

EVALUASI KINERJA MULTIPATH TCP DENGAN MANAJEMEN ANTRIAN OPEN VSWITCH PADA SERVER DENGAN ASIMETRI BANDWIDTH

1st Mochamad Lucky Segara
D3 Teknologi Telekomunikasi
Telkom University
Bandung, Indonesia
lsegara@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Tengku Ahmad Riza, S.T., M.T.
D3 Teknologi Telekomunikasi
Telkom University
Bandung, Indonesia
tengkuriza@telkomuniversity.ac.id

3rd Rama Reinaldy Yosua Sihombing, S.Kom
Pusat Data dan Sistem Informasi Kementerian
Dalam Negeri
Jakarta, Indonesia
ramareinaldy@proton.me

Abstrak — Kondisi asimetri bandwidth pada infrastruktur jaringan *multi-homing* sering menjadi penyebab utama ketidakstabilan koneksi. Meskipun protokol *Multipath TCP* (MPTCP) menawarkan solusi peningkatan kapasitas melalui agregasi jalur, penerapannya pada jalur dengan karakteristik berbeda rentan menyebabkan fenomena *Head-of-Line (HoL) Blocking* dan *bufferbloat*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja integrasi MPTCP dengan mekanisme manajemen antrian (*Queue Management*) pada *Open vSwitch* (OVS) guna meningkatkan stabilitas trafik. Metodologi pengujian dilakukan menggunakan Emulator *Mininet* dengan pendekatan studi komparatif melalui empat skenario bertahap untuk melihat dampak penerapan *Queue Management*. Parameter kinerja utama yang dianalisis secara mendalam meliputi *Throughput*, *Latency*, *Jitter*, dan *Packet Loss*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan MPTCP standar pada jalur asimetris (10 Mbps dan 2 Mbps) mengalami fluktuasi ekstrem akibat antrian yang tidak terkendali. Sebaliknya, integrasi MPTCP dengan manajemen antrian OVS terbukti mampu menjadi solusi optimal (*sweet spot*). Skenario ini berhasil menghasilkan *Throughput* agregat yang stabil sebesar 11,48 Mbps dan menurunkan variasi kedatangan paket (*jitter*) secara signifikan menjadi 1,02 ms, jauh lebih baik dibandingkan skenario tanpa optimasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa mekanisme pembatasan antrian pada OVS efektif memitigasi *bufferbloat* dan menjamin stabilitas layanan MPTCP pada lingkungan jaringan heterogen.

Kata kunci— *Multipath TCP, Open vSwitch, Asimetri Bandwidth, Queue Management, Bufferbloat, Mininet.*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akses Internet yang tinggi di lingkungan perkantoran menuntut ketersediaan jaringan yang handal. Namun, infrastruktur jaringan sering kali dihadapkan pada kondisi asimetri *bandwidth*, baik berupa ketimpangan kapasitas antara jalur *downlink* dan *uplink*, maupun perbedaan karakteristik antar penyedia layanan (*heterogeneous paths*) pada skenario *multi-homing* [3]. Kondisi ketidakseimbangan kapasitas antar jalur ini sering menjadi hambatan utama (*bottleneck*) yang menyebabkan ketidakstabilan *throughput* dan lonjakan latensi.

Protokol *Multipath TCP* (MPTCP) hadir sebagai ekstensi protokol TCP standar yang memungkinkan pengiriman data melalui beberapa antarmuka jaringan

secara simultan untuk meningkatkan redundansi dan *throughput* [7]. Namun, penerapan MPTCP standar pada jaringan dengan asimetri tinggi memiliki kelemahan serius. Berdasarkan penelitian terdahulu, perbedaan latensi yang signifikan antar jalur dapat memicu fenomena *Head-of-Line (HoL) Blocking* dan masalah pada penjadwalan paket [1], [2]. Akibatnya, paket data pada jalur cepat tertahan menunggu paket dari jalur lambat, sehingga *throughput* agregat yang dihasilkan sering kali tidak optimal. Selain itu, antrian paket yang menumpuk pada *buffer* jaringan dapat menyebabkan fenomena *bufferbloat*, yang berdampak buruk pada latensi dan *jitter* [8].

Untuk mengatasi inefisiensi tersebut, diperlukan mekanisme manajemen trafik yang presisi guna menstabilkan aliran data. *Open vSwitch* (OVS) menjadi solusi strategis karena memiliki kapabilitas manajemen antrian (*Queue Management*) yang dapat memodifikasi perilaku paket secara transparan. Studi terbaru memvalidasi bahwa penggunaan fitur *Quality of Service* (QoS) pada OVS memungkinkan pengelolaan *bandwidth* yang presisi dan cerdas di lingkungan *data center* [4]. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus mengintegrasikan protokol MPTCP dengan mekanisme prioritas paket pada OVS untuk mengoptimalkan alokasi *bandwidth*, memitigasi *bufferbloat*, dan menjamin stabilitas jaringan pada kondisi trafik padat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur kinerja *throughput* protokol MPTCP dibandingkan TCP *single-path* pada kondisi jaringan asimetris, serta menganalisis karakteristik ketidakstabilan seperti *jitter* dan *packet loss*. Melalui pendekatan eksperimental menggunakan emulator *Mininet* [9], penelitian ini membuktikan bahwa penggabungan protokol MPTCP dengan mekanisme manajemen antrian pada *Open vSwitch* mampu memberikan dampak signifikan dalam menstabilkan koneksi dibandingkan implementasi tanpa manajemen antrian.

II. KAJIAN TEORI

A. *Multipath TCP (MPTCP) pada Jaringan Asimetris*

Multipath TCP (MPTCP) merupakan ekstensi dari protokol TCP standar yang memungkinkan sebuah sesi koneksi tunggal untuk memecah dan mengirimkan aliran data melalui beberapa antarmuka jaringan secara simultan [7]. Tujuan utama MPTCP adalah meningkatkan *throughput*

melalui agregasi bandwidth dan menyediakan reliabilitas melalui mekanisme failover [5].

Namun, implementasi MPTCP pada jaringan multi-homing dengan karakteristik jalur yang heterogen (asimetris) memiliki tantangan signifikan. Perbedaan latensi yang ekstrem antara jalur cepat dan jalur lambat dapat memicu fenomena Head-of-Line (HoL) Blocking. Kondisi ini terjadi ketika paket dari jalur cepat tertahan di buffer penerima (Receive Window) menunggu kedatangan paket berurutan yang tertinggal di jalur lambat [1]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa tanpa manajemen trafik yang tepat, kondisi asimetri ini justru dapat menurunkan performa total MPTCP dibandingkan TCP jalur tunggal [3], [6]

B. Manajemen Antrean pada Open vSwitch

Salah satu penyebab utama degradasi performa pada jaringan asimetris adalah *bufferbloat*, yaitu penumpukan paket yang berlebihan pada antrean *router* atau *switch*. Fenomena ini mengakibatkan lonjakan latensi (*latency spike*) dan variasi kedatangan paket (*jitter*) yang tinggi [8].

Untuk memitigasi masalah tersebut, penelitian ini memanfaatkan *Open vSwitch* (OVS), sebuah *switch* virtual *multilayer* yang memiliki kapabilitas manajemen antrean (*Queue Management*). Berbeda dengan *switch* konvensional, OVS memungkinkan penerapan pembatasan panjang antrean (*queue sizing*) secara presisi pada level *software* [4]. Penerapan mekanisme ini pada OVS terbukti efektif untuk mencegah saturasi *buffer*, sehingga paket data tidak terjebak dalam antrean panjang yang dapat mengacaukan estimasi waktu kirim (*Round-Trip Time*) pada protokol MPTCP.

C. Standarisasi Quality of Service (QoS)

Evaluasi kinerja jaringan dalam penelitian ini mengacu pada parameter *Quality of Service* (QoS) yang meliputi *throughput*, *latency*, *jitter*, dan *packet loss*. Untuk menjamin objektivitas hasil pengukuran, klasifikasi kualitas layanan merujuk pada standar TIPHON (*Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks*) yang diterbitkan oleh ETSI [10].

Standar ini menyediakan metodologi pengukuran *end-to-end* dan kategori indeks performansi (Sangat Bagus, Bagus, Sedang, Buruk) [11]. Parameter *jitter* atau variasi *delay* menjadi indikator krusial dalam penelitian ini, di mana nilai *jitter* yang mendekati 0 ms dikategorikan sebagai "Sangat Bagus" dan menunjukkan efektivitas manajemen antrean dalam menstabilkan aliran trafik.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis emulasi jaringan untuk mengevaluasi efektivitas manajemen antrean pada protokol MPTCP. Seluruh simulasi dijalankan menggunakan emulator Mininet [9] yang beroperasi di atas sistem operasi Linux Ubuntu 20.04 LTS.

A. Perancangan Topologi Jaringan

Topologi jaringan dirancang menggunakan skema *dual-homed* yang terdiri dari satu *Client* (Host 1), satu *Server* (Host 2), dan dua jalur transmisi paralel yang melewati *switch* Open vSwitch (OVS). Untuk merepresentasikan kondisi jaringan heterogen yang nyata, kedua jalur dikonfigurasi dengan karakteristik asimetris menggunakan utilitas *Linux Traffic Control* (tc) [3]. Detail konfigurasi parameter jalur disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Konfigurasi Jalur Asimetris

Keterangan Jalur (Fungsi)	Spesifikasi Teknis
Jalur Utama (<i>Primary Link/Fiber Optic</i>)	10 Mbps/2 ms
Jalur Cadangan (<i>Backup Link/seluler</i>)	2 Mbps/10 ms

B. Implementasi Manajemen Antrean

Penelitian ini membandingkan dua pendekatan manajemen antrean pada *switch* OVS sebagai upaya mitigasi masalah *bufferbloat*. Pendekatan pertama menggunakan konfigurasi *default* dengan kapasitas antrean besar sebanyak 1000 paket, yang merepresentasikan karakteristik perangkat jaringan konvensional tanpa mekanisme kendali khusus. Sebaliknya, pendekatan kedua menerapkan mekanisme *Quality of Service* (QoS) yang diusulkan, yaitu dengan memberlakukan pembatasan antrean secara ketat (*queue sizing*) maksimum 50 paket [4]. Mekanisme ini bertujuan untuk memaksa pembuangan paket (*early drop*) lebih awal saat antrean mulai jenuh, sehingga latensi jaringan dapat terjaga tetap rendah meskipun trafik padat.

C. Skenario Pengujian

Prosedur pengujian dilaksanakan melalui empat tahapan skenario untuk mengisolasi dampak dari setiap variabel secara sistematis. Tahap awal dimulai dengan pengukuran *baseline* (Skenario 1) menggunakan protokol TCP *single-path* pada jalur utama tanpa manajemen antrean, yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian MPTCP standar (Skenario 2) yang menggabungkan kedua jalur tanpa modifikasi. Selanjutnya, metode usulan diterapkan pada Skenario 3, di mana protokol MPTCP dijalankan bersamaan dengan pembatasan antrean OVS sebesar 50 paket. Sebagai validasi akhir, dilakukan uji resiliensi (Skenario 4) untuk mengukur ketahanan sistem dengan menginjeksikan trafik gangguan berupa *UDP Flood* sebesar 80 Mbps pada menit ke-5 hingga ke-10, yang bertujuan membanjiri *buffer switch* dan menguji stabilitas koneksi di bawah tekanan ekstrem.

D. Parameter Pengukuran

Kinerja jaringan dievaluasi berdasarkan parameter *Throughput*, *Latency*, dan *Packet Loss* menggunakan alat ukur *Iperf3* dan *Ping*. Untuk parameter *Jitter*, perhitungan mengacu pada standar variasi *delay* statistik sebagaimana dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$Jitter = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |D_i - D_{i+1}|}{n - 1}$$

Di mana D_i adalah *delay* paket ke- i dan n adalah total paket diterima. Hasil pengukuran kemudian diklasifikasikan berdasarkan standar kualitas layanan TIPHON [10].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Throughput dan Agregasi Bandwidth

Pengujian performansi *throughput* dilakukan secara *real-time* untuk mengamati perilaku aliran data pada kondisi jaringan asimetris. Pada Skenario 1 (*TCP Baseline*), protokol TCP standar yang berjalan pada jalur tunggal mencatatkan *throughput* rata-rata tertinggi sebesar 12,98 Mbps. Namun, grafik aliran data menunjukkan fluktuasi yang tajam akibat perilaku agresif (*greedy*) algoritma kontrol kongesti yang terus menekan batas kapasitas jalur hingga terjadi saturasi.

Kondisi ketidakstabilan semakin terlihat pada Skenario 2 (*MPTCP Standar*), di mana penggabungan dua jalur asimetris (10 Mbps dan 2 Mbps) menghasilkan *throughput* rata-rata 11,70 Mbps. Meskipun terjadi agregasi *bandwidth*, skenario ini mengalami fenomena *throughput collapse* yang ditandai dengan jatuhnya trafik hingga ke angka 0 Mbps pada detik-detik tertentu. Hal ini mengindikasikan terjadinya *Head-of-Line (HoL) Blocking* yang parah akibat perbedaan latensi antarjalur yang gagal dikelola oleh *scheduler* standar [1], [3]. Sebagai pembanding independen, Skenario 3 (*TCP + OVS*) diterapkan untuk mengisolasi dampak manajemen antrean pada jalur tunggal. Hasilnya menunjukkan grafik yang sangat datar dan stabil dengan rata-rata *throughput* terkoreksi menjadi 9,57 Mbps. Meskipun kapasitas menurun akibat pembatasan antrean 50 paket, stabilitas yang dihasilkan jauh lebih baik dibandingkan skenario *baseline*, membuktikan bahwa OVS efektif dalam mendisiplinkan trafik [4]. Berdasarkan temuan tersebut, Skenario 4 (*MPTCP + OVS*) yang menjadi usulan penelitian ini berhasil menggabungkan keuntungan agregasi *MPTCP* dengan stabilitas OVS. Skenario ini menghasilkan *throughput* rata-rata 11,48 Mbps dengan grafik yang konsisten tanpa adanya pemutusan koneksi, menjadikannya solusi paling optimal (*sweet spot*) pada infrastruktur heterogen.

B. Rekapitulasi Hasil Parameter *Quality of Service (QoS)*

Evaluasi menyeluruh terhadap parameter QoS untuk keempat skenario disajikan pada Tabel 2. Data ini merupakan nilai rata-rata yang diambil dari tiga kali pengulangan pengujian (*triplo*) untuk menjamin validitas statistik.

Skenario Pengujian	<i>Throughput (Mbps)</i>	<i>Latency (ms)</i>	<i>Jitter (ms)</i>	<i>Packet Loss (%)</i>
TCP <i>Baseline</i>	12,98	34,86	1,14	13
MPTCP	11,70	34,26	1,25	15
TCP+OVS	9,57	16,66	1,17	19
MPTCP+OVS	11,48	32,89	1,02	19

Analisis data pada Tabel 2 menunjukkan adanya *trade-off* teknis yang menarik. Skenario 3 (*OVS Only*) mencatatkan latensi terendah sebesar 16,66 ms karena jalur tunggal tidak membebani sistem dengan proses penyusunan ulang paket (*reordering*). Namun, keunggulan utama metode usulan (Skenario 4) terlihat pada parameter *jitter* yang berhasil ditekan hingga angka 1,02 ms, yang merupakan nilai terendah dibanding seluruh skenario lainnya. Rendahnya variasi kedatangan paket ini membuktikan bahwa manajemen antrean OVS sangat krusial untuk menjaga sinkronisasi pada protokol *multipath*. Di sisi lain, tercatat peningkatan *packet loss* menjadi 19% pada skenario dengan OVS (S3 dan S4). Peningkatan ini adalah konsekuensi yang disengaja dari mekanisme *Active Queue Management* yang membuang paket (*tail drop*) saat antrean penuh demi mencegah latensi melonjak tak terkendali (mitigasi *bufferbloat*) [8].

C. Pengujian Resiliensi (*Stress Test*)

Pengujian tahap akhir dilakukan untuk menguji ketahanan sistem di bawah tekanan beban puncak menggunakan injeksi trafik *UDP Flood* sebesar 80 Mbps, merujuk pada metodologi gangguan trafik yang digunakan oleh Karunarathne dkk. [3]. Pada fase gangguan ini, sistem *MPTCP* dengan optimasi OVS menunjukkan resiliensi yang baik. Meskipun *packet loss*

meningkat drastis menjadi 34,1% akibat banjir trafik, sistem tidak mengalami kelumpuhan total (*system freeze*). Latensi rata-rata selama kondisi sibuk terjaga di angka 10,32 ms dengan variasi *jitter* yang sangat stabil di 1,56 ms. Berdasarkan standar TIPHON [10], [11], stabilitas responsivitas ini masih dikategorikan "Sangat Bagus", yang membuktikan bahwa sistem mampu memprioritaskan paket-paket penting dan mempertahankan koneksi meskipun berada di tengah kondisi jaringan yang sangat padat.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi protokol *Multipath TCP (MPTCP)* dengan mekanisme manajemen antrean pada *Open vSwitch (OVS)* efektif meningkatkan stabilitas jaringan asimetris. Protokol *MPTCP* terbukti mampu melakukan agregasi *bandwidth* secara optimal dengan *throughput* rata-rata sebesar 11,48 Mbps, lebih tinggi dibandingkan skenario jalur tunggal yang hanya mencapai 9,57 Mbps. Penerapan pembatasan *buffer* pada OVS berperan vital dalam mencegah fenomena *bufferbloat*, yang dibuktikan dengan pencapaian nilai *jitter* terendah sebesar 1,02 ms. Selain itu, sistem menunjukkan tingkat resiliensi yang tinggi dengan kemampuan pemulihan instan saat menghadapi gangguan trafik masif berupa *UDP Flood*. Meskipun terdapat *trade-off* teknis berupa peningkatan *packet loss* akibat mekanisme *tail drop*, konfigurasi ini tetap menjadi solusi optimal untuk menjamin konsistensi aliran data dan stabilitas latensi. Sebagai rekomendasi untuk pengembangan selanjutnya, penelitian dapat diperluas dengan menerapkan algoritma *Active Queue Management (AQM)* yang bersifat adaptif seperti CoDel atau PIE, serta menguji efektivitas algoritma penjadwalan paket terbaru seperti BLEST guna menangani variasi trafik yang lebih dinamis.

Referensi

- [1] S. Ferlin, O. Alay, O. Mehani, dan R. Boreli, "BLEST: Blocking estimation-based MPTCP scheduler for heterogeneous networks," dalam *IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, 2016, pp. 431-439.
- [2] C. Paasch, S. Ferlin, O. Alay, dan B. Donnet, "Experimental evaluation of Multipath TCP schedulers," dalam *Proceedings of the 2014 ACM SIGCOMM Workshop on Capacity Sharing Workshop (CSWS '14)*, 2014, pp. 27-32.
- [3] J. R. M. D. B. Karunarathne, T. Wijethilake, dan C. Keppitiyagama, "An evaluation of Multipath TCP with highly asymmetric subflows," *International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, vol. 17, no. 1, 2024..
- [4] H. Ma, X. Luo, dan D. Xu, "Intelligent queue management of open vSwitch in multi-tenant data center," *Future Generation Computer Systems*, vol. 144, pp. 50-62, 2023.
- [5] C. Raiciu, S. Barre, C. Pluntke, A. Greenhalgh, D. Wischik, dan M. Handley, "Improving datacenter performance and robustness with Multipath TCP," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, no. 4, pp. 266-277, 2011.

- [6] V. S. Kubde dan S. D. Sawarkar, "Exploring Multipath TCP schedulers in heterogeneous networks," *International Journal of Information Communication Technologies and Human Development (IJICTHD)*, vol. 14, no. 1, pp. 1-11, 202
- [7] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, dan O. Bonaventure, "TCP extensions for multipath operation with multiple addresses," Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 6824, Jan. 2013.
- [8] J. Gettys dan K. Nichols, "Bufferbloat: Dark buffers in the Internet," *Communications of the ACM*, vol. 55, no. 1, pp. 57-65, 2012.
- [9] B. Lantz, B. Heller, dan N. McKeown, "A network in a laptop: Rapid prototyping for software-defined networks," dalam *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2010.
- [10] European Telecommunications Standards Institute, Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON); End-to-end Quality of Service in TIPHON systems; Part 1: General aspects of Quality of Service (QoS), ETSI TR 101 329-1 V3.1.2, 2002.
- [11] European Telecommunications Standards Institute, *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON); End-to-end Quality of Service in TIPHON systems; Part 5: Quality of Service (QoS) measurement methodologies*, ETSI TS 101 329-5 V1.1.2, 2002.