

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian lapangan yang telah dilakukan menggunakan metode *PPDIOO*, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Keberhasilan Desain dan Implementasi. *Prototype* sistem komunikasi *monitoring* data banjir berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan mengintegrasikan protokol *Delay Tolerant Network (DTN)* di atas teknologi *Long Range (LoRa)*. Sistem ini dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan modul LoRa SX1276 dan menjalankan *stack* protokol *dtn7zero (BPv7)*. Penerapan mekanisme *Store-Carry-Forward* pada topologi yang terdiri dari *Node Fixed*, *Node Relay*, dan *Node Gateway* terbukti mampu menjembatani pengiriman data secara mandiri tanpa bergantung pada infrastruktur seluler.
2. Efektivitas mekanisme *mobile relay* pada *LoRa*. Penelitian ini membuktikan bahwa tantangan utama dalam komunikasi *mobile relay* adalah keterbatasan jendela kontak (*contact window*). Konfigurasi *LoRa* dengan *Spreading Factor* rendah (*SF7*) dan *Coding Rate* tinggi ($4/7$) terbukti menjadi konfigurasi paling optimal dengan *Packet Delivery Ratio (PDR)* mencapai 100% dan latensi paling rendah (27 menit). Sebaliknya, penggunaan *SF* tinggi (*SF11*) pada node bergerak menyebabkan kegagalan *transfer* data karena *Time on Air* yang terlalu lama melebihi durasi pertemuan antar *node*.
3. Ketahanan protokol *DTN* pada beban tinggi. Pada skenario *fixed relay* dengan jangkauan luas (*SF11*), protokol *Delay Tolerant Network (DTN)* terbukti mampu menjaga integritas data dimana *PDR* mencapai 100% meski terjadi saturasi antrean yang menyebabkan lonjakan latensi hingga lebih dari 17 menit. Mekanisme *Store-Carry-Forward* berhasil menyimpan paket dalam *buffer* saat jalur komunikasi terhambat oleh siklus switching *RX-TX* maupun transmisi lambat, membuktikan keandalannya.

5.2. Keterbatasan Penelitian

Meskipun tujuan penelitian telah tercapai, sistem ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil maupun sebagai acuan pengembangan selanjutnya:

1. Prototipe *node* saat ini hanya mengandalkan baterai Lithium Polymer tanpa adanya fitur manajemen daya tingkat lanjut atau mekanisme *energy harvesting*, sehingga durasi operasional jangka panjang di lapangan belum teruji secara langsung.
2. Sistem belum mengimplementasikan fitur keamanan seperti enkripsi *bundle* atau autentikasi *node*, sehingga data yang ditransmisikan masih rentan terhadap penyadapan oleh pihak yang tidak berwenang.
3. Pengujian dilakukan dalam skenario simulasi pada kondisi cuaca normal, bukan pada kondisi bencana banjir sebenarnya yang mungkin memiliki faktor lingkungan ekstrem seperti kelembapan sangat tinggi atau halangan fisik yang dapat mempengaruhi rambatan sinyal.
4. Pengujian terbatas pada empat unit node (1 *fixed*, 2 *relay*, 1 *gateway*) dengan mekanisme *routing* sederhana yaitu *epidemic flooding*. Kinerja protokol *routing* dan manajemen *buffer* pada skala jaringan yang lebih besar masih belum diketahui.
5. *Node* menggunakan penyimpanan berbasis SRAM 520KB untuk fungsi *SimpleInMemoryStorage* dengan batasan *hard-limit* sejumlah 20 *bundle* untuk mencegah *memory crash*. Hal ini membatasi jumlah data yang dapat disimpan saat terjadi jeda koneksi yang panjang.
6. Penggunaan siklus *receive-transmit switching (RX-TX)* yang statis sebanyak 30 detik pada *node relay* menyebabkan penumpukan antrean saat lalu lintas data rendah atau sangat tinggi, berpengaruh pada latensi *end-to-end*.
7. Penelitian ini berfokus pada lapisan sistem komunikasi data *back-end* dan belum menyediakan sistem antarmuka pengguna atau *dashboard* visualisasi bagi *end user*.

5.3. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan keterbatasan yang ada, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Disarankan untuk mengganti mekanisme penyimpanan *SimpleInMemoryStorage* dengan media penyimpanan eksternal seperti modul SD Card. Hal ini diperlukan untuk mengatasi batasan kapasitas *hard-limit* sejumlah 20 *bundle* agar *node* dapat menampung lebih banyak *bundle* data tanpa risiko kehilangan data akibat *memory crash* atau kehabisan daya.
2. Pengembangan algoritma *switching receive-transmit (RX-TX)* yang dinamis sangat disarankan. Durasi mode terima dan kirim pada *node relay* sebaiknya tidak statis, melainkan beradaptasi secara cerdas berdasarkan volume antrean untuk mengurangi latensi *end-to-end* yang berlebihan.
3. Mengingat data kebencanaan bersifat penting, perlu diterapkan *Bundle Security Protocol (BSP)* untuk menjamin kerahasiaan dan integritas data, sehingga sistem aman dari potensi manipulasi oleh pihak tidak berwenang.
4. Untuk pengembangan skala besar, disarankan mengimplementasikan algoritma *routing DTN* berbasis probabilitas atau *history* pertemuan seperti *PROPHET* atau *Spray and Wait* guna meningkatkan efisiensi pengiriman paket dibandingkan metode *flooding* sederhana.
5. Pengembangan selanjutnya sebaiknya mencakup pembuatan sistem *user interface* atau *dashboard* sistem informasi geografis yang terintegrasi, sehingga data yang diterima *gateway* dapat divisualisasikan menjadi informasi peringatan dini yang mudah dipahami oleh pengambil keputusan.
6. Mengingat tantangan propagasi sinyal *Non-Line-of-Sight* di lingkungan padat Surabaya, disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan menggunakan antena dengan *gain* yang lebih tinggi atau penempatan *gateway* pada elevasi yang lebih tinggi untuk memperluas cakupan area.
7. Disarankan untuk menerapkan mekanisme *deep sleep* pada mikrokontroler atau algoritma *duty cycle* yang efisien, serta mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti panel surya untuk mendukung operasional jangka panjang di lapangan.