

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sungai Krueng Cunda yang membelah Kota Lhokseumawe, Provinsi Aceh, menanggung beban lingkungan yang tidak ringan. Di sepanjang alirannya, kawasan ini diapit oleh kompleks industri berskala besar seperti PT Arun LNG dan PT Pupuk Iskandar Muda, permukiman padat penduduk, serta hamparan lahan pertanian yang masing-masing menghasilkan limbah dengan karakteristik yang berbeda-beda. Kondisi ini bukan sekadar kekhawatiran teoritis. Penelitian terbaru tentang ekosistem estuari Krueng Cunda mengonfirmasi bahwa parameter fisika-kimia dan kandungan organik substrat di wilayah muara dipengaruhi secara nyata oleh aktivitas di sekitar aliran sungai, sehingga pemantauan kualitas air secara berkelanjutan menjadi kebutuhan yang mendesak (Ekamaida, 2025). Studi sebelumnya bahkan mencatat bahwa kawasan Lhokseumawe mengalami kontaminasi logam berat dengan tingkat polusi mencapai 53,6% di sejumlah titik, dengan aktivitas industri sebagai kontributor dominannya (Mahidin et al., 2020).

Persoalannya, metode pemantauan yang selama ini berjalan masih bertumpu pada pengambilan sampel secara manual. Cara ini memiliki kelemahan yang sulit ditutupi: deteksi pencemaran cenderung terlambat, cakupan pemantauan terbatas pada titik-titik tertentu saja, dan biaya operasionalnya tidak murah. *Sistem monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai alternatif yang lebih menjanjikan, dengan kemampuan mengumpulkan data secara otomatis, mentransmisikannya secara nirkabel, dan menyajikan analisis secara *real-time*. (Jayaraman et al., 2024) melaporkan bahwa *sistem monitoring* kualitas air berbasis IoT mampu mencapai akurasi hingga 95% dalam pengukuran parameter pH, kekeruhan, TDS, dan suhu, jauh melampaui akurasi metode konvensional yang hanya sekitar 85%.

Penerapan IoT telah meluas ke berbagai sektor, mulai dari otomasi proses industri (Meliala et al., 2024) hingga manajemen energi dan keamanan hunian (Nisa et al., 2025), menunjukkan fleksibilitas teknologi ini dalam menjawab kebutuhan

monitoring dan kontrol jarak jauh. Di antara berbagai pilihan teknologi komunikasi nirkabel untuk IoT, *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) menjadi yang paling relevan untuk aplikasi pemantauan lingkungan berskala luas. LPWAN memang dirancang untuk menjawab kebutuhan spesifik tersebut: jangkauan transmisi jauh, konsumsi daya sangat rendah, dan biaya perangkat yang terjangkau. Pasar LPWAN global sendiri terus tumbuh signifikan, mencapai 1,3 miliar koneksi pada tahun 2023 dan diproyeksikan menyentuh 3,5 miliar koneksi pada 2030 dengan laju pertumbuhan tahunan sebesar 23% (Omdia, 2024). Penerapan IoT untuk *monitoring* berbasis sensor telah banyak diterapkan pada berbagai konteks, mulai dari otomasi proses industri (Meliala et al., 2024) dan manajemen energi rumah tangga (Nisa et al., 2025), hingga pemantauan parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan secara *real-time* untuk mendukung pengambilan keputusan otomatis (Yulhana Irma et al., 2023). Pendekatan serupa relevan diterapkan untuk pemantauan kualitas air, khususnya di lingkungan yang minim infrastruktur listrik seperti koridor Sungai Krueng Cunda.

Dalam ekosistem LPWAN, dua teknologi yang paling banyak digunakan dan mendapat perhatian luas dari komunitas riset adalah LoRaWAN dan NB-IoT. LoRaWAN beroperasi pada spektrum tidak berlisensi dengan modulasi *Chirp Spread Spectrum*, memungkinkan siapa pun membangun jaringan mandiri tanpa bergantung pada operator. NB-IoT sebaliknya memanfaatkan infrastruktur jaringan seluler berlisensi yang sudah ada, sehingga menawarkan jaminan koneksi yang lebih terstandar, *Quality of Service* yang lebih terjamin, serta keamanan data dengan enkripsi berbasis AES 128-bit sesuai standar 3GPP TS 33.401. Hingga tahun 2023, NB-IoT telah dioperasikan oleh lebih dari 128 operator di 81 negara (Global mobile Suppliers Association, 2023).

Meski keduanya sudah banyak diteliti, perbandingan langsung antara LoRaWAN dan NB-IoT dalam konteks *monitoring* kualitas air sungai di wilayah tropis pesisir Indonesia, khususnya Aceh, masih sangat jarang ditemukan. Ini bukan hal sepele, karena performa kedua teknologi sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis lokal: topografi medan, kepadatan bangunan, hingga kondisi atmosferik setempat. Faktor jarak dan elevasi terrain terbukti secara signifikan memengaruhi

kualitas sinyal dan *Packet Delivery Rate* (Vejlgaard et al., 2017)(Singh et al., 2020). Artinya, hasil penelitian yang dilakukan di Eropa atau Asia Timur tidak bisa begitu saja diterapkan ke konteks Lhokseumawe, yang memiliki iklim tropis dengan kelembaban ekstrem, curah hujan tinggi, dan karakter pesisir yang khas (Souza et al., 2024)(Syed Taha et al., 2024).

Dari sisi *coverage*, LoRaWAN mampu menjangkau area luas namun performanya rentan terdegradasi oleh rintangan fisik, sedangkan NB-IoT yang bersandar pada infrastruktur BTS eksisting menjanjikan *coverage* yang lebih stabil di lingkungan urban. Dari sisi konsumsi energi, LoRaWAN terbukti lebih hemat untuk skenario transmisi data kecil yang tidak terlalu sering, dengan estimasi masa pakai baterai yang lebih panjang (Singh et al., 2020)(Ugwuanyi et al., 2021). Perbedaan-perbedaan ini menjadikan pemilihan teknologi bukan perkara mudah, dan keputusannya harus didasarkan pada analisis yang kontekstual, bukan asumsi umum.

Situasi di lapangan turut memperumit pilihan tersebut. Infrastruktur NB-IoT komersial hingga saat ini belum tersedia di Lhokseumawe, sebagaimana telah dikonfirmasi kepada pihak operator. Kondisi ini justru menjadi alasan kuat mengapa evaluasi berbasis simulasi diperlukan: untuk memprediksi bagaimana performa NB-IoT apabila kelak infrastrukturnya dibangun, sekaligus membandingkannya secara setara dengan LoRaWAN dalam kondisi geografis yang sama. Pendekatan simulasi menggunakan *data terrain* nyata dari *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) dan parameter teknis standar 3GPP merupakan metode yang valid dan lazim digunakan dalam studi perencanaan jaringan sebelum tahap implementasi fisik dilakukan (Vejlgaard et al., 2017).

Urgensi penelitian ini juga sejalan dengan komitmen global terhadap *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 6 yang menargetkan akses air bersih dan sanitasi layak bagi semua. Data Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) 2023 menunjukkan bahwa Provinsi Aceh memiliki nilai IKLH sebesar 78,53, yang meski tergolong baik secara agregat, menyiratkan masih adanya tekanan terhadap kualitas lingkungan di berbagai titik, termasuk badan air

(Badan Pusat Statistik, 2023). Kondisi ini menegaskan perlunya sistem pemantauan kualitas air yang berkelanjutan dan berbasis teknologi di wilayah Aceh.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi komparatif performa LoRaWAN dan NB-IoT melalui pendekatan simulasi penuh menggunakan Radio Mobile dan MATLAB, dengan *data terrain* SRTM wilayah Sungai Krueng Cunda sebagai basis analisis. Evaluasi mencakup dua aspek utama: karakteristik *coverage* propagasi sinyal di sepanjang aliran sungai, serta perbandingan estimasi konsumsi energi dan *battery lifetime* kedua teknologi pada skenario *monitoring* kualitas air periodik. Hasil penelitian ini diharapkan menghasilkan rekomendasi berbasis data yang dapat menjadi acuan pemilihan teknologi LPWAN, baik untuk Lhokseumawe maupun wilayah-wilayah lain di Indonesia yang menghadapi kondisi serupa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, permasalahan penelitian yang akan dikaji dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik *coverage* jaringan LoRaWAN dan NB-IoT di sepanjang Sungai Krueng Cunda, ditinjau dari nilai *path loss*, *fade margin*, dan persentase cakupan per zona, berdasarkan simulasi Radio Mobile menggunakan data *terrain* SRTM resolusi 30 meter?
2. Bagaimana perbandingan konsumsi energi per siklus transmisi dan estimasi *battery lifetime* antara LoRaWAN pada berbagai konfigurasi *Spreading Factor* dan NB-IoT dengan mekanisme *Power Saving Mode*, pada skenario *monitoring* kualitas air dengan interval transmisi 15 menit?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis dan membandingkan karakteristik *coverage* LoRaWAN dan NB-IoT di sepanjang Sungai Krueng Cunda melalui simulasi Radio Mobile berbasis data *terrain* SRTM, mencakup nilai *path loss*, *fade margin*, dan persentase cakupan pada tiga zona karakteristik lingkungan yang telah ditetapkan.

2. Membandingkan konsumsi energi per siklus transmisi dan estimasi *battery lifetime* LoRaWAN dan NB-IoT secara teoritis berdasarkan spesifikasi *datasheet* komponen masing-masing teknologi, pada skenario *monitoring* kualitas air dengan interval transmisi 15 menit.

1.4 Batasan Penelitian

Untuk memfokuskan ruang lingkup penelitian dan memastikan hasil yang terukur, ditetapkan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini sepenuhnya berbasis simulasi menggunakan Radio Mobile dan MATLAB, tanpa pembangunan prototipe maupun pengujian lapangan di Sungai Krueng Cunda. Parameter LoRaWAN mengacu pada spesifikasi modul SX1276 dan regulasi AS923, sedangkan parameter NB-IoT mengacu pada standar 3GPP Release 14 dan *datasheet* modul Quectel BC95-G.
2. Lokasi penelitian dibatasi pada segmen Sungai Krueng Cunda sepanjang sekitar 15–20 km di Kota Lhokseumawe, yang dibagi menjadi tiga zona: *vegetated/rural*, *urban-residential*, dan *coastal-dense settlement*. Data *terrain* bersumber dari SRTM dengan resolusi 30 meter (*tile* N05E097).
3. Model propagasi yang digunakan adalah Okumura-Hata, yang valid pada rentang frekuensi 150–1.500 MHz, sehingga mencakup frekuensi operasi kedua teknologi yang dibandingkan.
4. Teknologi yang dibandingkan terbatas pada LoRaWAN (versi 1.0.4, frekuensi AS923, *Class A*) dan NB-IoT (3GPP Release 14, *Band* 8, 900 MHz). Teknologi LPWAN lain seperti Sigfox, LTE-M, dan Wi-Fi HaLow tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.
5. Analisis konsumsi energi LoRaWAN dihitung berdasarkan spesifikasi arus modul SX1276 untuk konfigurasi SF7 hingga SF12, mencakup empat fase operasional: akuisisi sensor, transmisi, penerimaan *acknowledgment*, dan *deep sleep*. Analisis NB-IoT dihitung berdasarkan *datasheet* Quectel BC95-G dengan memperhitungkan mekanisme *Power Saving Mode* (PSM) sesuai standar 3GPP Release 14.
6. Lima parameter kualitas air yang menjadi acuan skenario *monitoring* pH, *dissolved oxygen*, kekeruhan, suhu, dan konduktivitas dipilih berdasarkan baku

mutu air Kelas II dalam PP No. 22 Tahun 2021. Parameter-parameter ini digunakan sebagai dasar penentuan ukuran *payload* dan interval transmisi dalam simulasi, bukan sebagai data yang diukur langsung di lapangan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat bagi beberapa pihak sebagai berikut:

a. Manfaat Akademis

1. Menambah referensi ilmiah berupa data perbandingan berbasis simulasi antara LoRaWAN dan NB-IoT dalam konteks pemantauan lingkungan di wilayah pesisir tropis, khususnya di daerah yang infrastruktur NB-IoT-nya belum tersedia secara komersial.
2. Menghasilkan gambaran karakteristik propagasi radio di koridor Sungai Krueng Cunda yang dapat menjadi acuan awal bagi penelitian lanjutan di bidang perencanaan jaringan LPWAN di Kota Lhokseumawe.
3. Memperkaya literatur ilmiah mengenai pendekatan evaluasi berbasis simulasi penuh untuk teknologi LPWAN di negara berkembang, di mana keterbatasan infrastruktur menjadi kendala nyata yang harus diperhitungkan dalam perancangan sistem IoT.

b. Manfaat Praktis

1. Memberikan bahan pertimbangan berbasis data bagi pemerintah daerah, PDAM, atau instansi terkait di Kota Lhokseumawe dalam memilih teknologi LPWAN yang sesuai untuk sistem monitoring kualitas air.
2. Memberikan gambaran estimasi konsumsi energi dan umur baterai pada berbagai konfigurasi *Spreading Factor* sebagai panduan teknis awal dalam merancang sistem sensor IoT berbasis LPWAN untuk aplikasi lingkungan.

c. Manfaat bagi Institusi Pendidikan

1. Menjadi referensi bagi mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Universitas Malikussaleh, khususnya yang meneliti di bidang komunikasi nirkabel, IoT, dan pemantauan lingkungan berbasis teknologi.

2. Mendorong pemanfaatan pendekatan simulasi sebagai alternatif penelitian yang efisien dan valid di lingkungan akademik, terutama ketika keterbatasan peralatan atau infrastruktur menjadi kendala.

1.6 Sistematika Penulisan

Tugas Akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan kajian penelitian terdahulu yang relevan serta landasan teori yang menjadi dasar penelitian, meliputi konsep IoT, teknologi LPWAN, arsitektur LoRaWAN dan NB-IoT, parameter kualitas air, model propagasi radio Okumura-Hata, dan teori konsumsi energi perangkat IoT.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan lokasi dan waktu penelitian, desain dan tahapan penelitian, konfigurasi simulasi Radio Mobile dan MATLAB, parameter teknis yang digunakan, serta metode analisis *coverage* dan perhitungan konsumsi energi untuk kedua teknologi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi *coverage* LoRaWAN dan NB-IoT di sepanjang Sungai Krueng Cunda, hasil analisis konsumsi energi dan estimasi *battery lifetime*, serta pembahasan komparatif antara kedua teknologi berdasarkan data yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang menjawab rumusan masalah penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat seluruh referensi yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini.