

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Jakarta dalam beberapa tahun terakhir sedang bergerak menuju kota dengan sistem transportasi massal yang lebih terstruktur dan terintegrasi. Berbagai proyek infrastruktur transportasi dibangun sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi dan menjawab persoalan kemacetan yang hampir setiap hari terjadi. Di tengah perubahan tersebut, muncul pola baru perjalanan harian masyarakat yang tidak lagi hanya mengandalkan satu jenis kendaraan, tetapi memanfaatkan kombinasi beberapa kendaraan sekaligus. Kondisi ini membuat peran sistem transportasi terintegrasi menjadi sangat penting, bukan hanya sebagai sarana mobilitas, tetapi juga sebagai tulang punggung aktivitas ekonomi dan sosial di wilayah Jakarta dan sekitarnya.

Salah satu elemen utama dari transportasi terintegrasi di Jakarta adalah *Mass Rapid Transit* Jakarta, yang dirancang sebagai jalur angkutan massal berbasis rel di koridor utama kota. MRT menghubungkan kawasan pemukiman dan pusat bisnis dengan waktu tempuh yang relatif lebih pasti dibandingkan kendaraan berbasis jalan raya. Sementara, *Light Rail Transit* berfungsi menghubungkan kawasan penyangga seperti Bekasi dan Depok dengan titik-titik strategis di Jakarta, sehingga mempermudah pergerakan komuter yang setiap hari masuk-keluar kota. Selain itu Kereta Rel Listrik Commuter Line masih menjadi tulang punggung mobilitas harian jutaan penumpang dari Bogor, Tangerang, Bekasi, dan wilayah sekitarnya yang bekerja atau beraktivitas di Jakarta. Jaringan ini kemudian dilengkapi dengan kereta bandara yang melayani konektivitas menuju dan dari Bandara Soekarno-Hatta, serta berbagai mode angkutan lingkungan seperti bus, angkot, maupun layanan ojek daring yang mengantarkan penumpang dari dan ke stasiun-stasiun tersebut.

Di tingkat global, sejumlah kota besar dunia yang juga mengoperasikan sistem MRT atau metro sudah lebih dahulu mengembangkan berbagai mekanisme penyampaian informasi darurat kepada penumpang. Singapura, Tokyo, Seoul, dan London, misalnya, sama-sama bergantung pada jaringan kereta perkotaan yang padat dan terintegrasi seperti Jakarta, sehingga sangat memperhatikan aspek

keamanan dan respons insiden. Namun, pola solusi yang diambil umumnya masih bertumpu pada infrastruktur komunikasi yang relatif stabil, seperti sistem *public address*, *passenger information display*, serta jaringan telekomunikasi yang tersentralisasi. Hal ini membuat mereka sangat kuat ketika listrik dan jaringan tetap berfungsi normal, tetapi belum tentu relevan jika gangguan sudah merambat sampai pada infrastruktur komunikasi dasar.

Singapura sering dijadikan rujukan karena pengelolaan transportasi publiknya yang terintegrasi dan sangat mengutamakan keandalan informasi bagi penumpang. *Land Transport Authority* (LTA) dan operator setempat terus memperbarui sistem informasi penumpang di stasiun dan halte, misalnya dengan pemasangan layar digital berukuran besar yang menampilkan informasi kedatangan, gangguan layanan, dan pengalihan rute secara real-time. Selain itu, LTA mengembangkan *Rail Incident Management System* yang membantu petugas mengoordinasikan penanganan insiden dan menyebarkan informasi gangguan secara cepat melalui saluran resmi. Dari sini terlihat bahwa fokus utama Singapura adalah memastikan alur informasi yang cepat dan konsisten selama infrastruktur pusat (pusat kendali operasi, jaringan data, dan perangkat stasiun) masih dapat berfungsi dengan baik [27].

Tokyo sebagai salah satu kota dengan jaringan metro tersibuk di dunia juga memiliki tradisi panjang dalam manajemen bencana, terutama gempa bumi. Tokyo Metro mengintegrasikan berbagai langkah pencegahan, seperti penghentian otomatis kereta ketika sensor seismik mendeteksi guncangan kuat, diikuti penyampaian instruksi keselamatan melalui pengeras suara di kereta dan stasiun, serta penayangan pesan panduan pada papan informasi elektronik. Sistem ini dirancang agar penumpang segera mengetahui apa yang harus dilakukan pada menit-menit pertama setelah kejadian, namun tetap mengandalkan ketersediaan listrik, jaringan komunikasi internal, dan koordinasi terpusat dari pusat kendali operasi [24].

Seoul Metropolitan Subway juga menunjukkan perhatian yang besar terhadap aspek keselamatan dan kenyamanan penumpang. Berbagai program peningkatan kualitas lingkungan stasiun seperti pengendalian kualitas udara, perbaikan fasilitas, dan pemanfaatan CCTV serta *public address* didorong untuk

menciptakan pengalaman perjalanan yang aman dan nyaman. Sistem informasi penumpang di jaringan metro Seoul pada dasarnya mengikuti pola yang mirip: informasi gangguan, pengalihan, dan instruksi keselamatan disampaikan melalui pengumuman suara dan layar informasi yang terhubung dengan pusat kendali. Sekali lagi, arsitektur yang digunakan masih sangat bergantung pada keberlangsungan infrastruktur jaringan yang relatif stabil [25].

Di London, jaringan London *Underground* dan jaringan rail sekitarnya juga telah mengimplementasikan berbagai perangkat komunikasi darurat di stasiun maupun di dalam kereta. Hampir semua stasiun dilengkapi *help point* yang menghubungkan penumpang langsung dengan petugas stasiun atau pusat operasi jika terjadi keadaan darurat, disertai sistem *public address* dan papan informasi elektronik yang dapat digunakan untuk menyampaikan instruksi evakuasi maupun informasi gangguan layanan. Pendekatan ini terbukti efektif untuk mengelola insiden sehari-hari, seperti gangguan teknis, penutupan sementara peron, sampai situasi evakuasi lokal, selama jaringan listrik dan komunikasi pendukung tetap dapat dioperasikan [26].

Dari gambaran beberapa kota tersebut dapat dilihat bahwa solusi yang ada cenderung berorientasi pada real-time information system yang bergantung pada konektivitas jaringan yang relatif stabil dan terpusat. Belum banyak kajian yang secara eksplisit mengeksplorasi skenario ketika kedua lapis infrastruktur baik transportasi maupun komunikasi terganggu sekaligus, misalnya akibat bencana berskala besar yang memutus listrik, merusak base transceiver station (BTS), atau membuat jaringan seluler lumpuh sementara di kawasan tertentu. Di titik inilah penelitian ini mengembangkan bukan untuk menyaingi sistem informasi darurat yang sudah mapan di kota-kota tersebut, tetapi untuk menawarkan pendekatan alternatif berbasis *Delay Tolerant Network* sebagai *fallback* ketika saluran komunikasi konvensional tidak lagi dapat diandalkan, dengan studi kasus yang difokuskan pada ekosistem transportasi terintegrasi di Jakarta.

Dalam praktiknya, satu rangkaian perjalanan masyarakat sering kali melibatkan beberapa moda kendaraan sekaligus. Seorang penumpang dapat berangkat dari rumah menggunakan ojek daring atau angkutan lokal, kemudian naik KRL hingga stasiun tertentu, berpindah ke MRT atau LRT di stasiun transit, dan

melanjutkan perjalanan dengan berjalan kaki atau menggunakan transportasi pengumpulan menuju lokasi tujuan. Perpindahan antarmoda ini difasilitasi melalui stasiun transit terpadu, integrasi tarif, serta penyesuaian jadwal sehingga perpindahan antarlayanan menjadi lebih mulus. Pola perjalanan yang saling terhubung ini membuat setiap gangguan di salah satu moda berpotensi menimbulkan efek berantai terhadap moda lain, sehingga kebutuhan akan koordinasi dan penyebaran informasi yang cepat dan konsisten lintas moda menjadi sangat penting.

Jakarta sebagai ibu kota negara sekaligus pusat kegiatan ekonomi Indonesia memiliki dinamika mobilitas yang sangat tinggi. Setiap hari jutaan orang berpindah dari kawasan penyangga menuju pusat kota untuk bekerja, bersekolah, maupun melakukan aktivitas lainnya. Untuk menampung arus pergerakan tersebut, pemerintah provinsi dan pemerintah pusat mengembangkan berbagai moda transportasi massal seperti MRT Jakarta, LRT Jabodebek, KRL Commuter Line, serta jaringan kereta bandara dan moda pengumpulan/angkutan lingkungan. Berbagai moda ini tidak berdiri sendiri, tetapi saling terhubung melalui skema transportasi terintegrasi, misalnya melalui stasiun transit terpadu, integrasi tarif, maupun penyesuaian jadwal. Dalam kondisi normal, integrasi ini sangat membantu mengurangi kemacetan dan memberikan alternatif perjalanan yang lebih cepat dan nyaman bagi masyarakat.

Di sisi lain, Jakarta juga dikenal sebagai kota yang memiliki tingkat kerentanan bencana yang cukup tinggi. Banjir musiman, kebakaran pemukiman padat, hingga gempa bumi merupakan ancaman yang hampir setiap tahun tercatat oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) DKI Jakarta dengan jumlah kejadian yang mencapai ratusan kasus per tahun. Ketika bencana terjadi, fasilitas publik termasuk jaringan jalan dan prasarana transportasi sangat mungkin terdampak. Genangan banjir dapat menutup akses ke stasiun, kebakaran dapat memutus aliran listrik di sebagian kawasan, sementara gempa berpotensi merusak struktur bangunan dan sistem pendukung operasi transportasi. Dalam situasi tersebut, penghentian sementara layanan, perubahan rute, atau pengalihan penumpang sering kali harus dilakukan dengan cepat demi keselamatan pengguna.

Permasalahan muncul ketika kebutuhan penyebaran informasi darurat yang cepat dan akurat tidak diiringi dengan ketersediaan infrastruktur komunikasi yang andal. Sistem informasi resmi operator transportasi saat ini umumnya mengandalkan jaringan seluler maupun internet untuk mengirimkan notifikasi, baik melalui aplikasi, situs web, maupun media sosial. Pada kondisi krisis, jaringan seluler berpotensi mengalami kepadatan trafik yang sangat tinggi karena masyarakat secara bersamaan melakukan panggilan, mengirim pesan, dan mengakses internet. Selain itu, kerusakan fisik pada menara BTS atau pemadaman listrik dapat menyebabkan sebagian wilayah kehilangan sinyal. Akibatnya, pesan peringatan atau instruksi darurat yang seharusnya segera diterima penumpang dan petugas di lapangan menjadi tertunda, bahkan gagal terkirim.

Dalam hal inilah pendekatan Delay Tolerant Network (DTN) menjadi relevan untuk dipertimbangkan. DTN dirancang untuk lingkungan jaringan yang ditandai oleh koneksi yang tidak stabil, sering terputus, dan memiliki *delay* yang tinggi. Daripada mengandalkan koneksi *end-to-end* yang selalu tersedia, DTN menerapkan mekanisme *store-carry-and-forward*, yaitu pesan disimpan terlebih dahulu di node pengirim, kemudian “dibawa” oleh node tersebut hingga bertemu node lain yang dapat meneruskan pesan, dan proses ini berulang sampai pesan tiba di tujuan. Pada skenario transportasi terintegrasi, node-node DTN dapat direpresentasikan oleh kereta MRT, LRT, KRL, kereta bandara, maupun perangkat penumpang yang bergerak di sekitar stasiun. Pola pergerakan moda transportasi yang relatif terjadwal dan berulang justru dapat dimanfaatkan sebagai jalur oportunistik untuk membawa pesan darurat melintasi jaringan, bahkan ketika koneksi seluler sedang terganggu.

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi pemanfaatan DTN pada skenario kebencanaan maupun lingkungan urban yang dipecah menjadi permasalahan lebih kecil. Beberapa pendekatan *propagation-aware* mencoba menyesuaikan strategi routing berdasarkan pola penyebaran node sehingga efisiensi pengiriman meningkat pada jaringan yang sering terputus [1]. Algoritma *Spray and Wait* menawarkan mekanisme yang sederhana dengan cara mendistribusikan sejumlah salinan pesan ke beberapa node dan kemudian “menunggu” hingga salah satu salinan bertemu tujuan [2]. Pendekatan ini relatif efisien, namun dapat

melambat pada lingkungan dengan mobilitas tinggi dan pola pertemuan node yang tidak merata. Di sisi lain, algoritma Epidemic melakukan replikasi pesan secara agresif kepada setiap node yang ditemui sehingga peluang pengantaran memang tinggi, tetapi mengorbankan kapasitas *buffer* dan *bandwidth* jaringan [3].

Pengembangan lebih lanjut muncul melalui algoritma PRoPHET dan PRoPHETv2 yang memperkenalkan konsep *delivery predictability*, yaitu ukuran probabilistik yang menggambarkan seberapa besar peluang sebuah node berhasil mengantarkan pesan ke tujuan [2]. Setiap kali dua node bertemu, nilai probabilitas ini diperbarui berdasarkan frekuensi dan pola pertemuan sebelumnya. PRoPHETv2 mampu meningkatkan *delivery probability* dibandingkan beberapa algoritma lain karena proses *forwarding* tidak lagi buta, melainkan mempertimbangkan kesejarahan kontak. Namun demikian, pada kondisi kepadatan node tertentu dan intensitas trafik yang tinggi, *overhead* dan jumlah *forwarding* pesan dapat meningkat signifikan karena pesan cenderung mengikuti jalur-jalur yang sering dilalui, tetapi belum tentu paling efisien dari sisi penggunaan sumber daya.

Jika dikaitkan dengan Jakarta, celah penelitian masih terlihat cukup jelas. Sebagian besar studi yang mengevaluasi algoritma routing DTN hanya menggunakan skenario mobilitas generik atau peta kota secara sederhana, belum secara spesifik memodelkan karakteristik jaringan transportasi terintegrasi yang terdiri atas MRT, LRT, KRL, dan moda penghubung. Padahal, ekosistem ini memiliki karakter kontak yang sangat khas, kereta bergerak pada lintasan tetap dengan jadwal yang relatif ketat, stasiun menjadi titik temu berbagai moda kendaraan, dan penumpang bergerak dinamis di sekitar koridor transit. Pola ini menimbulkan hubungan yang asimetris antara node. Misalnya, kereta antarkota yang jarang berhenti di stasiun tertentu tetapi membawa banyak penumpang, atau sebaliknya, stasiun kecil yang sering dilalui tetapi dengan durasi berhenti yang singkat. Belum banyak penelitian yang secara eksplisit mengoptimalkan algoritma routing DTN untuk memanfaatkan karakteristik unik tersebut, khususnya untuk kasus penyebaran *emergency alert* pada kondisi gangguan layanan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini ingin mengembangkan algoritma routing yang dapat mengontrol jumlah replika pesan dengan fitur *delivery predictability* yang mengarahkan salinan yang tersisa ke node-node yang secara

historis paling berpotensi menyampaikan pesan ke tujuan. Harapannya, pendekatan *routing protocol* ini hanya mengirim salinan pesan ke node berdasarkan histori kontak yang berpotensi meningkatkan jumlah pesan yang diterima oleh node tujuan, tetapi *overhead* tetap terkendali dan *latency* tidak terlalu besar. Evaluasi dilakukan menggunakan The ONE Simulator dengan skenario mobilitas yang disusun berdasarkan lintasan dan jadwal MRT, LRT, KRL, serta pejalan kaki dan kendaraan penghubung, tanpa memasukkan layanan BRT yang masih terus berkembang. Kinerja algoritma diukur melalui metrik utama DTN, yaitu *Delivery Probability*, *Overhead Ratio*, *Latency Average*, dan *Hop Count Average* pada berbagai variasi interval pembuatan pesan.

Dengan adanya pengembangan dan pengujian algoritma ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih realistik mengenai bagaimana DTN dapat dimanfaatkan sebagai lapisan komunikasi cadangan bagi sistem transportasi Jakarta ketika jaringan konvensional terganggu. Secara jangka panjang, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu dasar bagi pengembangan sistem peringatan dini yang lebih tangguh, sehingga keselamatan dan kesiapsiagaan masyarakat di kawasan perkotaan padat seperti Jakarta dapat semakin terjamin, baik dalam kondisi normal maupun pada saat terjadi bencana.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat disimpulkan permasalahan yang akan dibahas adalah bagaimana mengembangkan *routing* protokol untuk meningkatkan performa DTN sebagai *emergency message alert* pada transportasi terintegrasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Bagaimana mengembangkan routing protokol berbasis *History Predictability Spray and Wait* untuk meningkatkan performa *Delay Tolerant Network* (DTN) sebagai *emergency message alert* pada sistem transportasi terintegrasi di Kota Jakarta?
- b. Sejauh mana routing protokol *History Predictability Spray and Wait* yang diusulkan mampu memperbaiki performa DTN jika dibandingkan dengan protokol baseline ditinjau dari: delivery

probability, overhead ratio, latency average, dan hop count average?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah:

- a. Merancang algoritma *routing* berdasarkan pembatasan jumlah pesan dan histori kontak untuk penyebaran peringatan darurat pada jaringan DTN multimoda Jakarta.
- b. Menyusun model simulasi di The ONE Simulator yang merepresentasikan mobilitas MRT, LRT, KRL beserta agen penghubung (pejalan/kendaraan pengumpan), tanpa memasukkan BRT.
- c. Mengevaluasi kinerja *router* yang dikembangkan terhadap *baseline* pada metrik inti DTN di berbagai interval pembuatan pesan.
- d. Merumuskan rekomendasi konfigurasi (parameter kunci) yang menyeimbangkan *delivery*, latensi, dan *overhead* untuk konteks darurat perkotaan.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

- a. Kontribusi desain *router* yang memadukan kontrol replika dan predikabilitas kontak, beserta bukti empirisnya pada skenario multimoda urban.
- b. Panduan implementatif untuk penyebaran peringatan darurat pada sistem transportasi terintegrasi Jakarta ketika jaringan konvensional terganggu.
- c. Rekomendasi parameter agar operator dapat meningkatkan keandalan informasi tanpa membebani sumber daya jaringan.

### 1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan evaluasi algoritma *routing* untuk *Delay Tolerant Network* (DTN) dalam mendukung penyebaran informasi darurat pada sistem transportasi terintegrasi di kota Jakarta. Ruang lingkup penelitian mencakup:

- a. Fokus pada perancangan dan evaluasi algoritma *routing* DTN untuk penyebaran informasi darurat di ekosistem MRT, LRT, KRL dan moda pengumpan. BRT/TransJakarta tidak dibahas.

- b. Metrik yang dianalisis: *Delivery Probability*, *Overhead Ratio*, *Latency Average*, dan *Hop Count Average* pada beberapa interval pembuatan pesan
- c. Perbandingan terhadap algoritma baseline: Epidemic, *Spray-and-Wait*, PRoPHETv2..

Penelitian ini tidak mencakup implementasi algoritma secara langsung pada sistem transportasi nyata, melainkan fokus pada simulasi dan analisis performa algoritma dalam lingkungan yang telah dimodelkan.

### 1.6. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan dan evaluasi komunikasi darurat berbasis *Delay Tolerant Network* (DTN) di ekosistem transportasi terintegrasi Jakarta melalui dua aspek utama, yaitu kontribusi metode dan kontribusi skenario. Dari sisi metode, penelitian ini mengusulkan *router History Predictability Spray and Wait* sebagai pendekatan hibrida yang menggabungkan pembatasan replika ala *Spray and Wait* pada fase awal dengan seleksi *forwarding* berbasis *delivery predictability* ala PRoPHETv2 pada fase salinan terakhir, sehingga peningkatan peluang pengantaran dicapai tanpa mengandalkan *flooding* yang boros sumber daya. Dari sisi skenario, penelitian ini menyusun simulasi yang lebih mendekati konteks nyata transportasi terintegrasi (MRT/LRT/KRL beserta *node* penghubung seperti pejalan kaki dan kendaraan jalan) dengan pemodelan mobilitas berbasis lintasan, perbedaan kapasitas buffer antar tipe *node*, dan beban *trafik* periodik yang merepresentasikan pembaruan informasi darurat. Selain itu, penelitian ini juga menambahkan analisis sensitivitas *bandwidth* untuk menilai *robustness* kinerja *router* pada kapasitas *link* yang berbeda, sehingga temuan yang dihasilkan tidak hanya berlaku pada satu konfigurasi jaringan, tetapi lebih relevan untuk variasi kondisi komunikasi di lapangan.