Vol. 11, No. 2, Oktober 2026, Page. 657-669
https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/instek
p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

Perbandingan Quality of Service Video Streaming antara Queue Tree Berbasis Kelas dan Simple Queue PCQ pada Jaringan Sekolah

Andi Muhammad Nur Hidayat[*1], Sri Wahyuni[2], Norfazilah[3]

[1,2,3]Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar, Indonesia
Email: [1]andi.nurhidayat@uin-alauddin.ac.id, [2]sri.wahyuni@uin-alauddin.ac.id,
[3]norfazilahzilah11@gmail.com

Abstract

Keterbatasan bandwidth pada jaringan sekolah yang dipakai banyak pengguna secara bersamaan dapat menurunkan kualitas video streaming dalam pembelajaran daring. Penelitian ini membandingkan dua konfigurasi manajemen bandwidth pada router MikroTik, yaitu Queue Tree berbasis kelas dengan Hierarchical Token Bucket dan Simple Queue bertipe Per Connection Queue, pada batas agregat 30 Mbps. Pengujian dilakukan pada jaringan sekolah MA Madani Alauddin dengan sepuluh klien aktif, resolusi 360p dan 720p, serta durasi 5, 15, dan 30 menit. RTT, jitter, dan indikasi packet loss diukur pada satu klien pengamat menggunakan Wireshark, sedangkan laju agregat dibaca dari statistik antrian. Hasil menunjukkan RTT Queue Tree 60 ms pada 360p dan 90 ms pada 720p, sedangkan PCQ 45 ms dan 85 ms. Jitter 7 dan 8 ms berbanding 6 dan 9 ms, packet loss 0,3% dan 0,7% berbanding 0,2% dan 0,7%, serta laju agregat kedua konfigurasi 90% sampai 95% dari batas. Perbedaan RTT 5 ms sampai 15 ms hanya deskriptif karena setiap kondisi dijalankan satu kali tanpa pengulangan independen. Kedua konfigurasi menjaga QoS pada kategori bagus atau lebih baik, sehingga pemilihan lebih ditentukan oleh kebutuhan pengelolaan trafik daripada selisih parameter yang terukur.

Kata kunci: jaringan sekolah, PCQ, QoS, queue tree, video streaming

Abstract

Limited bandwidth in school networks shared by many simultaneous users may degrade video streaming quality during online learning. This study compares two bandwidth management configurations on a MikroTik router: a class-based Queue Tree using Hierarchical Token Bucket and a Simple Queue using the Per Connection Queue type, both under an aggregate limit of 30 Mbps. Tests were carried out on the school network of MA Madani Alauddin with ten active clients, at 360p and 720p for 5, 15, and 30 minutes. RTT, jitter, and packet loss were measured at one observer client using Wireshark, while the aggregate rate was read from queue statistics. Queue Tree produced RTT of 60 ms at 360p and 90 ms at 720p, whereas PCQ produced 45 ms and 85 ms. Jitter was 7 and 8 ms versus 6 and 9 ms, packet loss was 0.3% and 0.7% versus 0.2% and 0.7%, and aggregate rate of both reached 90% to 95% of the limit. RTT differences of 5 ms to 15 ms are descriptive because each condition was run once. Both kept QoS within good categories, so the choice depends more on traffic management requirements than on measured differences.

Keywords: *PCQ, QoS, queue tree, school network, video streaming*

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan internet di sekolah tidak lagi terbatas pada administrasi, tetapi telah menjadi bagian dari proses pembelajaran, termasuk pada pembelajaran daring yang mengandalkan layanan *video streaming* [1]. Ketika layanan tersebut dipakai oleh banyak pengguna pada waktu yang sama, kapasitas link yang tersedia harus dibagi, dan pembagian yang tidak diatur membuat sebagian pengguna menerima kualitas layanan yang jauh lebih rendah daripada pengguna lain [2].

Layanan *video streaming* lebih rentan terhadap penurunan kualitas dibandingkan layanan data biasa karena trafiknya berlangsung terus-menerus selama pemutaran. Pada jaringan nirkabel, kualitas layanan juga dipengaruhi interferensi, variasi kanal, dan jangkauan [3]. Kualitas layanan video biasanya dinilai melalui *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput* [4]; keempat parameter ini juga menjadi dasar penilaian Quality of Service (QoS) pada penelitian jaringan lokal.

Penambahan kapasitas link sering terkendala biaya, sehingga pengelola jaringan sekolah lebih sering mengandalkan manajemen *bandwidth*. Pada *router* MikroTik, manajemen *bandwidth* dijalankan melalui mekanisme antrian yang dapat diterapkan pada beberapa tingkat konfigurasi [5]. Dua konfigurasi yang paling sering dibahas dalam literatur adalah pembagian berbasis kelas dan pembagian per koneksi [6].

Pembahasan literatur sering menyebut perbandingan ini sebagai "HTB versus PCQ", padahal keduanya bukan dua hal yang sejajar. Implementasi antrian pada RouterOS dibangun di atas Hierarchical Token Bucket (HTB), sedangkan Per Connection Queue (PCQ) merupakan salah satu tipe antrian yang dapat dipakai di dalam struktur HTB tersebut [5]. Karena itu, yang dapat dibandingkan secara sah adalah dua konfigurasi konkret, bukan dua nama algoritma. Pada penelitian ini, konfigurasi pertama adalah *Queue Tree* berbasis kelas dengan penandaan koneksi melalui *mangle*, dan konfigurasi kedua adalah *Simple Queue* bertipe PCQ. Perbedaan keduanya mencakup arsitektur konfigurasi, cara klasifikasi trafik, dan parameter pembatas, sehingga hasilnya harus dibaca sebagai perbandingan dua rancangan pengelolaan *bandwidth*.

Penelitian terdahulu telah menguji kedua konfigurasi pada beberapa konteks. Penerapan HTB dilaporkan pada jaringan sekolah [7] dan pada jaringan penyedia layanan internet [8]; penerapan PCQ dikaji pada jaringan kampus [9] serta dikembangkan menjadi model alokasi adaptif [10]. Perbandingan kedua metode juga dilakukan pada jaringan sekolah menengah kejuruan [11] dan pada jaringan WLAN [12], sedangkan [13] menguji PCQ untuk layanan *video streaming*. Tinjauan literatur [14] menunjukkan bahwa studi-studi tersebut memakai konteks, konfigurasi, dan parameter pembanding yang belum seragam, sehingga hasilnya sulit dibandingkan secara langsung. Perbandingan QoS dengan standar TIPHON juga telah diterapkan pada metode antrian lain [15].

Persoalan yang belum terjawab bukanlah "metode mana yang lebih baik", melainkan bagaimana dua rancangan pengelolaan *bandwidth* yang berbeda memengaruhi parameter QoS pada klien yang sedang memutar video di jaringan sekolah, serta parameter mana yang benar-benar membedakan keduanya. Penelitian ini membandingkan konfigurasi *Queue Tree* berbasis kelas dan *Simple Queue* bertipe PCQ pada jaringan sekolah MA Madani Alauddin, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, dengan batas agregat 30 Mbps. Pengukuran dilakukan pada satu klien pengamat dan dilaporkan sebagai RTT, *jitter* RTT, indikasi *packet loss*, dan laju agregat yang dicapai, sehingga setiap angka dapat ditelusuri ke prosedur pengukurannya.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Konfigurasi Manajemen Bandwidth yang Dibandingkan

Penelitian ini membandingkan dua konfigurasi manajemen *bandwidth* pada *router* MikroTik RB941-2nD-TC. Konfigurasi pertama menggunakan *Queue Tree* yang disusun sebagai hierarki kelas. Trafik ditandai lebih dahulu pada rantai *forward* menggunakan *connection mark*, kemudian setiap kelompok trafik diarahkan ke kelas antrian yang berada di bawah satu *parent*. Struktur ini memungkinkan pengelola jaringan menetapkan batas dan prioritas yang berbeda antarkelas, sehingga trafik pembelajaran dapat didahulukan atas trafik lain [16].

Konfigurasi kedua menggunakan satu *Simple Queue* dengan tipe antrian PCQ. PCQ membagi trafik ke dalam sub-antrian berdasarkan pengklasifikasi yang dipilih, pada penelitian ini alamat tujuan, lalu memberikan jatah yang relatif setara pada setiap sub-antrian [5]. Dengan cara ini, pembagian *bandwidth* tidak memerlukan penandaan trafik dan jumlah aturan konfigurasi jauh lebih sedikit, tetapi pengelola tidak dapat memberi prioritas pada jenis layanan tertentu.

Kedua konfigurasi diterapkan pada jalur yang sama, yaitu dari *router* menuju klien pada jaringan lokal, dengan batas agregat 30 Mbps. Tidak ada layanan tunnel, autentikasi PPP, maupun jaringan virtual yang dipakai pada jalur trafik uji, sehingga perbedaan hasil tidak berasal dari enkapsulasi atau pemrosesan tambahan. Perbandingan parameter kedua konfigurasi dirangkum pada Tabel 1.

Perlu ditegaskan bahwa kedua konfigurasi tidak diuji sebagai dua algoritma yang berdiri sendiri. HTB merupakan dasar implementasi antrian RouterOS, sedangkan PCQ adalah tipe antrian yang dapat dipakai di dalamnya [5]. Perlakuan pada penelitian ini adalah rancangan pengelolaan *bandwidth*:

hierarki kelas dengan klasifikasi berbasis *mark* pada konfigurasi pertama, dan satu antrian per target dengan pembagian per sub-antrian pada konfigurasi kedua.

Tabel 1. Perbandingan Konfigurasi Kedua Skenario Pengujian

Aspek	Skenario A	Skenario B
Bentuk konfigurasi	Queue Tree (hierarki kelas)	Simple Queue
Klasifikasi trafik	Connection mark melalui mangle	Alamat tujuan (pcq-classifier)
Tipe antrian	HTB (bawaan RouterOS)	PCQ
Batas agregat	30 Mbps	30 Mbps
Pembagian antarkelas	Ditetapkan per kelas	Merata antarsub-antrian
Target	Address list klien	192.168.11.0/24
Jalur trafik	Router menuju klien nirkabel	Router menuju klien nirkabel

2.2. Parameter dan Definisi Operasional Pengukuran

Kinerja kedua konfigurasi dinilai melalui empat parameter, yaitu RTT, *jitter* RTT, indikasi *packet loss*, dan laju agregat. Tiga parameter pertama diukur dari hasil penangkapan paket pada klien pengamat, sedangkan laju agregat dibaca dari statistik antrian pada *router*. Pemisahan ini diperlukan karena penangkapan pada satu titik hanya mewakili trafik satu klien, sementara laju agregat mencakup seluruh sepuluh klien yang aktif. Perlu ditegaskan bahwa pengukuran dilakukan pada satu titik, sehingga yang dapat diperoleh adalah RTT, bukan *delay* satu arah. RTT didefinisikan sebagai selang waktu antara pengiriman segmen dan penerimaan acknowledgment atas segmen tersebut, dan dihitung dengan persamaan (1).

$$\bar{R} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} r_i \quad (1)$$

Pada persamaan (1), $\bar{R}$ menyatakan RTT rata-rata dalam milidetik, r_i menyatakan RTT segmen ke-i, dan N menyatakan jumlah segmen yang RTT-nya berhasil diukur. Segmen yang tidak memiliki pasangan *acknowledgment* tidak diikutsertakan dalam perhitungan.

Tabel 2. Kategori RTT yang Diadaptasi dari TIPHON

Kategori	Rentang	Indeks
Sangat bagus	< 150 ms	3
Bagus	150 ms s.d. 300 ms	2
Sedang	300 ms s.d. 450 ms	1
Buruk	> 450 ms	0

Jitter menggambarkan variasi RTT antarsegmen berurutan pada aliran yang sama dan dihitung dengan persamaan (2).

$$J = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1} |r_{i+1} - r_i| \quad (2)$$

Pada persamaan (2), J menyatakan *jitter* dalam milidetik, r_i merupakan RTT segmen ke-i, dan N merupakan jumlah segmen yang diukur. Nilai ini menggambarkan ketidakstabilan waktu tempuh, bukan variasi waktu kedatangan paket pada sisi pengirim.

Tabel 3. Kategori Jitter yang Diadaptasi dari TIPHON

Kategori	Rentang	Indeks
Sangat bagus	0 ms	3

Kategori	Rentang	Indeks
Bagus	> 0 ms s.d. 75 ms	2
Sedang	> 75 ms s.d. 125 ms	1
Buruk	> 125 ms	0

Pada penangkapan satu titik, jumlah paket yang hilang di sisi pengirim tidak dapat diketahui secara langsung. Karena itu, *packet loss* dilaporkan sebagai indikasi berbasis retransmisi, yaitu perbandingan jumlah segmen yang dikirim ulang terhadap jumlah segmen pada aliran yang diamati, dan dihitung dengan persamaan (3).

$$PL = \frac{N_{retrans}}{N_{total}} \times 100\% \quad (3)$$

Pada persamaan (3), PL menyatakan indikasi *packet loss* dalam persen, $N_{retrans}$ menyatakan jumlah segmen yang dikirim ulang, dan N_{total} menyatakan jumlah segmen pada aliran tersebut. Nilai ini merupakan pendekatan, bukan *packet loss end-to-end*, karena segmen yang hilang di jalur menuju klien hanya terdeteksi bila memicu retransmisi.

Tabel 4. Kategori Packet Loss yang Diadaptasi dari TIPHON

Kategori	Rentang	Indeks
Sangat bagus	0%	3
Bagus	> 0% s.d. 3%	2
Sedang	> 3% s.d. 15%	1
Buruk	> 15%	0

Laju agregat dihitung dari jumlah bit yang diterima klien pada aliran *streaming* dibagi durasi pengamatan, menggunakan persamaan (4).

$$T = \frac{B}{t} \quad (4)$$

Pada persamaan (4), T menyatakan laju agregat dalam bit per sekon, B menyatakan jumlah bit yang melewati antrian selama pengamatan, dan t menyatakan durasi pengamatan dalam sekon. Nilai ini menggambarkan laju yang disalurkan antrian kepada seluruh klien, bukan *bitrate* video yang diminta oleh pemutar. Karena itu, laju agregat dilaporkan bersama utilisasi link dan tidak dikategorikan dengan ambang TIPHON, yang disusun untuk kebutuhan teleponi.

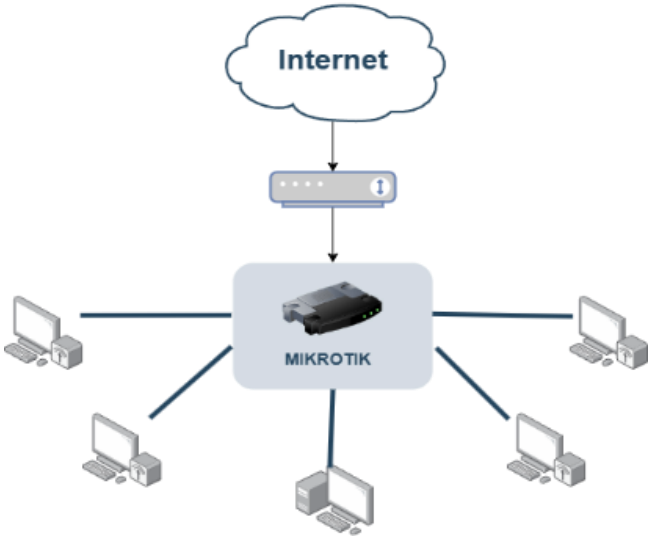
Ambang pada Tabel 2 sampai Tabel 4 diadaptasi dari kategori TIPHON yang lazim dipakai pada pengukuran QoS [17]. Standar tersebut disusun untuk jaringan teleponi, sehingga dalam penelitian ini kategori dipakai sebagai acuan pelaporan yang konsisten, bukan sebagai bukti kualitas pemutaran video. Karena RTT selalu lebih besar daripada *delay* satu arah, kategori yang diperoleh dari RTT bersifat konservatif: bila RTT berada pada kategori sangat bagus, *delay* satu arahnya pasti juga demikian.

Seluruh nilai dilaporkan sebagai nilai per pengujian. Rata-rata pada setiap resolusi dihitung dari tiga durasi yang berbeda dan berfungsi sebagai ringkasan deskriptif lintas kondisi, bukan sebagai ukuran variasi antar-pengulangan. Tidak ada uji signifikansi yang dilakukan dalam penelitian ini.

2.3. Rancangan Topologi dan Konfigurasi Jaringan

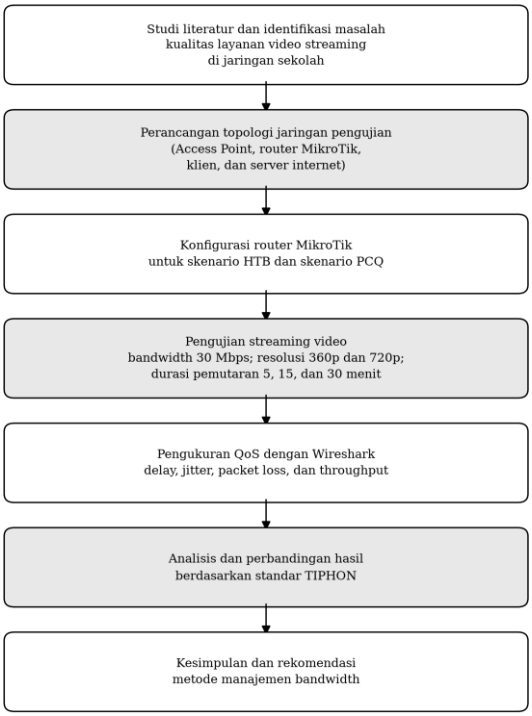
Topologi pengujian disusun untuk merepresentasikan jaringan sekolah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Koneksi internet dari penyedia layanan masuk ke *router* utama, kemudian diteruskan ke *router* MikroTik RB941-2nD-TC yang menjalankan fungsi manajemen *bandwidth*. Dari perangkat tersebut, koneksi diteruskan ke jaringan lokal sekolah 192.168.11.0/24 yang melayani laboratorium komputer melalui *switch* dan perangkat nirkabel melalui *access point*. Sepuluh klien aktif selama pengujian, yaitu lima komputer laboratorium dan lima telepon pintar.

Vol. 11, No. 2, Oktober 2026, Page. 657-669
https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/instek
p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI



Gambar 1. Topologi jaringan pengujian yang diusulkan

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2, mulai dari studi literatur dan identifikasi masalah, perancangan topologi, konfigurasi *router* untuk kedua skenario, pengujian *streaming* video, pengukuran QoS, analisis, hingga penarikan kesimpulan. Perangkat keras yang digunakan meliputi *router* MikroTik RB941-2nD-TC, kabel LAN, konektor RJ45, lima komputer laboratorium (satu di antaranya dipakai untuk konfigurasi sekaligus penangkapan paket), *switch*, *access point* nirkabel, dan lima telepon pintar sebagai klien. Pemasangan perangkat diperlihatkan pada Gambar 3, dengan *router* terhubung ke port *ethernet*1 dan laptop pengukuran terhubung ke port *ethernet*2 untuk keperluan konfigurasi.



Gambar 2. Diagram alur penelitian

p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI



Gambar 3. Instalasi perangkat jaringan pengujian

Pengukuran dilakukan pada satu klien pengamat, yaitu salah satu dari lima komputer laboratorium yang sama, yang terhubung ke jaringan uji dan menjalankan Wireshark pada antarmuka yang dilewati trafik *streaming*; koneksi *ethernet* ke port *router* dipakai untuk konfigurasi. Klien lain tetap aktif menggunakan layanan *video streaming* selama pengujian, tetapi trafiknya tidak terekam oleh laptop tersebut. Karena itu, seluruh nilai yang dilaporkan menggambarkan pengalaman satu klien pada kondisi beban tersebut, bukan agregat seluruh jaringan, dan penelitian ini tidak dapat dipakai untuk menilai pemerataan *bandwidth* antarklien.

2.4. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan pada batas agregat 30 Mbps karena nilai tersebut merupakan kapasitas layanan internet yang tersedia pada jaringan tempat penelitian dilaksanakan. Pada setiap pengujian, kesepuluh klien aktif secara bersamaan dan memutar layanan *video streaming*. Skenario dibedakan berdasarkan resolusi video dan durasi pemutaran, yaitu 360p dan 720p dengan durasi 5 menit, 15 menit, dan 30 menit, sehingga terdapat enam kondisi untuk setiap konfigurasi. Pemutaran video dilakukan melalui layanan *video streaming* daring dengan akun dan konten yang sama pada setiap pengujian.

Setiap kondisi dijalankan satu kali untuk masing-masing konfigurasi. Ketiga durasi merupakan tiga pengujian terpisah yang dimulai dari awal, bukan potongan dari satu penangkapan yang sama, sehingga nilainya tidak saling bergantung. Meskipun demikian, karena setiap kondisi hanya dijalankan satu kali, variasi antar-pengulangan tidak dapat diestimasi dan perbedaan antarkondisi tidak dapat diuji secara statistik.

Penangkapan paket dilakukan dengan Wireshark pada antarmuka klien pengamat, dengan filter yang membatasi analisis pada aliran *video streaming* yang sedang diputar. Nilai RTT, *jitter*, dan indikasi *packet loss* dihitung dari hasil penangkapan menggunakan persamaan (1) sampai persamaan (3), sedangkan laju agregat dihitung dari statistik antrian menggunakan persamaan (4). Pengujian kedua konfigurasi diupayakan berlangsung pada hari yang sama dan pada rentang jam yang berdekatan agar kondisi jaringan relatif sebanding; konfigurasi *router* hanya diubah pada bagian antrian. Trafik klien uji tidak dikecualikan dari antrian oleh aturan FastTrack, dan hal ini terbukti dari laju agregat yang tertahan pada batas antrian sebagaimana dilaporkan pada Bab 3.3.

Analisis dilakukan secara deskriptif. Nilai rata-rata pada setiap resolusi dihitung dari tiga durasi, kemudian dibandingkan antarkonfigurasi. Selisih dilaporkan dalam satuan parameter dan dalam persentase terhadap nilai pembanding. Perbedaan yang kecil tidak ditafsirkan sebagai perbedaan sistematis apabila tidak didukung pengulangan, dan klaim mengenai mekanisme di balik perbedaan dirumuskan sebagai hipotesis yang perlu diuji.

p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Konfigurasi Queue Tree Berbasis Kelas

Hasil pengukuran pada konfigurasi *Queue Tree* berbasis kelas disajikan pada Tabel 5. Setiap baris merupakan satu pengujian tersendiri yang dimulai dari awal.

Pada resolusi 360p, konfigurasi ini menghasilkan RTT rata-rata 60 ms dengan rentang 55 ms sampai 65 ms, *jitter* rata-rata 7 ms, indikasi *packet loss* rata-rata 0,3%, dan laju agregat rata-rata 27,9 Mbps. Pada resolusi 720p, RTT rata-rata 90 ms dengan rentang 85 ms sampai 95 ms, *jitter* rata-rata 8 ms, indikasi *packet loss* rata-rata 0,7%, dan laju agregat rata-rata 28,3 Mbps.

Kenaikan durasi dari 5 menit ke 30 menit disertai kenaikan RTT sebesar 10 ms pada kedua resolusi, yaitu dari 55 ms menjadi 65 ms pada 360p dan dari 85 ms menjadi 95 ms pada 720p. *Jitter* naik 2 ms pada 360p dan 2 ms pada 720p, sedangkan indikasi *packet loss* naik 0,2 poin persentase pada kedua resolusi. Laju agregat tidak mengikuti pola yang sama: pada 360p nilainya menurun dari 28,3 Mbps menjadi 27,5 Mbps, sedangkan pada 720p nilainya berfluktuasi antara 28,1 Mbps dan 28,5 Mbps tanpa arah yang konsisten.

Kenaikan RTT sebesar 10 ms tersebut setara dengan 18% dari nilai awal pada 360p dan 12% pada 720p. Karena ketiga pengukuran pada setiap resolusi dimulai dari awal dan hanya dijalankan satu kali, pola ini tidak dapat dipisahkan dari faktor waktu pengujian, kondisi *cache* penyedia layanan, dan variasi beban klien lain. Pola tersebut dicatat sebagai gejala yang konsisten pada kedua resolusi, bukan sebagai bukti hubungan sebab-akibat antara durasi dan panjang antrian.

Perbandingan antarresolusi menunjukkan kenaikan RTT sebesar 30 ms atau 50%, kenaikan *jitter* sebesar 1 ms atau 14%, dan kenaikan indikasi *packet loss* sebesar 0,4 poin persentase atau sekitar 2,3 kali nilai awal ketika resolusi dinaikkan dari 360p ke 720p. Nilai absolut perubahan tersebut kecil, sehingga rasio lipat pada *packet loss* tidak dapat dianggap sebagai ukuran kepekaan yang stabil.

Tabel 5. Hasil Pengujian pada Konfigurasi Queue Tree Berbasis Kelas

No	Batas (Mbps)	Resolusi	Durasi (menit)	RTT (ms)	Jitter (ms)	Packet loss (%)	Laju agregat (Mbps)
1	30	360p	5	55	6	0,2	28,3
2	30	360p	15	60	7	0,3	28,0
3	30	360p	30	65	8	0,4	27,5
4	30	720p	5	85	7	0,6	28,1
5	30	720p	15	90	8	0,7	28,5
6	30	720p	30	95	9	0,8	28,3
	Rata-rata 360p			60	7	0,3	27,9
	Rata-rata 720p			90	8	0,7	28,3

3.2. Hasil Konfigurasi Simple Queue PCQ

Hasil pengukuran pada konfigurasi *Simple Queue* bertipe PCQ disajikan pada Tabel 6 dengan kondisi pengujian yang sama.

Pada resolusi 360p, konfigurasi PCQ menghasilkan RTT rata-rata 45 ms dengan rentang 40 ms sampai 50 ms, *jitter* rata-rata 6 ms, indikasi *packet loss* rata-rata 0,2%, dan laju agregat rata-rata 27,4 Mbps. Pada resolusi 720p, RTT rata-rata 85 ms dengan rentang 80 ms sampai 90 ms, *jitter* rata-rata 9 ms, indikasi *packet loss* rata-rata 0,7%, dan laju agregat rata-rata 28,0 Mbps.

Kenaikan durasi dari 5 menit ke 30 menit disertai kenaikan RTT sebesar 10 ms pada kedua resolusi, yaitu dari 40 ms menjadi 50 ms pada 360p dan dari 80 ms menjadi 90 ms pada 720p. *Jitter* naik 2 ms

p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

pada 360p dan 2 ms pada 720p, sedangkan indikasi *packet loss* naik 0,2 poin persentase pada kedua resolusi. Laju agregat menurun dari 27,8 Mbps menjadi 27,0 Mbps pada 360p dan berfluktuasi antara 27,8 Mbps dan 28,3 Mbps pada 720p.

Pola yang perlu dicatat adalah nilai *jitter* pada 720p, yaitu 8 ms, 9 ms, dan 10 ms. Nilai tersebut meningkat 2 ms dari pengujian 5 menit ke pengujian 30 menit. Dengan rentang sebesar itu, perbedaan *jitter* antara kedua konfigurasi pada 720p, yaitu 8 ms berbanding 9 ms, belum dapat ditafsirkan sebagai perbedaan yang sistematis.

Kenaikan RTT sebesar 40 ms ketika resolusi dinaikkan dari 360p ke 720p setara dengan 89% nilai awal, kenaikan *jitter* sebesar 3 ms setara dengan 50%, dan kenaikan indikasi *packet loss* sebesar 0,5 poin persentase atau sekitar 3,5 kali nilai awal. Angka relatif ini lebih besar daripada yang tercatat pada konfigurasi *Queue Tree*, tetapi nilai absolutnya tetap kecil dan belum diuji secara statistik.

Tabel 6. Hasil Pengujian pada Konfigurasi Simple Queue PCQ

No	Batas (Mbps)	Resolusi	Durasi (menit)	RTT (ms)	Jitter (ms)	Packet loss (%)	Laju agregat (Mbps)
1	30	360p	5	40	5	0,1	27,8
2	30	360p	15	45	6	0,2	27,5
3	30	360p	30	50	7	0,3	27,0
4	30	720p	5	80	8	0,6	28,3
5	30	720p	15	85	9	0,7	28,0
6	30	720p	30	90	10	0,8	27,8
	Rata-rata 360p			45	6	0,2	27,4
	Rata-rata 720p			85	9	0,7	28,0

3.3. Perbandingan Kedua Konfigurasi

Perbandingan nilai rata-rata kedua konfigurasi dirangkum pada Tabel 7 dan divisualisasikan pada Gambar 4. Kolom selisih menunjukkan perbedaan nilai rata-rata pada resolusi 720p terhadap resolusi 360p untuk masing-masing konfigurasi.

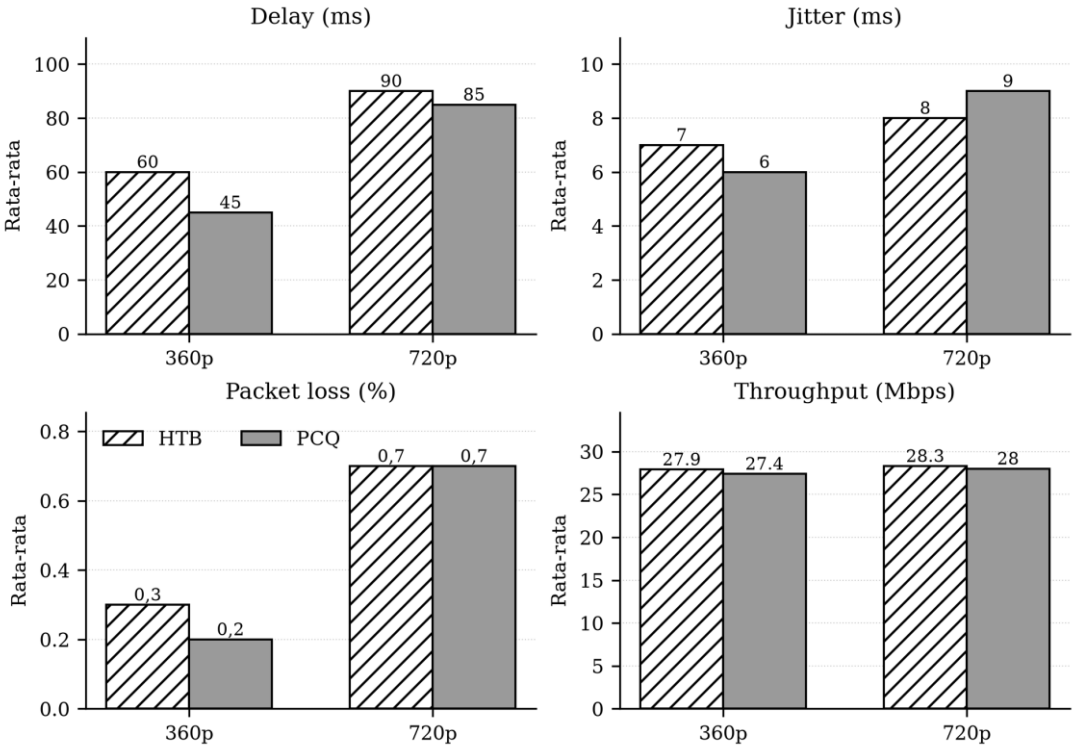
Pada parameter RTT, konfigurasi PCQ menghasilkan nilai lebih rendah pada seluruh kondisi. RTT rata-rata PCQ adalah 45 ms pada 360p dan 85 ms pada 720p, sedangkan konfigurasi *Queue Tree* menghasilkan 60 ms dan 90 ms. Selisihnya 15 ms pada 360p dan 5 ms pada 720p, atau 25% dan 6% dari nilai pembanding. Arah selisih konsisten pada keenam kondisi, tetapi besarnya mengecil ketika resolusi dinaikkan.

Tabel 7. Perbandingan Nilai Rata-Rata Parameter QoS antara Kedua Konfigurasi pada Batas 30 Mbps

Parameter	Queue Tree 360p	PCQ 360p	Queue Tree 720p	PCQ 720p	Selisih Queue Tree	Selisih PCQ
RTT (ms)	60	45	90	85	30	40
Jitter (ms)	7	6	8	9	1	3
Packet loss (%)	0,3	0,2	0,7	0,7	0,4	0,5
Laju agregat (Mbps)	27,9	27,4	28,3	28,0	0,4	0,6

Keterangan: selisih menyatakan perbedaan nilai rata-rata pada resolusi 720p terhadap resolusi 360p.

p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI



Gambar 4. Perbandingan nilai rata-rata parameter QoS antara kedua konfigurasi

Pada parameter *jitter*, PCQ lebih rendah 1 ms pada 360p, yaitu 6 ms berbanding 7 ms, sedangkan pada 720p *Queue Tree* lebih rendah 1 ms, yaitu 8 ms berbanding 9 ms. Indikasi *packet loss* juga berbeda tipis: 0,2% berbanding 0,3% pada 360p dan 0,7% berbanding 0,7% pada 720p. Laju agregat *Queue Tree* lebih tinggi 0,5 Mbps pada 360p dan 0,3 Mbps pada 720p, atau sekitar 1,8% dan 1,1% dari nilai pembanding.

Selisih sebesar 1 ms pada *jitter*, 0,1 poin persentase pada *packet loss* 360p, dan 1% sampai 2% pada laju agregat berada dalam rentang yang tidak dapat dipisahkan dari variasi antar-pengulangan tanpa replikasi. Karena setiap kondisi hanya dijalankan satu kali, perbedaan tersebut dilaporkan sebagai deskripsi, bukan sebagai bukti keunggulan.

Kenaikan durasi pemutaran menghasilkan pola yang sama pada kedua konfigurasi, yaitu RTT naik 10 ms dan *jitter* naik 2 ms dari pengujian 5 menit ke 30 menit. Laju perubahan yang sama ini menunjukkan bahwa perbedaan antara kedua konfigurasi terletak pada nilai absolut, bukan pada laju perubahan terhadap durasi. Namun, karena durasi juga berkaitan dengan waktu pengujian, pola tersebut belum dapat dipisahkan dari perubahan kondisi jaringan pada jam yang berbeda.

Ditinjau dari utilisasi link, laju agregat kedua konfigurasi berada pada kisaran 27,0 Mbps sampai 28,5 Mbps dari batas 30 Mbps, atau 90% sampai 95%. Angka ini menunjukkan bahwa antrian menyalurkan data mendekati plafon yang ditetapkan. Kondisi tersebut wajar karena sepuluh klien memutar video secara bersamaan sehingga permintaan agregat melebihi kapasitas link; pada kondisi seperti ini, laju agregat mencerminkan plafon konfigurasi, bukan kebutuhan *bitrate* satu video. Karena itu, angka tersebut tidak dapat dipakai untuk menyimpulkan bahwa kebutuhan video jauh di bawah kapasitas; yang dapat disimpulkan adalah kedua konfigurasi sama-sama mendekati plafon dan tidak berbeda pada parameter ini.

Bila ditinjau per kondisi, selisih RTT antara kedua konfigurasi adalah 15 ms pada 360p untuk ketiga durasi, yaitu 55 ms berbanding 40 ms, 60 ms berbanding 45 ms, dan 65 ms berbanding 50 ms. Pada 720p selisihnya 5 ms untuk ketiga durasi, yaitu 85 ms berbanding 80 ms, 90 ms berbanding 85 ms, dan 95 ms berbanding 90 ms. Pola ini menunjukkan bahwa besarnya selisih ditentukan oleh resolusi, bukan oleh durasi: nilainya tetap 15 ms pada 360p dan 5 ms pada 720p walaupun durasi pemutaran bertambah. Dengan kata lain, keunggulan RTT konfigurasi PCQ menyusut ketika volume data per satuan waktu naik, bukan ketika sesi berlangsung lebih lama.

Pola tersebut juga berarti bahwa kenaikan RTT sebesar 10 ms seiring bertambahnya durasi terjadi pada kedua konfigurasi dengan besar yang sama. Kenaikan bersama ini tidak dapat diatribusikan kepada perlakuan antrian, karena perlakuan yang berbeda seharusnya menghasilkan laju kenaikan yang berbeda. Penjelasan yang lebih masuk akal adalah adanya faktor yang berubah bersama waktu pengujian, misalnya bertambahnya isi penyangga pada sisi klien, perubahan beban klien lain, atau variasi jalur internet. Data yang tersedia belum cukup untuk memisahkan faktor-faktor tersebut, sehingga kenaikan RTT antardurasi dilaporkan sebagai gejala, bukan sebagai efek perlakuan.

3.4. Pembahasan

Pemetaan hasil ke kategori pada Tabel 2 sampai Tabel 4 menunjukkan bahwa RTT 40 ms sampai 95 ms berada pada kategori sangat bagus, *jitter* 5 ms sampai 10 ms berada pada kategori bagus, dan indikasi *packet loss* 0,1% sampai 0,8% berada pada kategori bagus, bukan sangat bagus, karena kategori sangat bagus hanya berlaku untuk nilai 0%. Laju agregat tidak dikategorikan karena ambang TIPHON disusun untuk kebutuhan teleponi. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak berada seluruhnya pada kategori terbaik, dan kategori TIPHON tidak dapat dipakai untuk membedakan kedua konfigurasi.

Secara mekanistik, perbedaan RTT yang konsisten lebih rendah pada konfigurasi PCQ dapat dijelaskan melalui cara kedua konfigurasi membagi kesempatan pengiriman. Pada PCQ, aliran milik klien pengamat menempati salah satu sub-antrian dan memperoleh jatah yang tidak bergantung pada jumlah kelas lain, sedangkan pada *Queue Tree* aliran tersebut berbagi kelas dengan trafik lain yang ditandai sama. Hipotesis yang muncul adalah bahwa pembagian per sub-antrian menghasilkan antrian yang lebih pendek pada aliran yang diamati. Hipotesis ini belum diverifikasi karena statistik antrian, jumlah paket yang menunggu, dan laju kedatangan trafik tidak direkam dalam penelitian ini; untuk mengujinya diperlukan data antrian sebagai deret waktu.

Mengecilnya selisih RTT dari 15 ms pada 360p menjadi 5 ms pada 720p dapat dikaitkan dengan bertambahnya volume data pada resolusi tinggi sehingga antrian pada kedua konfigurasi menjadi lebih panjang. Penjelasan tersebut juga bersifat hipotetis. Yang dapat dinyatakan dari data adalah bahwa keunggulan RTT PCQ tetap teramati pada kedua resolusi, tetapi besarnya menyusut ketika beban naik.

Dari sisi pengelolaan, kedua konfigurasi memiliki konsekuensi yang berbeda. *Queue Tree* menuntut penandaan trafik, pembentukan kelas, dan penetapan batas per kelas, sehingga pengelola memperoleh kendali atas prioritas layanan. PCQ hanya menuntut satu tipe antrian dan satu *simple queue*, sehingga lebih sederhana diterapkan dan dipelihara, tetapi tidak dapat memberi prioritas pada jenis layanan tertentu. Pada jaringan sekolah dengan tenaga pengelola terbatas, kesederhanaan tersebut dapat menjadi pertimbangan utama; sebaliknya, jika sekolah perlu menjamin kualitas kelas trafik pembelajaran, struktur berbasis kelas lebih sesuai.

Hasil ini melengkapi kajian perbandingan yang telah dilakukan pada jaringan sekolah menengah kejuruan [11] dan jaringan WLAN [12]. Perbedaan utama penelitian ini bukan pada angka QoS yang baru, melainkan pada perumusan perlakuan: kedua konfigurasi dijelaskan pada tingkat parameter, pengukuran dibatasi pada satu klien pengamat, dan setiap parameter didefinisikan secara operasional. Dengan cara ini, perbandingan dapat direplikasi dan hasilnya tidak bergantung pada label “HTB” atau “PCQ” semata. Hasil penelitian juga melengkapi kajian pengelolaan trafik *video streaming* dengan PCQ [13], yang tidak melaporkan RTT dan *jitter* secara terpisah pada klien.

Selisih RTT yang tetap sebesar 15 ms pada 360p dan 5 ms pada 720p untuk ketiga durasi lebih konsisten dengan perbedaan panjang antrian yang ditentukan oleh beban sesaat daripada oleh akumulasi sepanjang sesi. Kenaikan RTT sebesar 10 ms ketika durasi bertambah dapat dibaca sebagai gejala bertambahnya waktu tunggu di antrian hilir, yang dalam literatur jaringan dikenal sebagai *bufferbloat*, tetapi data yang tersedia tidak memisahkan kontribusi antrian pada *router*, antrian pada *access point*, dan variasi jalur internet. Klaim bahwa antrian terus bertambah sepanjang sesi karena itu tidak dapat ditegakkan; yang dapat dinyatakan adalah bahwa RTT pada pengujian 30 menit lebih tinggi daripada RTT pada pengujian 5 menit untuk kedua konfigurasi.

Jitter tidak mengikuti arah selisih RTT. Apabila perbedaan panjang antrian merupakan satu-satunya penjelas, konfigurasi dengan RTT lebih rendah seharusnya juga memiliki *jitter* lebih rendah pada semua kondisi. Kenyataannya, PCQ lebih rendah 1 ms pada 360p tetapi lebih tinggi 1 ms pada 720p. Selisih 1

ms berada pada orde yang sama dengan ketelitian pelaporan dan dengan variasi yang mungkin timbul dari jumlah segmen yang terukur pada setiap kondisi, sehingga arah yang berbalik tidak dapat ditafsirkan. Untuk memisahkan efek perlakuan dari derau pengukuran diperlukan pengulangan pada kondisi yang sama, yang tidak tersedia dalam penelitian ini.

Definisi operasional yang dipakai perlu dibaca bersama keterbatasan pengukuran satu titik. RTT mencakup perjalanan pulang-pergi, sehingga nilainya lebih besar daripada *delay* satu arah dan kategori TIPHON yang diterapkan padanya bersifat konservatif. *Jitter* yang dihitung dari variasi RTT memuat kontribusi kedua arah perjalanan, sedangkan indikasi *packet loss* berbasis retransmisi hanya menangkap kehilangan yang memicu pengiriman ulang. Ketiga definisi ini konsisten satu sama lain karena berasal dari sumber data yang sama, tetapi tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan studi yang mengukur *delay* satu arah menggunakan dua titik penangkapan yang tersinkronisasi.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu juga perlu dilakukan secara hati-hati karena perbedaan konfigurasi dan titik pengukuran. Iskandar dkk. [11] membandingkan PCQ dan HTB pada jaringan sekolah menengah kejuruan, sedangkan Kusbandono dkk. [12] membandingkan keduanya pada WLAN. Keduanya melaporkan parameter QoS tanpa merinci struktur antrian, tipe antrian pada kelas, dan lokasi penangkapan paket, sehingga belum dapat dipastikan apakah perlakuan yang dibandingkan setara dengan penelitian ini. Kariyamin dkk. [13] menguji PCQ untuk *video streaming* dengan variasi kualitas, tetapi tidak melaporkan RTT dan *jitter* per klien secara terpisah. Perbedaan hasil antarsstudi karena itu tidak dapat diperlakukan sebagai bukti bahwa salah satu konfigurasi lebih baik secara umum.

Bagi pengelola jaringan sekolah, hasil ini dapat diterjemahkan menjadi tiga pertimbangan. Pertama, apabila tujuan utama adalah menekan waktu tunggu pada klien yang memutar video, konfigurasi PCQ memberi RTT lebih rendah pada seluruh kondisi yang diuji, dengan selisih 5 ms sampai 15 ms. Kedua, apabila tujuan adalah menjamin kualitas kelas trafik tertentu, misalnya mendahulukan pembelajaran daring atas trafik hiburan, konfigurasi berbasis kelas memberi kendali yang tidak dimiliki PCQ. Ketiga, apabila tenaga pengelola terbatas, PCQ lebih sederhana karena tidak memerlukan penandaan trafik dan pemeliharaan kelas. Ketiga pertimbangan tersebut bersifat kualitatif dan tidak bergantung pada uji signifikansi, tetapi perlu diverifikasi pada kondisi beban yang lebih beragam sebelum dijadikan pedoman umum.

3.5. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang membatasi ruang lingkup kesimpulannya. Pertama, pengukuran hanya dilakukan pada satu klien pengamat, sehingga hasilnya menggambarkan pengalaman klien tersebut dan tidak dapat dipakai untuk menilai pemerataan *bandwidth* atau kualitas layanan seluruh pengguna. Kedua, setiap kondisi dijalankan satu kali; ketiga durasi merupakan pengujian terpisah, tetapi bukan pengulangan independen pada kondisi yang sama, sehingga variasi antar-pengulangan, interval kepercayaan, dan uji signifikansi tidak dapat dihitung.

Ketiga, penelitian ini belum menyertakan skenario kontrol berupa jaringan tanpa manajemen *bandwidth*, sehingga besarnya pengaruh masing-masing konfigurasi terhadap kondisi dasar belum diketahui. Keempat, pengujian hanya dilakukan pada satu tingkat batas 30 Mbps, satu lokasi, dan satu rentang waktu, sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi ke kapasitas, lokasi, atau jam sibuk lain. Kelima, parameter yang diukur adalah RTT, *jitter* RTT, dan indikasi *packet loss* berbasis retransmisi; nilai tersebut bukan *delay* satu arah dan bukan *packet loss end-to-end*.

Keenam, penelitian ini tidak mengukur metrik pengalaman pengguna seperti waktu tunggu awal pemutaran, jumlah dan durasi *stall*, rasio *rebuffering*, dan resolusi yang benar-benar dipertahankan pemutar. Klaim mengenai pengalaman pemutaran karena itu tidak dapat dibuat. Ketujuh, kondisi kanal nirkabel, RSSI, jarak, dan aktivitas jaringan pesaing tidak direkam, sehingga kontribusi faktor fisik terhadap variasi hasil belum dapat dipisahkan. Kedelapan, berkas ekspor konfigurasi *router* dan berkas PCAP mentah belum diarsipkan bersama naskah, sehingga verifikasi ulang pengukuran memerlukan pengambilan data baru. Nilai laju agregat juga tidak menggambarkan pembagian *bandwidth* per klien, dan nilai limit-at serta prioritas tiap kelas tidak tercatat pada arsip konfigurasi sehingga tidak dapat dilaporkan secara rinci.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan dua konfigurasi manajemen *bandwidth* pada jaringan sekolah dengan batas agregat 30 Mbps, yaitu *Queue Tree* berbasis kelas dengan HTB dan *Simple Queue* bertipe PCQ, diukur pada satu klien pengamat. Konfigurasi PCQ menghasilkan RTT lebih rendah pada seluruh kondisi, yaitu 45 ms berbanding 60 ms pada 360p dan 85 ms berbanding 90 ms pada 720p. Perbedaan *jitter*, indikasi *packet loss*, dan laju agregat tidak menunjukkan pola yang konsisten: *jitter* berbeda 1 ms dengan arah yang berbalik antarsresolusi, *packet loss* berbeda 0,1 poin persentase pada 360p dan sama pada 720p, sedangkan laju agregat kedua konfigurasi berada pada 90% sampai 95% batas.

Karena setiap kondisi hanya dijalankan satu kali tanpa pengulangan independen, selisih tersebut dilaporkan sebagai hasil deskriptif dan belum dapat dinyatakan sebagai perbedaan yang sistematis. Pada batas 30 Mbps dan beban yang diuji, kedua konfigurasi menjaga RTT pada kategori sangat bagus serta *jitter* dan *packet loss* pada kategori bagus menurut kategori yang diadaptasi dari TIPHON. Pemilihan konfigurasi karena itu lebih tepat didasarkan pada kebutuhan pengelolaan: *Queue Tree* apabila sekolah perlu memprioritaskan kelas trafik tertentu, dan PCQ apabila kesederhanaan konfigurasi menjadi pertimbangan utama. Pengujian lanjutan perlu menambahkan skenario kontrol, beberapa tingkat klien aktif, pengulangan independen, pengukuran per klien, serta metrik pengalaman pemutaran sebelum rekomendasi yang lebih luas dapat diberikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Wiryany, S. Natasha, and R. Kurniawan, "Perkembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi terhadap Perubahan Sistem Komunikasi Indonesia," *J. Nomosleca*, vol. 8, no. 2, pp. 242–252, Nov. 2022, doi: 10.26905/nomosleca.v8i2.8821.

[2] S. Aminah, "Manajemen Bandwidth dalam Mengoptimalkan Penggunaan Router Mikrotik terhadap Pelayanan Koneksi Jaringan," *J. Inform. Ekon. Bisnis*, pp. 102–106, Sep. 2022, doi: 10.37034/infeb.v4i3.144.

[3] S. J. Rashid, A. M. Alkababji, and A. S. M. Khidhir, "Performance evaluation of software-defined networking controllers in wired and wireless networks," *TELKOMNIKA Telecommun. Comput. Electron. Control*, vol. 21, no. 1, p. 49, Feb. 2023, doi: 10.12928/telkomnika.v21i1.23468.

[4] J. Alkenani and K. Nassar, "Network Monitoring Measurements for Quality of Service: A Review," *Iraqi J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 33–42, Dec. 2022, doi: 10.37917/ijeee.18.2.5.

[5] MikroTik, "Queues," *RouterOS Manual*, 2025. [Online]. Available: https://manual.mikrotik.com/docs/firewall-and-quality-of-service/queues/

[6] I. W. D. Arianata, G. Feoh, and P. W. Gunawan, "Implementasi Manajemen Bandwidth dengan Metode Hierarchical Token Bucket (HTB), Per Connection Queue (PCQ), dan Layer 7 Protokol Menggunakan Router Mikrotik," *J. Kesehat. Sains dan Teknol. JAKASAKTI*, vol. 1, no. 1, Aug. 2022, doi: 10.36002/js.v1i1.1931.

[7] M. F. Hafizena and D. P. Putri, "Analisis dan Perancangan Manajemen Bandwidth Menggunakan Metode HTB dengan Mikrotik pada Jaringan SMA Negeri 4 Palembang," *J. Electr. Power Control Autom. (JEPCA)*, vol. 6, no. 2, p. 35, Feb. 2024, doi: 10.33087/jepca.v6i2.98.

[8] H. S. Simarmata and I. R. Widiasari, "Manajemen Bandwidth Menggunakan Hierarchical Token Bucket (HTB) (Studi Kasus: PT. Orion Cyber Internet)," *Technomedia J.*, vol. 8, no. 2SP, pp. 248–260, Aug. 2023, doi: 10.33050/tmj.v8i2SP.2078.

[9] M. S. Anwar, "Analisis QoS (Quality of Service) Manajemen Bandwidth menggunakan Metode Kombinasi Simple Queue dan PCQ (Per Connection Queue) pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sumatera Utara," *Sudo J. Tek. Inform.*, vol. 1, no. 2, pp. 82–97, Jun. 2022, doi: 10.56211/sudo.v1i2.24.

[10] S. Lutfi, S. Kapita, H. K. Sirajuddin, and Y. Muin, "Development of Adaptive Bandwidth Allocation Model Using PCQ for Network Performance Optimization," *Tech. Romanian J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 234–237, Nov. 2023, doi: 10.47577/technium.v17i.10081.

[11] M. I. Iskandar, R. Satra, and L. Syafie, "Analisis Performansi Jaringan dengan Metode Per Connection Queue (PCQ) dan Hierarchical Token Bucket (HTB) di SMK Latanro Enrekang," *Bul. Sist. Inf. dan Teknol. Islam*, vol. 4, no. 1, pp. 15–24, Feb. 2023, doi: 10.33096/busiti.v4i1.1503.

[12] H. Kusbandono, T. Lestariningsih, and T. Septianto, "Comparative Analysis of Quality of Service (QoS) on WLAN Network Bandwidth Management using HTB Method with PCQ," *East Asian J. Multidiscip. Res.*, vol. 3, no. 10, pp. 4797–4810, Oct. 2024, doi: 10.55927/eajmr.v3i10.11675.

[13] Kariyamin, D. L. A'an, L. O. Alyandi, and A. Imantoyo, "Traffic Management Analysis for Video Streaming Service Optimization Using Per Connection Queue (PCQ) Method," *Sci. J. Eng. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2025, doi: 10.64539/sjer.v1i1.2025.7.

[14] M. Mukhlisin, "Tinjauan Literatur: Implementasi Manajemen Bandwidth Hierarchical Token Bucket (HTB) dan Per Connection Queue (PCQ)," *J. Teknol. Inf. dan Komput.*, vol. 11, no. 1, pp. 57–68, Apr. 2025, doi: 10.36002/jutik.v11i1.3756.

[15] K. R. N. Duri and J. Monsya, "Analisis Perbandingan QoS dengan Standarisasi TIPHON: Metode Simple Queue dan Per Connection Queue," *J. PROCESSOR*, vol. 20, no. 1, 2025, doi: 10.33998/processor.2025.20.1.2027.

[16] L. Kristiana and A. Z. Azmi, "Bandwidth Limitation Based on Content Classification Using Queue Trees and Hierarchical Token Buckets," *E3S Web Conf.*, vol. 484, p. 02011, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202448402011.

[17] ETSI, "Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON) Release 3; 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, Jan. 2002.