

Analisis Komparatif Kinerja Algoritma *Scheduler Queue* terhadap *Quality of Service Bandwidth* MikroTik RouterOS v7

¹Hendrik Kusbandono, ²Tri Septianto, ³Angger Binuko Paksi, ⁴Gus Nanang Syaifuddiin

^{1*,2,3,4}Program Studi Teknologi Informasi dan Terapan Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak,
Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Indonesia

*Korespondensi: h3ndrik57@pnm.ac.id

Submit : 20 Agust 2026 | Diterima : 15 Sept 2026 | Terbit : 17 Sept 2026

ABSTRACT

Internet Protocol (IP) network quality is determined not only by bandwidth capacity but also by the ability to maintain Quality of Service (QoS) parameters such as throughput, delay, jitter, and packet loss. Previous MikroTik research has generally focused on a single scheduler queue method or a comparison of two, so the comparative characteristics of modern Active Queue Management (AQM) algorithms remain underexamined. This study analysed six scheduler queue methods, namely First In First Out (FIFO), Random Early Detection (RED), Stochastic Fair Queueing (SFQ), Per Connection Queue (PCQ), Flow Queue Controlled Delay (FQ-CoDel), and Common Applications Kept Enhanced (CAKE), on MikroTik RouterOS v7 and their effect on QoS under varying traffic loads. A quantitative experimental approach modelled TCP traffic through the Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD) congestion control mechanism and UDP traffic through VoIP and Video profiles, tested across 72 scenarios with five replications each. Data were analysed using descriptive statistics, relative ranking, the Kruskal-Wallis test, and Jain's Fairness Index. The results showed that FIFO, SFQ, and PCQ were prone to bufferbloat, with delay exceeding 50 ms under overload and peaking at 110.38 ms for PCQ on video traffic, whereas CAKE and FQ-CoDel held latency below 6 ms throughout. CAKE achieved the best composite rank (2.70) with the highest TCP throughput (9.86 Mbps) and the lowest delay (2.53 ms), while PCQ attained a perfect Fairness Index (1.00) on UDP traffic. CAKE is recommended for latency-sensitive heterogeneous networks, whereas PCQ remains preferable when fairness of bandwidth distribution among users is the priority.

Keywords: Active Queue Management; Bandwidth management; MikroTik RouterOS v7; Quality of Service; Scheduler Queue

ABSTRAK

Kualitas jaringan Internet Protocol (IP) tidak hanya ditentukan oleh kapasitas *bandwidth*, tetapi juga oleh kemampuan jaringan mempertahankan parameter *Quality of Service* (QoS) seperti *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss*. Penelitian terdahulu mengenai manajemen *bandwidth* pada MikroTik umumnya berfokus pada satu atau dua metode *scheduler queue*, sehingga karakteristik komparatif algoritma *Active Queue Management* (AQM) modern belum banyak dikaji secara menyeluruh. Penelitian ini menganalisis karakteristik enam metode *scheduler queue*, yaitu *First In First Out* (FIFO), *Random Early Detection* (RED), *Stochastic Fair Queueing* (SFQ), *Per Connection Queue* (PCQ), *Flow Queue Controlled Delay* (FQ-CoDel), dan *Common Applications Kept Enhanced* (CAKE), pada MikroTik RouterOS v7 serta pengaruhnya terhadap QoS pada berbagai tingkat beban trafik. Pendekatan eksperimental kuantitatif digunakan dengan memodelkan trafik TCP melalui mekanisme *congestion control Additive Increase Multiplicative Decrease* (AIMD) dan trafik UDP melalui profil VoIP dan Video, diuji pada 72 skenario dengan lima replikasi per skenario. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, peringkat relatif, uji *Kruskal-Wallis*, dan *Jain's Fairness Index*. Hasil menunjukkan FIFO, SFQ, dan PCQ rentan terhadap *bufferbloat* dengan *delay* di atas 50 ms saat *overload* dan puncak 110,38 ms pada PCQ untuk trafik video, sedangkan CAKE dan FQ-CoDel mempertahankan latensi di bawah 6 ms pada seluruh profil trafik. CAKE meraih peringkat komposit terbaik (2,70) dengan *throughput* TCP tertinggi (9,86 Mbps) dan *delay* terendah (2,53 ms), sementara PCQ mencapai *Fairness Index* sempurna (1,00) pada trafik UDP. CAKE direkomendasikan untuk

jaringan heterogen yang sensitif latensi, sedangkan PCQ menjadi pilihan utama ketika keadilan distribusi *bandwidth* antarpengguna menjadi prioritas.

Kata Kunci: *Active Queue Management; Manajemen bandwidth; MikroTik RouterOS v7; Quality of Service; Scheduler Queue*

PENDAHULUAN

Perkembangan aplikasi jaringan seperti video *streaming*, *video conference*, Voice over Internet Protocol (VoIP), dan layanan komputasi awan menuntut kualitas jaringan yang stabil dan responsif. Kualitas jaringan tidak hanya ditentukan oleh kapasitas *bandwidth*, tetapi juga oleh kemampuan jaringan mempertahankan parameter *Quality of Service* (QoS) seperti *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* (Putra, Adnyana, & Jasa, 2021). Pada kondisi trafik tinggi, paket yang melebihi kapasitas pemrosesan router akan tertahan dalam *buffer*. Pengelolaan *buffer* yang tidak tepat memicu *packet loss* maupun fenomena *bufferbloat* yang meningkatkan *delay* secara signifikan (Rizkan, Hariyadi, & Latif, 2025).

Salah satu pendekatan utama manajemen *bandwidth* adalah algoritma penjadwalan antrian (*queue scheduling*). MikroTik RouterOS menyediakan berbagai metode, mulai dari *First In First Out* (FIFO) yang sederhana, *Random Early Detection* (RED) dan *Stochastic Fair Queueing* (SFQ) yang berupaya mengurangi *kongesti*, hingga *Per Connection Queue* (PCQ) yang membagi *bandwidth* berdasarkan koneksi pengguna (Prakosa, Afrianto, Agustiyana, & Setiadi, 2024). Kombinasi PCQ dan *Queue Tree* terbukti meningkatkan distribusi *bandwidth* pada jaringan berbasis MikroTik (Christanto, Daru, & Kurniawan, 2021; Darusalam, Mandasari, & Hartana, 2024), sementara implementasi PCQ pada jaringan *multi-user*, nirkabel, dan lingkungan sekolah turut menunjukkan hasil yang konsisten (Irawan, Herianto, Aisyah, & Wahyuni, 2022; Ridwan, Solehudin, & Rozikin, 2024; Rizky, Solehudin, & Nurkifli, 2024; Santosa, Juardi, & Heryana, 2024). Selain metode konvensional, MikroTik RouterOS v7 turut mengadopsi algoritma modern seperti *Flow Queue Controlled Delay* (FQ-CoDel) dan *Common Applications Kept Enhanced* (CAKE) yang mengintegrasikan *Active Queue Management* (AQM) berbasis waktu antrian paket.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji manajemen *bandwidth* berbasis MikroTik. Kusbandono dan Syafitri (2019) menerapkan metode PCQ pada jaringan WLAN Politeknik Negeri Madiun dan membuktikan PCQ mampu mendistribusikan *bandwidth* lebih merata, namun tanpa membandingkannya dengan algoritma lain. Kusbandono, Lestariningsih, dan Septianto (2024) melanjutkan kajian tersebut dengan membandingkan *Hierarchical Token Bucket* (HTB) dan PCQ, menunjukkan perbaikan pada *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss*, tetapi masih terbatas pada dua metode. Prakosa dkk. (2024) mengevaluasi teknik manajemen *bandwidth* pada router MikroTik melalui pendekatan regresi linear berganda tanpa membandingkan karakteristik antaralgoritma penjadwalan secara langsung, sementara Fathurrohman dan Basuki (2025) mengkaji CAKE dalam konteks *load balancing* multi-ISP dan bukan sebagai pembanding lintas algoritma *scheduler queue*. Rizkan dkk. (2025) telah menguji CAKE secara spesifik untuk mengatasi *bufferbloat*, namun hanya pada satu algoritma tanpa pembanding konvensional dalam kerangka pengujian yang seragam.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada implementasi satu metode atau perbandingan terbatas dua metode, khususnya PCQ, HTB, dan *Queue Tree*, sehingga karakteristik komparatif algoritma AQM modern terhadap algoritma konvensional pada kondisi beban trafik yang bervariasi belum banyak diungkap secara komprehensif dalam satu kerangka pengujian yang seragam. Kesenjangan ini penting untuk diisi mengingat MikroTik RouterOS v7 telah mengadopsi kernel Linux modern yang mendukung FQ-CoDel dan CAKE, sehingga administrator jaringan memerlukan bukti empiris pembanding sebelum menentukan pilihan implementasi.

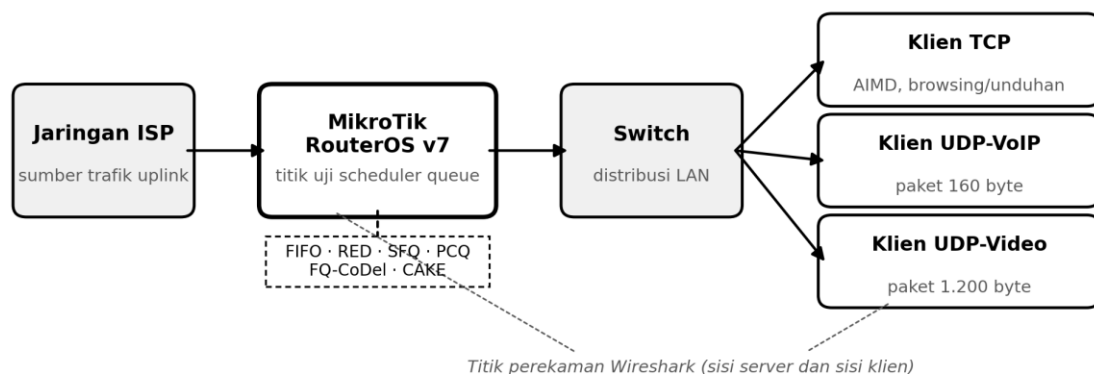
Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik enam metode *scheduler queue* (FIFO, RED, SFQ, PCQ, FQ-CoDel, dan CAKE) pada MikroTik RouterOS v7 dan pengaruhnya terhadap parameter QoS pada berbagai kondisi beban dan jenis trafik (TCP, UDP-VoIP, UDP-Video), sekaligus menentukan algoritma yang paling optimal untuk manajemen *bandwidth* jaringan IP. Kontribusi penelitian ini adalah pemetaan empiris yang komprehensif atas karakteristik keenam algoritma tersebut lintas tiga profil trafik dan empat tingkat beban, sehingga memberikan rekomendasi praktis berbasis bukti bagi administrator jaringan dalam memilih algoritma *scheduler queue* yang sesuai dengan karakteristik trafik yang dilayani. Kajian ini melengkapi model pemeringkatan komposit yang penulis kembangkan secara terpisah (Kusbandono, Septianto, Paksi, & Ramadhan, 2026); apabila kajian tersebut menitikberatkan pada konstruksi

model pemeringkatan, artikel ini menitikberatkan pada pemaparan karakteristik QoS keenam algoritma pada tiga profil trafik dan uji signifikansi perbedaannya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk menganalisis karakteristik *scheduler queue* terhadap QoS pada manajemen *bandwidth* jaringan IP, mengikuti kerangka pengujian *testbed* sebagaimana direkomendasikan oleh Mone dkk. (2022) untuk evaluasi *queue discipline* pada platform Linux modern.

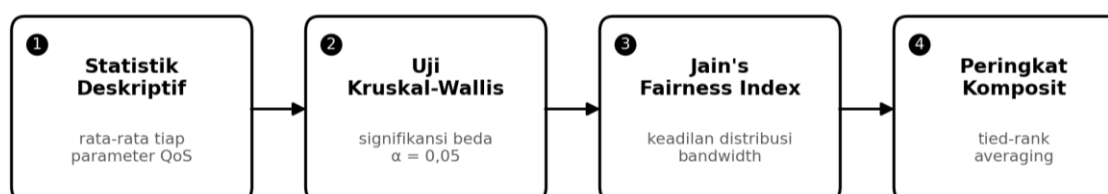
Objek penelitian adalah subnet Internet Service Provider (ISP) yang dikonfigurasi menggunakan router MikroTik RouterOS v7 dan switch pendukung. Enam metode *scheduler queue* yang diuji meliputi FIFO, RED, SFQ, PCQ, FQ-CoDel, dan CAKE, dikonfigurasi bergantian pada perangkat yang sama untuk menjaga homogenitas kondisi jaringan, yaitu topologi, kapasitas link, dan spesifikasi perangkat keras. Topologi pengujian yang digunakan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Topologi Pengujian *Scheduler Queue* pada MikroTik RouterOS v7

Tiga profil trafik digunakan untuk merepresentasikan kondisi jaringan nyata. Pertama, TCP yang dimodelkan dengan mekanisme *congestion control Additive Increase Multiplicative Decrease* (AIMD) untuk merepresentasikan trafik data umum seperti *browsing* dan unduhan. Kedua, UDP-VoIP dengan ukuran paket kecil sebesar 160 byte untuk merepresentasikan panggilan suara interaktif. Ketiga, UDP-Video dengan ukuran paket besar sebesar 1.200 byte dan bitrate tinggi untuk merepresentasikan *streaming* maupun *video conference*. Setiap profil trafik diuji pada empat tingkat beban jaringan, yaitu rendah, sedang, tinggi, dan *overload*, sehingga menghasilkan 72 skenario kombinasi yang berasal dari enam scheduler dikali tiga profil trafik dikali empat tingkat beban, masing-masing direplikasi sebanyak lima kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

Parameter QoS yang diukur meliputi *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss*, direkam menggunakan aplikasi Wireshark pada sisi klien dan server, sejalan dengan pendekatan pengukuran empiris pada jaringan berskala kecil hingga menengah (Jafri dkk., 2022). Analisis data dilakukan melalui empat tahap sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Analisis Data Penelitian

Tahap pertama adalah statistik deskriptif untuk memaparkan nilai rata-rata tiap parameter pada setiap skenario. Tahap kedua adalah uji beda *non-parametrik Kruskal-Wallis* pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ untuk menguji perbedaan performa antaralgoritma pada kondisi beban *overload*; uji *non-parametrik* dipilih karena distribusi data hasil pengukuran tidak

memenuhi asumsi normalitas dan jumlah replikasi per skenario relatif kecil. Tahap ketiga adalah perhitungan *Jain's Fairness Index* terhadap *throughput* untuk mengevaluasi keadilan distribusi *bandwidth* antarpengguna. Tahap keempat adalah penyusunan peringkat komposit menggunakan metode rata-rata peringkat berbobot (*tied-rank averaging*) berdasarkan akumulasi performa *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* pada kondisi beban tinggi dan *overload*, di mana nilai rata-rata peringkat yang lebih rendah mengindikasikan performa yang lebih unggul.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja QoS pada Kondisi Beban Berlebih

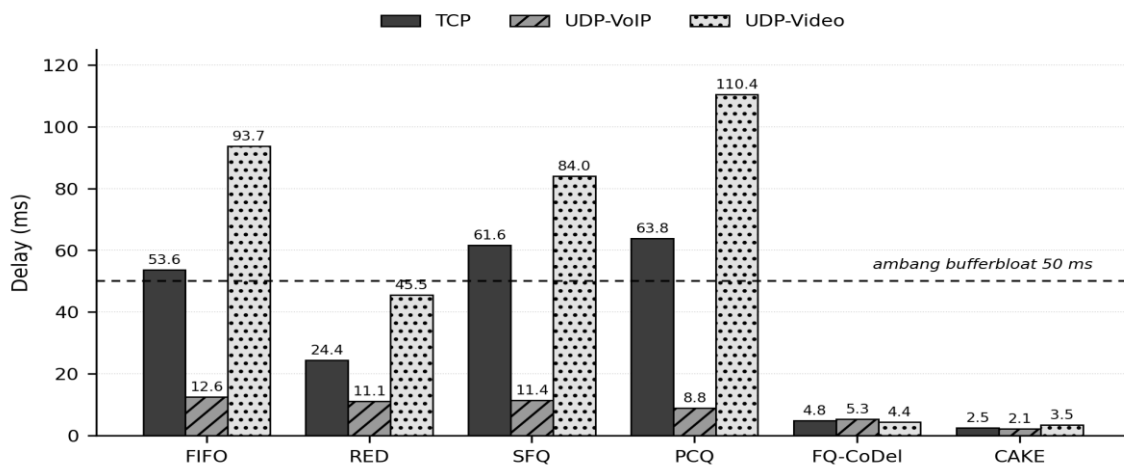
Pengujian dilakukan pada 72 skenario kombinasi scheduler, profil trafik, dan tingkat beban. Bagian ini memfokuskan pembahasan pada kondisi paling kritis, yaitu beban berlebih (*overload*), karena pada kondisi tersebut perbedaan karakteristik antaralgoritma tampak paling jelas. Ringkasan kinerja QoS keenam *scheduler queue* pada kondisi *overload* lintas tiga profil trafik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja QoS Keenam *Scheduler Queue* pada Kondisi Overload

<i>Scheduler</i>	<i>Throughput TCP (Mbps)</i>	<i>Delay TCP (ms)</i>	<i>Delay UDP-VoIP (ms)</i>	<i>Delay UDP-Video (ms)</i>	<i>Packet Loss TCP (%)</i>
FIFO	9,22	53,61	12,56	93,67	3,22
RED	9,30	24,42	11,11	45,46	4,17
SFQ	8,11	61,56	11,42	84,01	3,97
PCQ	8,97	63,78	8,83	110,38	3,47
FQ-CoDel	9,64	4,79	5,34	4,43	2,97
CAKE	9,86	2,53	2,10	3,47	1,23

Sumber: hasil pengolahan data pengujian jaringan (2026)

Tabel 1 memperlihatkan bahwa pada kondisi *overload* seluruh algoritma menghasilkan *throughput* TCP yang relatif setara pada rentang 8,11 hingga 9,86 Mbps, namun perbedaan mencolok terjadi pada parameter *delay*. Perbandingan *delay* ketiga profil trafik untuk keenam algoritma divisualisasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan Delay Keenam *Scheduler Queue* pada Kondisi Overload

Gambar 3 menunjukkan CAKE dan FQ-CoDel konsisten mempertahankan *delay* di bawah 6 ms pada ketiga profil trafik, sedangkan FIFO, SFQ, dan PCQ mengalami lonjakan *delay* melampaui ambang 50 ms, khususnya pada trafik UDP-Video dengan ukuran paket besar, di mana PCQ mencatat *delay* tertinggi sebesar 110,38 ms diikuti FIFO sebesar 93,67 ms. RED menjadi pengecualian di antara algoritma konvensional karena mekanisme pembuangan paket probabilistiknya menahan *delay* pada 24,42 ms untuk TCP dan 45,46 ms untuk UDP-Video, keduanya di bawah ambang 50 ms; perbaikan *delay* tersebut dibayar dengan *packet loss* TCP tertinggi di antara seluruh algoritma, yaitu 4,17 persen. Pola ini menegaskan adanya pertukaran (*trade-off*) antara *delay* dan *packet loss* pada algoritma konvensional berbasis panjang antrian.

Lonjakan *delay* pada FIFO, SFQ, dan PCQ merepresentasikan *bufferbloat*, yaitu penundaan paket akibat *buffer* terisi penuh sebelum mekanisme pengendalian bekerja, sebagaimana dijelaskan pertama kali dalam kajian klasik RED (Floyd & Jacobson, 1993). Sebaliknya, CAKE dan FQ-CoDel menerapkan *Active Queue Management* berbasis waktu antrai yang secara aktif membuang paket sebelum *buffer* penuh, sehingga mengirim sinyal *kongesti* dini ke pengirim melalui mekanisme AIMD tanpa mengorbankan *throughput* (Høiland-Jørgensen dkk., 2018; Nichols & Jacobson, 2012). Temuan ini sejalan dengan Rizkan dkk. (2025) yang melaporkan penurunan *bufferbloat* setelah penerapan CAKE pada MikroTik RouterOS 7, serta konsisten dengan kajian AQM pada *programmable data plane* dan jaringan NB-IoT yang menunjukkan bahwa performa AQM sangat dipengaruhi karakteristik protokol dan parameter konfigurasi (Jafri dkk., 2022; Lhamo dkk., 2024).

Uji Signifikansi Statistik

Guna membuktikan bahwa variasi performa QoS merupakan dampak nyata dari karakteristik algoritma dan bukan fluktuasi acak, dilakukan uji *non-parametrik Kruskal-Wallis* pada kondisi *overload* dengan hipotesis nol yang menyatakan tidak ada perbedaan performa signifikan antaralgoritma. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji *Kruskal-Wallis* pada Kondisi Beban Overload

Parameter	Profil Trafik	Statistik H	<i>p-value</i>	Kesimpulan ($\alpha = 0,05$)
Delay	TCP	28,86	< 0,001	Signifikan
Delay	UDP-VoIP	28,28	< 0,001	Signifikan
Delay	UDP-Video	28,22	< 0,001	Signifikan
Packet Loss	TCP	28,86	< 0,001	Signifikan
Packet Loss	UDP-VoIP	0,49	0,99	Tidak signifikan
Packet Loss	UDP-Video	0,48	0,98	Tidak signifikan

Sumber: hasil pengolahan data pengujian jaringan (2026)

Tabel 2 membuktikan bahwa perbedaan *delay* antaralgoritma signifikan secara statistik pada ketiga profil trafik dengan $p < 0,001$, sehingga hipotesis nol ditolak dan variasi performa dapat diatribusikan pada karakteristik mekanisme internal masing-masing scheduler. Pada trafik TCP, pemilihan algoritma juga berpengaruh signifikan terhadap *packet loss* dengan $p < 0,001$. Namun, pada trafik UDP baik VoIP maupun Video, perbedaan *packet loss* antaralgoritma tidak signifikan dengan p berturut-turut sebesar 0,99 dan 0,98. Hal ini terjadi karena sifat UDP yang *connectionless* menyebabkan seluruh algoritma sama-sama membuang paket ketika kapasitas link terlampaui, tanpa adanya mekanisme kendali laju data dari sisi pengirim yang dapat direspons oleh sinyal *kongesti*.

Indeks Keadilan Distribusi Bandwidth

Evaluasi keadilan distribusi *bandwidth* antarliran data dilakukan menggunakan *Jain's Fairness Index* (FI) terhadap *throughput* pada setiap skenario. Nilai indeks bergerak dalam skala teoretis 0 hingga 1, di mana nilai yang mendekati 1 merepresentasikan pemerataan alokasi sumber daya yang semakin seimbang. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Jain's Fairness Index* pada Setiap Profil Trafik

<i>Scheduler</i>	Fairness TCP	Fairness UDP-VoIP	Fairness UDP-Video
FIFO	0,99	1,00 ^a	0,99
RED	0,97	1,00 ^a	1,00 ^a
SFQ	0,94	1,00 ^a	1,00 ^a
PCQ	0,96	1,00	1,00
FQ-CoDel	0,88	0,99	0,93
CAKE	0,80	0,92	0,92

Sumber: hasil pengolahan data pengujian jaringan (2026)

^a Nilai hasil perhitungan awal melampaui batas teoretis indeks Jain (FIFO UDP-VoIP 1,06; RED UDP-VoIP 1,10 dan UDP-Video 1,30; SFQ UDP-VoIP 1,11 dan UDP-Video 1,20) dan telah dinormalisasi ke batas maksimum 1,00. Deviasi tersebut bersumber dari pencatatan *throughput* UDP pada kondisi kanal jenuh, bukan dari perbedaan perilaku algoritma.

Tabel 3 menunjukkan PCQ mempertahankan *Jain's Fairness Index* sempurna sebesar 1,00 pada trafik UDP-VoIP dan UDP-Video tanpa memerlukan normalisasi, mengonfirmasi keunggulan arsitektur PCQ dalam mengisolasi sub-antrian berdasarkan alamat IP tujuan. Pada trafik TCP, algoritma konvensional FIFO, RED, PCQ, dan SFQ justru mencatat indeks keadilan lebih tinggi pada rentang 0,94 hingga 0,99 dibandingkan algoritma AQM modern FQ-CoDel sebesar 0,88 dan CAKE sebesar 0,80. Hal ini terjadi karena mekanisme pembuangan paket aktif berbasis CoDel bekerja selektif pada aliran tertentu demi menjaga latensi global, sehingga menimbulkan fluktuasi laju data sementara antarkoneksi TCP. Dengan demikian, keunggulan CAKE pada parameter *delay* tidak otomatis diikuti keunggulan pada aspek keadilan distribusi, dan kedua aspek tersebut perlu dipertimbangkan secara terpisah sesuai kebutuhan jaringan.

Peringkat Komposit dan Pembahasan Umum

Sebagai bagian dari pemetaan empiris yang komprehensif, peringkat komposit deskriptif disusun menggunakan metode rata-rata peringkat berbobot dengan bobot setara antarparameter (*tied-rank averaging*) berdasarkan *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* pada kondisi beban tinggi dan *overload*. Peringkat ini bersifat deskriptif untuk merangkum temuan empiris dan bukan merupakan skor pengambilan keputusan multikriteria. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata Peringkat Komposit dan Posisi Akhir *Scheduler Queue*

Peringkat	<i>Scheduler</i>	Rata-rata Peringkat Komposit
1	CAKE	2,70
2	FQ-CoDel	2,98
3	PCQ	3,14
4	RED	3,24
5	FIFO	3,35
6	SFQ	3,91

Sumber: hasil pengolahan data pengujian jaringan (2026)

Berdasarkan Tabel 4, CAKE menempati peringkat komposit pertama dengan skor 2,70, diikuti FQ-CoDel sebesar 2,98 dan PCQ sebesar 3,14. Hasil ini memperluas temuan Kusbandono dan Syafitri (2019) serta Kusbandono, Lestariningsih, dan Septianto (2024) yang sebelumnya membuktikan keunggulan PCQ dalam distribusi *bandwidth* pada perbandingan dua metode. Penelitian ini menunjukkan bahwa ketika enam algoritma dibandingkan secara serentak pada kondisi beban tinggi hingga *overload*, algoritma AQM modern seperti CAKE justru unggul dalam stabilitas performa komposit, sementara keunggulan PCQ tetap relevan secara spesifik pada aspek keadilan distribusi *bandwidth*. Temuan ini konsisten dengan karakteristik CAKE yang dilaporkan Høiland-Jørgensen dkk. (2018), yaitu integrasi *shaping bandwidth*, *fair queueing*, dan pengendalian *delay* dalam satu mekanisme terpadu, serta dengan hasil Fathurrohman dan Basuki (2025) yang menemukan kontribusi positif CAKE pada distribusi trafik multi-ISP berbasis MikroTik. Perlu dicatat bahwa peringkat komposit pada Tabel 4 menggunakan bobot yang setara antarparameter QoS; ketika bobot tersebut diubah, misalnya dengan memprioritaskan keadilan distribusi *bandwidth* di atas parameter lainnya, urutan algoritma yang optimal dapat berubah secara signifikan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu menjadi perhatian dalam menafsirkan hasil. Pertama, pengujian dilakukan pada satu konfigurasi perangkat keras dan satu kapasitas kanal, sehingga generalisasi ke jaringan berkapasitas jauh lebih besar perlu dilakukan secara hati-hati. Kedua, parameter *jitter* turut diukur dan diperhitungkan dalam penyusunan peringkat komposit pada Tabel 4, tetapi nilai rincinya tidak dilaporkan dalam artikel ini karena keterbatasan ruang; pelaporan lengkap data *jitter* direncanakan pada publikasi lanjutan. Ketiga, nilai *Fairness Index* pada beberapa skenario UDP melampaui batas teoretis dan telah dinormalisasi sebagaimana dijelaskan pada Tabel 3, sehingga kalibrasi instrumen pengukuran *throughput* menjadi agenda perbaikan pada penelitian berikutnya. Keempat, penelitian ini belum mengukur beban komputasi (CPU load) akibat penerapan algoritma AQM yang secara arsitektural lebih intensif dibandingkan algoritma konvensional, padahal aspek ini menentukan kelayakan implementasi pada perangkat router berspesifikasi rendah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa algoritma konvensional bersifat pasif terhadap pengisian *buffer* sehingga rentan terhadap *bufferbloat*, dengan FIFO, SFQ, dan PCQ mencatat lonjakan *delay* di atas 50 ms pada kondisi *overload* dan RED menahan *delay* di bawah ambang tersebut namun dengan konsekuensi *packet loss* TCP tertinggi sebesar 4,17 persen, sedangkan algoritma *Active Queue Management* modern FQ-CoDel dan CAKE yang didukung kernel Linux terbaru pada MikroTik RouterOS v7 secara aktif memotong waktu tunggu paket di dalam *buffer* sehingga mempertahankan latensi global di bawah 6 ms pada seluruh profil trafik yang diuji, dengan perbedaan performa yang terbukti signifikan secara statistik melalui uji *Kruskal-Wallis* pada $p < 0,001$. Berdasarkan peringkat komposit, CAKE terbukti sebagai algoritma paling optimal secara menyeluruh dengan skor 2,70, *throughput* TCP tertinggi sebesar 9,86 Mbps, dan *delay* terendah sebesar 2,53 ms pada TCP, 2,10 ms pada VoIP, serta 3,47 ms pada Video, sedangkan PCQ tetap menjadi pilihan terbaik ketika keadilan distribusi *bandwidth* antarpengguna menjadi prioritas utama dengan *Jain's Fairness Index* sempurna sebesar 1,00 pada kedua profil trafik UDP. Dengan demikian, administrator jaringan disarankan mengimplementasikan CAKE pada MikroTik RouterOS v7 untuk jaringan heterogen yang melayani trafik campuran *browsing* dan *real-time*, sementara PCQ tetap relevan untuk jaringan publik yang mengutamakan pemerataan *bandwidth* murni berbasis alamat IP pengguna, dan penelitian lanjutan disarankan mengkaji dampak beban komputasi (CPU load) dari implementasi algoritma AQM modern serta melaporkan data *jitter* secara lengkap.

REFERENSI

- Aziz, M. (2025). Optimasi jaringan dengan Common Application Kept Enhanced pada MikroTik RouterOS 7 untuk mengatasi *bufferbloat*. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3), 2211–2224. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3.7088>
- Christanto, F. W., Daru, A. F., & Kurniawan, A. (2021). Metode PCQ dan Queue Tree untuk implementasi manajemen *bandwidth* berbasis Mikrotik. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 5(2), 407–412. <https://doi.org/10.29207/resti.v5i2.3026>
- Darusalam, A. F., Mandasari, R. D., & Hartana. (2024). Manajemen *bandwidth* menggunakan metode Queue Tree tipe PCQ. *Jurnal Responsif*, 6(1), 73–81.
- Fathurrohman, M., & Basuki, A. (2025). Evaluation of traffic distribution performance of ECMP and PCC+CAKE for multi-ISP load balancing on real networks based using Mikrotik. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 10(4). <https://doi.org/10.22219/kinetik.v10i4.2374>
- Floyd, S., & Jacobson, V. (1993). Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(4), 397–413. <https://doi.org/10.1109/90.251892>
- Høiland-Jørgensen, T., Täht, D., & Morton, J. (2018). Piece of CAKE: A comprehensive queue management solution for home gateways. In 2018 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN) (pp. 37–42). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LANMAN.2018.8475045>
- Irawan, Y., Herianto, Aisyah, S., & Wahyuni, R. (2022). Analisa prioritas *bandwidth* menggunakan metode Hierarchical Token Bucket. *SATIN – Sains dan Teknologi Informasi*, 8(1), 23–31.
- Jafri, S. T. A., Ahmed, I., & Ali, S. (2022). Queue-buffer optimization based on aggressive random early detection in massive NB-IoT MANET for 5G applications. *Electronics*, 11(18), 2955. <https://doi.org/10.3390/electronics11182955>
- Kusbandono, H., Lestariningsih, T., & Septianto, T. (2024). Comparative analysis of Quality of Service (QoS) on WLAN network *bandwidth* management using HTB method with PCQ. *East Asian Journal of Multidisciplinary Research*, 3(10), 4797–4810. <https://doi.org/10.55927/eajmr.v3i10.11675>
- Kusbandono, H., & Syafitri, E. M. (2019). Penerapan Quality of Service (QoS) dengan metode Per Connection Queue (PCQ) untuk manajemen *bandwidth* internet pada WLAN Politeknik Negeri Madiun. *Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer*, 2(1), 7–12.
- Lhamo, O., Ma, M., Doan, T. V., Scheinert, T., Nguyen, G. T., Reisslein, M., & Fitzek, F. H. P. (2024). RED-SP-CoDel: Random early detection with static priority scheduling and controlled delay AQM in programmable data planes. *Computer Communications*, 214, 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.11.026>

- Mone, P., Athalye, H., Borse, C., Kshirsagar, D. D., & Patil, S. D. (2022). Testbed based analysis of Linux queue disciplines over Internet traffic mix. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 120, 102601. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102601>
- Nichols, K., & Jacobson, V. (2012). Controlling queue delay. *Communications of the ACM*, 55(7), 42–50. <https://doi.org/10.1145/2209249.2209264>
- Prakosa, B. A., Afrianto, Y., Agustiyana, S., & Setiadi, I. H. (2024). Evaluating bandwidth management techniques on Mikrotik routers: A multiple linear regression approach. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 29(4), 1561–1572. <https://doi.org/10.18280/isi.290429>
- Putra, I. B. A. E. M., Adnyana, M. S. I. D., & Jasa, L. (2021). Analisis Quality of Service pada jaringan komputer. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 20(1), 95–102. <https://doi.org/10.24843/mite.2021.v20i01.p11>
- Ridwan, M. H., Solehudin, A., & Rozikin, C. (2024). Analisis Quality of Service (QoS) jaringan wireless dengan penerapan Per Connection Queue. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(3), 3293–3309.
- Rizkan, M., Hariyadi, I. P., & Latif, K. A. (2025). Analisis implementasi algoritma Common Application Kept Enhanced (CAKE) untuk manajemen bandwidth guna mengatasi bufferbloat. *Jurnal Teknologi, Kesehatan, dan Sosial*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.30812/juteks.v1i1.5127>
- Rizky, M. A. H., Solehudin, A., & Nurkifli, E. H. (2024). Optimalisasi bandwidth menggunakan Simple Queue dan Per Connection Queue. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4), 7856–7863.
- Santosa, S. I., Juardi, D., & Heryana, N. (2024). Penerapan Per Connection Queue pada jaringan sekolah. *Jurnal Informasi dan Komputer*, 12(1), 180–188.