifikasi.
4. Pengujian dan Evaluasi. Prototipe yang dikembangkan harus diuji secara ekstensif, baik untuk memastikan kinerja yang diharapkan maupun untuk

memverifikasi bahwa prototipe tersebut sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Indikator Keberhasilan: Pengujian prototipe yang menghasilkan data kuantitatif dan kualitatif untuk mengevaluasi kinerja prototipe sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

5. Penulisan Paper Ilmiah dan KI. Selama proses pengembangan prototipe, penting untuk secara bersamaan mulai menulis paper ilmiah yang mendokumentasikan konsep, perancangan, pengujian, dan hasil dari penelitian ini. Paper ini harus dirancang sejak awal agar memenuhi standar dan persyaratan yang diperlukan untuk mempresentasikan penelitian dalam konferensi internasional terindeks seperti IEEE. Pada tahap ini, dituliskan juga dokumen KI untuk program komputer. Indikator Keberhasilan: Penyusunan sepenuhnya paper ilmiah dengan latar belakang yang kuat, tujuan penelitian yang jelas, metodologi yang tepat, hasil yang signifikan, dan kesimpulan yang terdefinisi dengan baik, serta sertifikat KI.
6. Analisis Kelayakan Bisnis. Sambil mengembangkan prototipe, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis kelayakan bisnis atau feasibility study. Ini mencakup analisis pasar, potensi komersialisasi, dan strategi pemasaran yang dapat diterapkan jika prototipe berhasil dikembangkan. Indikator Keberhasilan: Dokumen analisis kelayakan bisnis yang mencakup analisis risiko, evaluasi pasar yang komprehensif, strategi pemasaran yang efektif, dan proyeksi pendapatan.
7. Penulisan Dokumen Feasibility Study dan Implementation Arrangement. Berdasarkan hasil analisis kelayakan bisnis, selanjutnya diperlukan pengembangan dokumen feasibility study yang komprehensif, mencakup analisis pasar, rencana pemasaran, perkiraan pendapatan, dan informasi terkait komersialisasi prototipe. Indikator Keberhasilan: Diselesaikannya dokumen feasibility study yang menyediakan gambaran yang jelas tentang potensi komersialisasi, rencana pemasaran, target pasar, dan strategi untuk memasarkan prototipe.
8. Presentasi pada Seminar Internasional. Setelah paper ilmiah selesai, adalah mendaftar untuk mengajukan presentasi pada konferensi atau seminar internasional terindeks seperti IEEE. Proses penerimaan untuk konferensi ini sering kali memerlukan penyerahan paper yang ketat dan sesuai kriteria. Indikator Keberhasilan: Penyerahan paper ilmiah yang lulus seleksi peer-review dan diterima oleh konferensi, serta presentasi yang mengesankan dan informatif pada seminar internasional yang terindeks.
9. Pelaporan Akhir Penelitian. Langkah terakhir adalah pelaporan penelitian: Indikator tersedianya dokumen yang diperlukan untuk pelaporan penelitian.

4.5 Uraian Tugas Ketua, Anggota Peneliti dan Mitra

Pembagian dan uraian tugas ketua peneliti dan anggota peneliti serta mitra adalah sebagai berikut:

1. Ketua:

- (a) Merencanakan Usulan (Proposal, Administrasi, RAB, Monev, dan Hasil), perumusan sistem kontrol
- (b) Mendisain, mengimplementasikan dan menguji algoritma sistem kontrol
- (c) Mengintegrasikan sistem dan sub-sub sistem dalam diagram kontrol
- (d) Memprogram algoritma MPC
- (e) Menyusun dan presentasi artikel publikasi pada seminar
- (f) Menyusun dan melaporkan luaran dan laporan untuk monev dan laporan akhir
- (g) Menyusun feasibility study, implementation arrangement dan dokumen hak cipta

2. Anggota 1:

- (a) Mendisain sistem travel cart-inverted pendulum
- (b) Mendisain sistem belt-drive dan sistem gear
- (c) Mendisain linear actuator
- (d) Membantu analisa data

3. Anggota 2:

- (a) Mendisain sistem elektronik power-supply
- (b) Mendisain sistem elektronik komunikasi
- (c) Mendisain sistem elektronik embedded sistem
- (d) Membantu analisa data

4. Anggota 3:

- (a) Menyusun algoritma pemrograman sistem komputasi matrix dan vector
- (b) Menyusun algoritma pemrograman sistem komputasi integrator
- (c) Menyusun algoritma pemrograman system optimasi
- (d) Mendisain layout plotting respon sistem

5. Mahasiswa:

- (a) Membantu realisasi sistem mekanik dengan peralatan-peralatan rapid-prototyping: 3D Printer, CNC, dll.

- (b) Membantu realisasi disain sistem komputasi dan antarmuka dengan Bahasa pemrograman Python
- (c) Membantu realisasi disain sistem elektronik dengan software rangkaian elektronik serta mesin pembuat PCB

6. Mitra Industri

- (a) Membantu menyusun feasibility study dan dokumen implementation arrangement
- (b) Memberikan spesifikasi-spesifikasi detail tentang produk sesuai dengan permintaan pasar dan kondisi produk-produk serupa yang di pasaran
- (c) Membantu menentukan parameter-parameter teknis CAD/CAM untuk disain prototipe
- (d) Membantu merencanakan disain elektronik, komunikasi dan mekanik
- (e) Memberikan dukungan dengan penyediaan sarana dan prasarana yang dimiliki mitra untuk dapat digunakan dalam proses rapid prototyping

BAB 5

HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN

Lampiran B. Susunan Tim Peneliti

1. Ketua Peneliti

- (a) Nama Lengkap : Indrazno Siradjuddin, S.T., M.T., Ph.D.
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Ketua Peneliti Dosen MTTE
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem Kontrol dan Robotika
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Pemodelan matematika dan analisa sistem kontrol
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

2. Anggota Peneliti Dosen MTTE

- (a) Nama Lengkap : Erfan Rohadi, S.T., M.Eng., Ph.D
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Anggota Peneliti Dosen MTTE
- (c) Rumpun Ilmu : Teknologi Informasi
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Pembuatan aplikasi software
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

3. Anggota Peneliti Dosen TE

- (a) Nama Lengkap : Mas Nurul Achmadiyah, S.ST., M.T
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Anggota Peneliti Dosen D-III TE
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem Kontrol, Kecerdasan Buatan
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Analisa pemodelan matematika dan sistem kontrol
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

4. Pembantu Peneliti Dosen TE

- (a) Nama Lengkap : Leonardo Kamajaya, S.ST., M.Sc
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Pembantu Peneliti Dosen D-III TE
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem kontrol dan Robotik
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Analisa permodelan Matematika dan membantu penyelesaian luaran penelitian
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

5. Pembantu Peneliti Dosen TE

- (a) Nama Lengkap : Gillang Al Azhar, S.S.T., M.Tr.T
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Pembantu Peneliti Dosen D-IV TE
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem kontrol dan Robotik
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Analisa permodelan Matematika dan membantu penyelesaian luaran penelitian
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

6. Mahasiswa MTTE

- (a) Nama Lengkap : Febby Ayu Salsabillah
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Mahasiswa
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem kontrol dan Robotik
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Analisa permodelan Matematika dan membantu penyelesaian luaran penelitian
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

7. Mahasiswa MTTE

- (a) Nama Lengkap : Dimas Adi Prayoga
- (b) Kedudukan dan Jabatan : Mahasiswa
- (c) Rumpun Ilmu : Sistem kontrol dan Robotik
- (d) Tanggung Jawab Kerja : Analisa permodelan Matematika dan membantu penyelesaian luaran penelitian
- (e) Alokasi Waktu Penelitian : 10 jam

Lampiran C. Biodata Tim Peneliti

Biodata Tim Pelaksana

Jabatan dalam Tim Pengusul (Ketua Peneliti)

A. Identitas Diri

1	Nama Lengkap	Indrazno Siradjuddin, ST., MT., PhD
2	Jenis Kelamin	Laki-laki
3	Jabatan Fungsional	Lektor Kepala III/D
4	NIK	197406242000121001
5	NIDN	0024067406
6	Tempat dan Tanggal Lahir	Tulungagung, 24 Juni 1974
7	Alamat e-mail	indrazno@polinema.ac.id
8	Nomor telepon/HP	081222437474
9	Alamat Kantor	JL Soekarno Hatta No. 9, Malang
10	Nomor Telepon/Fax (Kantor)	0341404424, faks 0341404420
11	Mata Kuliah yang diampu	1. Sistem Embedded 2. Robotika 3. Robot Industri
12	Scopus ID	36633223300

B. Riwayat Pendidikan

	S-1	S-2	S-3
Nama Perguruan Tinggi	Universitas Brawijaya	ITS	Ulster University
Bidang Ilmu	Teknik Elektronika	Teknik Elektronika	Intelligent Systems and Robotics
Tahun Masuk-Lulus	1993-2000	2004-2006	2009-2014
Judul Skripsi/ Tesis/Disertasi	A Prototype of PC Based Pipeline Airflow Control Using Fuzzy Method	Indoor Mobile Robot Exploration and Navigation using Probabilistic Occupancy Grid Maps	Computationally Intelligent Visual Servoing
Pembimbing	Ir. Purwanto., MT., Ir. Chairuzaini	Ir. Joko Purwanto., M.Eng., PhD Ir. Hendra Kusuma, M.Eng	Prof. Laxmidhar Bahera Prof. Martin McGinnity Dr. Sonya Coleman

C. Pengalaman Penelitian dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan	Jumlah
1	2011-2012	Intrinsically Motivated Cumulative Learning Versatile Robots (Research Assistant)	IM Clever Project, FP7-ICT-IP-231722, European Union, UK, Th. 2011-2012	7.726.783 (Euros)

	No.	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan	Jumlah
2	2015	Sebagai Ketua dalam melaksanakan Penelitian Hibah Fundamental dengan judul "Pengembangan dan Implementasi Sistem Kontrol Visual Servoing untuk Robot Beroda Berjenis Differential Drive"		Hibah Penelitian DIKTI	65.000.000 (IDR)
3	2015	Sebagai Ketua dalam melaksanakan Penelitian Hibah Fundamental dengan judul "Pengembangan dan Implementasi Sistem Kontrol Visual Servoing untuk Robot Beroda Berjenis Differential Drive"		Hibah Penelitian DIKTI	65.000.000 (IDR)
4	2015	Sebagai Ketua dalam melaksanakan Penelitian DIPA Polinema dengan Judul "Analisis dan Implementasi Simulasi Algoritma Sistem Kontrol Visual Servoing pada Beaglebone Black"		Swadana P2M Polinema	4.000.000 (IDR)
5	2015	Sebagai Anggota dalam melaksanakan Penelitian DIPA Polinema dengan Judul "Analisa Performansi Sensor Linear Hall Efek pada Detektor Arus Beban Transformator Step Down"		Swadana P2M Polinema	4.000.000 (IDR)
6	2016	Sebagai Ketua dalam Penelitian Hibah Fundamental dengan Judul" Pemodelan, Analisis dan Implementasi Sistem Kontrol Alat Transportasi Pendulum Terbalik dengan 2 Roda Penggerak"		Hibah Penelitian DIKTI	60.000.000 (IDR)

	No.	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan	Jumlah
7	2016	Sebagai Ketua dalam Penelitian Hibah Fundamental dengan Judul” Pemodelan, Analisis dan Implementasi Sistem Kontrol Alat Transportasi Pendulum Terbalik dengan 2 Roda Penggerak”		Hibah Penelitian DIKTI	60.000.000 (IDR)
8	2018-2020	Sebagai Ketua dalam Penelitian Pengembangan dan Implementasi Algoritma dan Teknik Kendali Robot Swatantra: Pelokalisasi Diri, Pengkonstruksian Peta dan Perencanaan Gerak		Hibah Penelitian DIKTI	400.000.000 (IDR)
9	2018	Sebagai Anggota Kegiatan Penelitian Sistem Monitoring Trafo Gardu Distribusi PT. PLN (Persero) Berbasis IOT		Swadana P2M Polinema	190.000.000 (IDR)
10	2018	Sebagai Anggota Kegiatan Penelitian Disain Dan Analisis Plannar Sleeve Antenna Untuk Sistem Televisi Dan Sistem Kontrol, Navigasi Robot Pada Lingkungan Dinamis		Swadana P2M Polinema	90.000.000 (IDR)

D. Pengalaman Pengabdian pada Masyarakat dalam 5 Tahun Terakhir

E. Publikasi Artikel Ilmiah dalam Jurnal 5 Tahun Terakhir

	No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/ Nomor/ Tahun
1	An Iterative Robot-Image Jacobian Approximation of Image-Based Visual Servoing for Joint Limit Avoidance.		International Journal of Mechatronics and Automation	Vol.2, No.2, 227-239, 2012 pp

No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/ Nomor/ Tahun
2	Image-Based Visual Servoing of a 7 DOF Robot Manipulator Using an Adaptive Distributed Fuzzy PD Controller.	IEEE Transactions on Mechatronics	Vol.19, No.2, 512-523, 2014 pp
3	An Image Based Visual Control Law for a Differential Drive Mobile Robot	International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS	Vol:15 NO:06, 100-107, 2015 pp
4	Perancangan dan Implementasi Sistem Kontrol Differensial Drive Personal Transporter dengan Menggunakan Sistem Kontrol PID	Jurnal Elektronika Otomasi Industri	Vol 2, No. 1 pp 2-8, 2015
5	Pengaturan Kecepatan Motor DC Terintegrasi Untuk Sistem Penggerak Directional Robot Dengan Metode PID	Jurnal Elektronika Otomasi Industri	Vol 2, No. 1 pp 54-59, 2015
6	Pemodelan dan Analisis Sistem Kontrol Kinematik Omni Directional pada Robot	Jurnal Elektronika Otomasi Industri	Vol 2, No. 1 pp 80-86, 2015
7	State space control using LQR method for a cart-inverted pendulum linearised model	International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS	Vol 17, No. 1 pp 119-126, 2017
8	A New Implementation Of Single Phase Shimizu Inverter For Optimal Power Flow Of Solar PV System Based On Incremental Conductance MPPT Method	ICIC Express Letters	Tahun: 2017 Volume: 12 ISSN: 1881-803X
9	The Development of Classification System of Student Final Assignment Using Naive Bayes Classifier Case Study: State Community Academy of Bojonegoro	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X

No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/ Nomor/ Tahun
10	State-feedback control with a full-state estimator for a cart-inverted pendulum system	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X
11	Raspberry Pi-Based Farming Automation and Monitoring System using Automatic Weather System (AWS) (Case Study: Chili Plants)	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X
12	Open Problems in Indonesian Automatic Essay Scoring System	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X
13	Geo-Sentiment Analysis as a Location-Based Opinion Analysis System on Public Opinion Data about Governor Candidates	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X
14	Design and Analysis of Ultra Low-Profile ILA on a Rectangular Conducting Plane	International Journal of Engineering and Technology (UAE)	Tahun: 2018 Volume: 7 ISSN: 2227-524X
15	A New Implementation of Single Phase Shimizu Inverter for Optimal Power Flow of Solar PV System Based on Incremental Conductance MPPT Method	International Journal of Research and Surveys	Tahun: 2018 Volume: 12 ISSN: 1881-803X
16	Kinematics and Control A Three Wheeled Omnidirectional Mobile Robot	SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering	Tahun: 2019 Volume 6 Issue 12 E-ISSN 2348 - 8379
17	Stabilized controller of a two wheels robot	Bulletin of Electrical Engineering and Informatics	Tahun : 2020 Volume 9 Issue 6 ISSN: 2302-9285

	No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/ Nomor/ Tahun
18		Linear quadratic regulator and pole placement for stabilizing a cart inverted pendulum system	Bulletin of Electrical Engineering and Informatics	Tahun : 2020 Volume 9 Issue 6 ISSN: 2302-9285

F. Pemakalah Seminar Ilmiah (*oral presentation*) dalam 5 Tahun Terakhir

	No	Nama Pertemuan Ilmiah/Seminar	Judul Artikel Ilmiah	Waktu dan Tempat
1		IEEE IET Irish Signals and Systems Conference	Visual Servoing of a Redundant Manipulator Using Shape Moments	Dublin, Juni, 2009
2		IEEE International Conference on Fuzzy Systems	Image-Based Visual Servoing of a 7 DOF Robot Manipulator Using a Distributed Fuzzy Proportional Controller	Barcelona, Juli 2010
3		IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	A Computationally Efficient Approach for Jacobian Approximation for Joint Limit Avoidance	Beijing, 2011
4		IEEE International Joint Conference on Neural Networks	A Position Based Visual Tracking System for a 7 DOF Robot Manipulator Using a Kinect Camera	Sydney, Juni 2012
5		IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics	Primitive Action Learning using Fuzzy Neural Networks	Guangzhou, Desember 2012
6		International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering	Modelling and Analysis of a Photovoltaic Cell	Surabaya, November 2015

No	Nama Pertemuan Ilmiah/Seminar	Judul Artikel Ilmiah	Waktu dan Tempat
7	IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors	A Real-Time Model Based Visual Servoing Application for a Differential Drive Mobile Robot Using Beaglebone Black Embedded System	Langkawi, Oktober 2015
8	International Symposium On Novel And Sustainable Technology	One-shot learning Algorithm for Imitating Primitive Movements of a Robot Actuator	Tainan, Oktober 2016
9	Quality in Research, Indexed by IEEE Explore	Stabilising A Cart Inverted Pendulum System Using Pole Placement Control Method (Accepted, It will be presented)	Bali, July 2017
10	Quality in Research, Indexed by IEEE Explore	Identification of Pulse Frequency Spectrum of Chronic Kidney Disease Patients Measured at TCM Points Using FFT Processing (Accepted, It will be presented)	Bali, July 2018
11	International Conference on Applied Science and Technology (iCAST on Engineering Science)	Cluster implementation on mini Raspberry Pi computers using Round Robin Algorithm	Bali, Oktober 2019
12	AASEC	PID controller for a differential drive robot balancing system	Bandung, April 2019
13	AASEC	A study of a discrete Bayes and a Kalman filter computational Complexity and performance in the case of 1D robot localization	Bandung, April 2019
14	AASEC	The study of the wideband planar sleeve antenna	Bandung, April 2019

No	Nama Pertemuan Ilmiah/Seminar	Judul Artikel Ilmiah	Waktu dan Tempat
15	AASEC	Study of LoRa (Long Range) communication for monitoring of a ship electrical system	Bandung, April 2019
16	AASEC	An improved control method to reduce harmonic level for a single phase grid connected flyback micro-inverter of a small scale solar PV	Bandung, April 2019
17	AASEC	Glidding system for a fixed wing aircraft using PID control algorithm	Bandung, April 2019
18	AASEC	Designing, implementing and analysing optimal controllers on a non-linear reaction wheel pendulum	Bandung, April 2019
19	IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)	Study of Parasitic Element Effects of Multiband IFA for UHF and SHF Channel Systems	Bali, 2019
20	International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)	A Power Sharing Loop Control Method for Input-series Output-parallel Flyback type Micro-Inverter Using Droop Method	Jogyakarta, 2019

G. Karya Buku dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Buku	Penerbit	Tahun
1	Embedded System Berbasikan Beaglebone Black (ISBN: 978-602-19379-8-3)	Polinema Press	2016

H. Perolehan HKI dalam 5-10 Tahun Terakhir

No	Judul/Tema HKI	Tahun	Jenis	Nomor P/ID
1

	No	Judul/Tema HKI	Tahun	Jenis	Nomor P/ID
2
3

I. Pengalaman merumuskan Kebijakan Publik/Rekayasa Sosial Lainnya dalam 5 Tahun Terakhir

	No	Jenis Penghargaan	Institusi Pemberi Penghargaan	Tahun
1		Visiting Lecturer	Southern Taiwan University of Science and Technology	26 April – 1 Mei 2015
2		IEEE-RAS International Robot PRIDE Competition	IEEE-RAS Malaysia	17-18 Oktober 2015
3		Penyaji terbaik pada seminar hasil penelitian kompetitif nasional (2015) skema fundamental	Kemenristekdikti	2016
4		Invited Speaker ”International Symposium on Novel and Sustainable Technology”	Southern Taiwan University of Science and Technology	6-7 Oktober 2016
5		Invited Speaker “Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)”	Politeknik Negeri Malang	23-24 November 2017

No.	Tahun	Judul Pengabdian Kepada Masyarakat	Sumber Pendanaan
1	2014-2015	Sebagai Anggota dalam melaksanakan Pengabdian "Perakitan dan Instalasi Bel Sekolah MAN 1 Malang Menggunakan KIT BS13 serta Pelatihan Cara Pengoperasiannya"	Swadana P2M Polinema
2	2014-2015	Sebagai anggota dalam melaksanakan Pengabdian "Perakitan dan Pelatihan Jam Pengingat Waktu Sholat di Masjid Baitul Mukminin dusun Biru Desa Gunungrejo, Singosari."	Swadana P2M Polinema

Semua data yang saya isikan dan tercantum dalam biodata ini adalah benar dan dapat dipertanggung jawabkan secara hukum. Apabila dikemudian hari ternyata dijumpai ketidak sesuaian dengan kenyataan, saya sanggup menerima sanksi.

Demikian biodata ini saya buat dengan sebenarnya untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam pengajuan Penelitian skema Riset TERAPAN dengan judul "Aplikasi Software Prediksi dan Kontrol Infeksi Virus Covid19".

Malang, 6 Nopember 2022
Ketua Tim Pengusul

Indrazno Siradjuddin, ST., MT., PhD
NIP. 196404091994031002

Lampiran E. Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT)

