

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, serta pengujian simulasi pada The ONE Simulator dalam skenario transportasi terintegrasi Jakarta, maka kesimpulan penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- a. Penelitian ini berhasil mengembangkan *routing* protokol *History Predictability Spray and Wait* sebagai *router* usulan untuk mendukung penyebaran *emergency alert* pada skenario transportasi terintegrasi Jakarta di The ONE Simulator. Pengembangan dilakukan dengan merancang mekanisme hibrida dua fase yang menggabungkan kekuatan dua pendekatan: pembatasan replikasi (efisiensi sumber daya) dan pemilihan *forwarding* berbasis histori kontak (ketepatan jalur). Pada fase pertama (*spray phase*), *router* mengadopsi prinsip *Spray and Wait* dengan membatasi jumlah salinan awal pesan ($L = 6$) dan menggunakan *binary spray*, sehingga replikasi tidak berkembang tak terkendali seperti *flooding*. Mekanisme ini dipilih karena pada lingkungan DTN perkotaan yang padat, replikasi yang terlalu agresif berpotensi memperbesar beban *buffer* dan meningkatkan peluang drop pesan.

Selanjutnya pada fase kedua (*selective phase*), ketika salinan tersisa satu, *router* tidak sekadar “menunggu” secara pasif, namun melakukan *forwarding* secara selektif menggunakan konsep *delivery predictability* dari PROPHETv2. Artinya, salinan terakhir hanya dipindahkan jika *node* tetangga memiliki peluang antar yang lebih baik menuju tujuan, sehingga jalur pengiriman menjadi lebih terarah dan mengurangi *forwarding* yang tidak produktif. Pada implementasi *router* usulan, seleksi ini dipandu oleh ambang peningkatan peluang ($\Delta / \text{delta} = 0,10$) agar perpindahan salinan terakhir tidak terjadi jika peningkatan probabilitas terlalu kecil (menghindari “bolak-balik” yang tidak memberikan keuntungan nyata).

Untuk menjaga validitas internal pengujian dan membuat analisis kinerja lebih mudah ditelusuri, parameter adaptif tambahan seperti $pThresh = 0,00$ dan $denseConnThreshold = 0$ sengaja dinonaktifkan pada eksperimen

utama. Keputusan ini memastikan bahwa perubahan performa yang muncul terutama disebabkan oleh mekanisme inti *router* usulan (*spray* terbatas + *forwarding* selektif), bukan oleh kombinasi banyak fitur adaptif yang berjalan bersamaan. Dengan demikian, kontribusi desain *router* dapat dijelaskan secara lebih “bersih” dan terukur.

- b. Berdasarkan pengujian simulasi pada skenario transportasi terintegrasi Jakarta, *router* usulan *History Predictability Spray and Wait* terbukti mampu meningkatkan performa DTN dibanding protokol *baseline* (Epidemic, PRoPHET, PRoPHETv2, dan *Spray and Wait*), khususnya dari sisi keberhasilan pengantaran (*delivery probability*) dengan *trade-off* yang masih wajar pada metrik lain. Evaluasi dilakukan pada variasi beban *trafik* melalui interval pembuatan pesan 10–20 detik, sehingga dapat diamati bagaimana *router* bekerja pada kondisi jaringan lebih “padat” (interval kecil) hingga lebih “longgar” (interval besar).

Dari sisi *delivery probability* secara rata-rata *History Predictability Spray and Wait* mencapai $\approx 0,392$ (39,2%), lebih tinggi daripada PRoPHETv2 $\approx 0,333$, *Spray and Wait* $\approx 0,337$, PRoPHET $\approx 0,317$, dan Epidemic $\approx 0,242$. Ini menunjukkan bahwa strategi replikasi terbatas di awal membantu menyebarkan pesan ke beberapa jalur potensial, sementara strategi seleksi *forwarding* berbasis histori kontak di akhir membantu “mengunci” salinan terakhir agar bergerak menuju *node* yang lebih menjanjikan. Dengan kata lain, *History Predictability Spray and Wait* berhasil meningkatkan peluang pesan sampai tujuan tanpa harus menaikkan jumlah replika secara berlebihan.

Dari sisi efisiensi, *overhead History Predictability Spray and Wait* berada pada posisi kompromi yang cukup kuat. Rata-rata *overhead History Predictability Spray and Wait* $\approx 273,9$, lebih rendah daripada PRoPHETv2 $\approx 304,2$ dan jauh lebih hemat daripada Epidemic $\approx 645,3$, walaupun tetap lebih tinggi dibanding *Spray and Wait* $\approx 14,4$. Pola ini penting karena menunjukkan bahwa peningkatan *delivery* pada *History Predictability Spray and Wait* tidak dicapai dengan *flooding*, melainkan melalui *forwarding* yang lebih terarah. Dibanding PRoPHETv2, *router* usulan

mampu memberikan *delivery* lebih baik dengan *overhead* yang justru lebih efisien, yang mengindikasikan bahwa mekanisme *spray* membantu memperbaiki distribusi awal pesan sehingga fase selektif tidak perlu melakukan *forwarding* sebanyak P_{Ro}PHETv2 murni.

History Predictability Spray and Wait menghasilkan *latency* rata-rata ≈ 5.488 detik ($\sim 91,5$ menit), lebih rendah dibanding P_{Ro}PHETv2 (~ 5.977 detik) dan Epidemic (~ 6.034 detik), namun lebih tinggi dibanding *Spray and Wait* (~ 4.648 detik) dan P_{Ro}PHET (~ 4.893 detik). Temuan ini memperlihatkan *trade-off* yang logis: *router* usulan mengejar probabilitas berhasil (DP) dengan memilih *forwarding* yang lebih selektif, sehingga salinan terakhir kadang menunggu kontak yang lebih “bernilai” (berdasarkan histori), bukan sekadar berpindah secepat mungkin. Namun, waktu tundanya masih lebih baik daripada pendekatan *flooding/probabilistik* murni yang cenderung membuat pesan “berputar” lebih lama di jaringan sebelum mencapai tujuan.

Dari sisi struktur jalur, *History Predictability Spray and Wait* memiliki hop count $\approx 3,79$, sedikit lebih tinggi daripada P_{Ro}PHETv2 ($\sim 3,51$) namun jauh lebih rendah daripada Epidemic ($\sim 5,98$). Dibanding *Spray and Wait* ($\sim 2,08$) dan P_{Ro}PHET ($\sim 2,99$), hop *History Predictability Spray and Wait* memang lebih besar karena *forwarding* selektif berpotensi melewati node perantara tambahan yang secara historis lebih sering bertemu tujuan. Namun peningkatan hop ini masih terkendali dan sejalan dengan tujuan desain *History Predictability Spray and Wait*: meningkatkan keberhasilan antar dengan tetap menjaga biaya jaringan tidak sebesar *flooding*.

Hasil uji sensitivitas *bandwidth* (2 Mbps, 10 Mbps, 54 Mbps) pada interval 10 detik dan 20 detik menunjukkan bahwa kapasitas link berpengaruh kuat terutama pada kondisi *bandwidth* rendah. Pada 2 Mbps, *delivery probability* seluruh *router* menurun dan *History Predictability Spray and Wait* menjadi salah satu yang paling terdampak, yang mengindikasikan bahwa pada *throughput* rendah, durasi kontak antar *node* sering tidak cukup untuk menyelesaikan transfer pesan 0,5 MB secara konsisten. Sebaliknya pada 10 Mbps, *History Predictability Spray and Wait* kembali

menunjukkan keunggulan dibanding *baseline*, sedangkan peningkatan ke 54 Mbps tidak memberikan kenaikan berarti. Ini menegaskan bahwa setelah *bandwidth* mencapai tingkat menengah, *bottleneck* skenario lebih dominan dipengaruhi oleh peluang kontak, mobilitas, *buffer*, dan TTL, bukan semata kapasitas *link*.

5.2. Saran

- a. Manajemen parameter adaptif. Mengaktifkan dan menguji *denseConnThreshold* untuk membedakan kondisi *sparse* vs *dense contact*, kemudian menyesuaikan parameter.
- b. Ambang seleksi *forwarding* berbasis *prediktabilitas*. Melakukan uji sensitivitas *pThresh* (misalnya beberapa nilai ambang) untuk melihat trade-off antara peningkatan *delivery probability* dan potensi kenaikan *overhead* atau *latency*.
- c. Eksperimen sensitivitas menyeluruh. Menguji pengaruh variasi *pThresh*, *denseConnThreshold*, *buffer*, TTL, serta kebijakan antrean (FIFO vs TTL-*aware* vs *priority*) terhadap metrik utama (*delivery probability*, *overhead ratio*, *latency*, *hop count*) untuk memastikan *robust-ness* konfigurasi.
- d. Kebijakan antrean prioritas. Menambahkan prioritas untuk jenis pesan *life-critical* (TTL-*aware/priority queue*) agar *end-to-end delay* lebih terjaga.
- e. Prediksi berbasis pembelajaran. Per kaya *predictability* dengan *machine learning* menggunakan *contact prediction* dari jejak historis waktu-ruang atau *reinforcement learning* untuk adaptasi L dan Δ secara dinamis.
- f. Analisis energi & keamanan. Menambahkan model konsumsi daya, enkripsi ringan, dan kebijakan prioritas *multi-kelas* untuk skenario bencana.
- g. Validasi lapangan lintas koridor. Replikasi pada lintasan berbeda (utara–selatan, timur–barat) dan jam operasi yang bervariasi untuk memeriksa *robust-ness*.