

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengembangan algoritma *Utility Based Protocol* pada jaringan *Delay Tolerant Network* (DTN) untuk penyebaran pesan peringatan darurat (*emergency alert dissemination*) pada sistem transportasi terintegrasi di Kota Jakarta. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma berbasis utilitas memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan algoritma routing konvensional seperti *Spray and Wait* dan *Epidemic*, terutama pada kondisi mobilitas tinggi dan keterbatasan *buffer* yang menjadi karakteristik utama sistem transportasi perkotaan. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan routing berbasis utilitas pada jaringan DTN mampu memberikan peningkatan performa komunikasi yang signifikan dibandingkan metode konvensional yang bersifat statis atau *flooding*. DTN sebagai lingkungan jaringan dengan tingkat keterhubungan rendah, mobilitas tinggi, dan peluang kontak yang tidak pasti, membutuhkan algoritma routing yang mampu beradaptasi dengan kondisi dinamika jaringan. Pada konteks tersebut, *Adaptive Spray and Wait* (ASW) menawarkan pendekatan yang lebih cerdas karena keputusan penyebaran pesan tidak lagi berbasis jumlah salinan tetap, tetapi ditentukan melalui evaluasi utilitas berdasarkan kondisi node tetangga.

Penelitian ini mengembangkan algoritma *Adaptive Spray and Wait* (ASW) sebagai penyempurnaan dari algoritma *Spray and Wait* (SnW) standar. Pengembangan ini didasarkan pada kebutuhan untuk meningkatkan *delivery probability* tanpa meningkatkan *overhead* secara signifikan, serta meminimalkan jumlah *hop* dan menjaga efisiensi penggunaan *buffer*. ASW diperkuat dengan mekanisme evaluasi utilitas yang mempertimbangkan tiga faktor utama: kedekatan geografis (*geoGain*), rasio kapasitas *buffer* (*bufferFreeRatio*), dan proporsi sisa waktu hidup pesan (*ttlRatio*). Dengan pendekatan ini, penyebaran salinan pesan tidak dilakukan secara statis, tetapi disesuaikan dengan kondisi topologi dan kualitas node yang ditemui. Untuk memberikan pemahaman yang lebih terarah, kesimpulan penelitian ini disajikan secara rinci sesuai dengan rumusan permasalahan sebagai berikut:

1. Berdasarkan penerapan algoritma *Utility Based Protocol* pada *Adaptive Spray and Wait*, terlihat bahwa ASW mampu mengambil keputusan forwarding secara lebih cerdas dan adaptif. Mekanisme perhitungan utilitas yang menggabungkan informasi kedekatan geografis, kapasitas *buffer* node, serta sisa waktu hidup pesan memungkinkan ASW memilih *node* yang paling memiliki potensi untuk meneruskan pesan ke arah tujuan. Proses ini menjadikan ASW lebih selektif dibanding SnW yang cenderung menyebarkan salinan pesan secara statis, sekaligus lebih efisien dibanding Epidemic yang mendistribusikan pesan tanpa mempertimbangkan kualitas *relay*. Dalam konteks penyebaran pesan darurat pada jaringan transportasi Jakarta, ASW terbukti mampu menjaga stabilitas performa meskipun dihadapkan pada dinamika pergerakan *node* yang kompleks, sehingga pesan memiliki peluang lebih besar untuk bertahan dan mencapai tujuan.
2. Hasil perbandingan kinerja algoritma *Utility Based Protocol* terhadap berbagai metrik evaluasi menunjukkan gambaran yang jelas mengenai keunggulan ASW. Pada parameter *delivery probability*, ASW memberikan peningkatan performa yang konsisten pada seluruh pengujian *buffer management*, dengan peningkatan mulai dari 6% hingga mencapai 40% dibandingkan SnW. Peningkatan ini mencerminkan kemampuan ASW dalam mempertahankan pesan dan memilih *relay* yang tepat. Pada sisi efisiensi, ASW mampu menurunkan *overhead ratio* secara signifikan. Jumlah duplikasi pesan jauh lebih terkendali dibandingkan Epidemic, bahkan ASW juga lebih hemat overhead dibanding SnW karena tidak melakukan penyebaran salinan ke *node* dengan utilitas rendah. Di sisi lain, *latency* yang dihasilkan ASW memang cenderung sedikit lebih tinggi daripada SnW karena pesan disimpan lebih lama untuk menunggu kesempatan terbaik dalam *forwarding*. Namun demikian, peningkatan *latency* ini masih berada dalam batas wajar untuk jaringan DTN dan sebanding dengan peningkatan delivery yang dicapai. Pada parameter *hop count*, ASW mampu menghasilkan jalur *forwarding* yang lebih efisien dengan rata-rata perpindahan antar *node* yang lebih sedikit dibanding SnW maupun Epidemic. Hal ini menunjukkan bahwa pesan lebih diarahkan ke

jalur yang benar, tanpa perlu melalui banyak *node* perantara yang tidak relevan. *Buffer time* yang lebih tinggi pada ASW juga merupakan konsekuensi logis dari mekanisme selektif ini. Pesan yang disimpan lebih lama memberikan peluang lebih besar untuk terkirim kepada *node* yang lebih tepat dan stabil, sehingga secara keseluruhan membantu meningkatkan keberhasilan pengiriman.

3. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, algoritma ASW menunjukkan peningkatan performa yang konsisten pada berbagai konfigurasi *buffer management*. ASW terbukti mampu meningkatkan *delivery probability* pada seluruh skenario, terutama pada Simulasi-26 hingga Simulasi-33 (interval kontak 16–30 detik) yang merupakan rentang stabil pada lingkungan DTN berbasis mobilitas kota. Dalam konteks tersebut, penelitian ini menunjukkan bahwa FIFO merupakan kebijakan *buffer* yang paling optimal untuk mendukung kinerja *Adaptive Spray and Wait*. FIFO mempertahankan pesan lebih lama di dalam buffer sehingga memberi ruang bagi ASW untuk bekerja secara adaptif dan memilih *relay* terbaik. Sifat FIFO yang stabil menjadikannya paling cocok untuk skenario penyebaran pesan darurat yang membutuhkan keandalan. LIFO, meskipun cukup efisien pada beberapa metrik, memiliki risiko menghapus pesan terbaru yang mungkin justru penting, sehingga kurang ideal untuk skenario kritis. Sementara itu, Random Drop memperlihatkan performa yang paling fluktuatif. Skema ini memang dapat menghasilkan *delivery probability* yang tinggi pada beberapa kondisi, namun sifat acaknya membuat pesan bernilai tinggi berisiko terhapus, sehingga tidak dapat dijadikan pilihan utama.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa *adaptive decision-making* yang diterapkan dalam ASW memberikan keseimbangan terbaik antara probabilitas pengiriman, efisiensi *overhead*, optimalitas jalur *forwarding*, serta stabilitas performa pada berbagai kebijakan manajemen buffer. Dengan demikian, ASW dapat direkomendasikan sebagai salah satu pendekatan *routing* adaptif yang efektif untuk skenario DTN modern, terutama pada lingkungan dengan keterbatasan kontak, mobilitas tinggi, dan kapasitas *buffer* yang beragam.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan Komponen Utilitas yang Lebih Kaya

Penelitian selanjutnya dapat memperluas komponen utilitas pada ASW dengan menambahkan faktor seperti social similarity, frekuensi pertemuan, dan pola mobilitas historis, sehingga pemilihan node relay menjadi lebih akurat pada jaringan DTN yang dinamis dan heterogen.

2. Pengujian dalam Skenario Mobilitas dan Konfigurasi Jaringan yang Lebih Realistik

Untuk meningkatkan validitas dan generalisasi hasil, ASW perlu diuji pada dataset mobilitas nyata seperti Haggle, Infocom, atau Cambridge, serta dengan variasi jumlah node, kapasitas buffer, ukuran pesan, dan pola mobilitas berbasis perilaku manusia.

3. Integrasi Mekanisme Manajemen Buffer yang Adaptif

Pengembangan mekanisme *utility-based buffer management* dapat menjadi arah lanjutan, di mana pemilihan dan penghapusan pesan mempertimbangkan nilai utilitas sehingga pesan bernilai tinggi dapat dipertahankan dan delivery probability meningkat tanpa menambah overhead secara signifikan.

Dengan memperhatikan rekomendasi tersebut, diharapkan pengembangan lebih lanjut dari sistem manajemen buffer dan algoritma routing pada jaringan DTN dapat memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan keandalan sistem komunikasi darurat serta mendukung penerapan konsep *smart transportation system* di wilayah perkotaan.