

ANALISA KUALITI PERKHIDMATAN PENSTRIMAN VIDEO DALAM PERSEKITARAN RANGKAIAN TERTAKRIF PERISIAN

MOHD ADIL BIN MAT TI @ MOKTI
KHAIRUL AZMI BIN ABU BAKAR

Fakulti Teknologi & Sains Maklumat, Universiti Kebangsaan Malaysia

ABSTRAK

Rangkaian Tertakrif Perisian (SDN) diwujudkan dengan tujuan untuk meningkatkan prestasi rangkaian disamping memudahkan pengurusan rangkaian kompleks pada masa ini. SDN membahagikan satah kawalan dari satah data serta menambahbaik prestasi rangkaian dari segi pengurusan rangkaian, kawalan dan pengendalian data. Pada tahun 2016, trafik penstriman video telah melangkaui 73% daripada keseluruhan trafik internet dunia dan dianggarkan ia akan meningkat kepada 82% daripada jumlah keseluruhan trafik internet seluruh dunia pada akhir tahun 2021. Menjadi satu cabaran besar untuk menawarkan kelancaran dan pengalaman penstriman yang lebih baik dalam keadaan rangkaian yang berbeza-beza. Bagi memastikan prestasi yang baik dari segi kualiti perkhidmatan dan kualiti kelancaran serta pengalaman penstriman video, adalah penting untuk mengurangkan kadar masa pendam, ketar, masa tunda, kehilangan paket serta memastikan nisbah penghantaran paket berada di tahap tertinggi. Dalam kajian ini, perbandingan analisa kualiti perkhidmatan Penyesuaian Dinamik Penstriman Melalui HTTP (DASH) dan Protokol Penghantaran Masa Nyata (RTP) dalam persekitaran SDN telah dilaksanakan. Simulasi dilaksanakan menggunakan perisian Mininet dan analisa dilakukan bagi membuat perbandingan antara daya pemprosesan, masa pendam, ketar, purata masa tunda hujung ke hujung dan kadar penghantaran paket. Keputusan menunjukkan protokol DASH mempunyai prestasi kualiti perkhidmatan yang lebih baik berbanding protokol RTP untuk penstriman video dalam persekitaran SDN dari segi ketar, purata masa tunda hujung ke hujung dan nisbah penghantaran paket.

1. PENGENALAN

Rangkaian konvensional menggunakan algoritma khas yang dilaksanakan pada peranti khusus untuk mengawal dan memantau aliran trafik dalam rangkaian, mengurus laluan laluan dan menentukan bagaimana peranti-peranti berhubung dalam rangkaian. Secara umumnya, algoritma dan set peraturan laluan ini dilaksanakan dalam komponen perkakasan khusus seperti Litar Bersepadu Aplikasi Khusus (ASICs) yang direka untuk menjalankan operasi tertentu seperti penghantaran paket (Hu et al. 2014). Dalam rangkaian konvensional, peranti penghalakan akan menggunakan satu set peraturan yang telah ditetapkan untuk mencari peranti destinasi dan laluan bagi paket tersebut.

Masalah yang sering dihadapi dalam rangkaian konvensional ialah keupayaan peranti rangkaian masakini yang terhad dalam mengendalikan trafik yang tinggi dan ia memberi kesan terhadap prestasi rangkaian. Isu-isu seperti peningkatan permintaan untuk skalabiliti, keselamatan, kebolehpercayaan dan kelajuan rangkaian boleh mengurangkan prestasi peranti rangkaian masakini kerana kapasiti trafik rangkaian yang semakin meningkat. Peranti rangkaian masakini kekurangan fleksibiliti untuk mengendalikan jenis paket yang berlainan kandungan kerana set peraturan asas yang terhad (Kim & Feamster 2013). Selain itu, rangkaian tulang belakang Internet mestilah dapat menyesuaikan diri dengan sebarang perubahan tanpa membebankan perkakasan dan perisian. Walaubagaimanapun, rangkaian konvensional tidak boleh diprogram semula atau ditugaskan semula dengan mudah (Hu et al. 2014).

Penyelesaian bagi permasalahan ini ialah pelaksanaan peraturan pengendalian data sebagai modul perisian dan bukannya tertanam dalam perkakasan (Hu et al. 2014). Kaedah ini membolehkan pentadbir rangkaian mempunyai lebih banyak kawalan ke atas trafik rangkaian

dan berpotensi besar meningkatkan kecekapan prestasi rangkaian. Teknologi inovatif ini dikenali sebagai Rangkaian Tertakrif Perisian (SDN) (Agarwal et al. 2013). Teknologi ini dicadangkan oleh Nicira Networks berdasarkan perkembangan awal mereka di UCB, Stanford, CMU, Princeton (Feamster et al. 2014).

Terdapat beberapa pendekatan baru yang muncul berkaitan SDN yang membawa pendekatan pemisahan antara pesawat data dan kawalan melalui antara muka aplikasi yang dikenali sebagai OpenFlow; iaitu sebuah kawalan berpusat yang mengurus pesawat data dan kawalan. Disamping itu, SDN juga merujuk kepada reka bentuk dan fungsi rangkaian berdasarkan keupayaan untuk mengubahsuai aspek pengendalian data dalam peranti rangkaian berdasarkan kecerdasan buatan dari rangkaian melalui antara muka aplikasi. Konsep SDN sesuai dilaksanakan oleh pelbagai industri, penyedia perkhidmatan awan dan akademik (Bakshi 2013).

Pada tahun 2016, trafik penstriman video telah melangkaui 73% daripada keseluruhan trafik internet dunia (Cisco 2017). Dianggarkan pada akhir tahun 2021, ia akan meningkat kepada 82% daripada jumlah keseluruhan trafik internet seluruh dunia. Menjadi satu cabaran besar dalam menawarkan pengalaman penstriman yang lebih baik dalam keadaan rangkaian yang berbeza-beza. Bagi memastikan prestasi yang lebih baik dari segi kualiti perkhidmatan dan kualiti kelancaran serta pengalaman penstriman video, adalah penting untuk mengurangkan masa pendam, masa tunda, kadar kehilangan paket disamping memastikan nisbah penghantaran paket berada pada tahap tertinggi. Protokol DASH digunakan untuk menukar kadar bit video mengikut keupayaan rangkaian pengguna agar dapat memberikan kelancaran pengalaman penstriman video yang lebih baik. Persekitaran SDN diwujudkan dengan tujuan untuk meningkatkan prestasi rangkaian disamping memudahkan pengurusan rangkaian kompleks pada masa ini. Pengawal SDN bersama-sama dengan aplikasi SDN yang telah dipasang boleh mengawal semua suis secara berpusat dalam rangkaian. Dengan kawalan berpusat, pengawal SDN akan dapat menguruskan rangkaian dan bertindak balas dengan sebarang peristiwa dengan cekap dan cepat. Maklumat berkaitan prestasi kualiti perkhidmatan protokol DASH untuk penstriman video dalam persekitaran SDN juga masih belum mencukupi.

2. KAJIAN TERDAHULU

Mekanisme kualiti perkhidmatan (QoS) memainkan peranan penting dalam rangkaian komputer sejak kemunculan aplikasi penstriman multimedia seperti Youtube, Netflix, VoD, IPTV dan sebagainya (Hassan & Jabbar 2017; T. F. Yu et al. 2015). Dengan pelaksanaan QoS, penyedia perkhidmatan dapat menawarkan permintaan perkhidmatan yang lebih baik kepada pengguna serta dapat menjamin tahap prestasi aliran data dengan menawarkan kadar kehilangan paket yang rendah, lebar jalur yang tinggi untuk perkhidmatan multimedia masa nyata serta masa pendam dan ketar yang rendah untuk VoIP, persidangan video dan permainan dalam talian (T. F. Yu et al. 2015). Mekanisma pelaksanaan QoS masih baru dalam persekitaran SDN dan tidak banyak pengawal dalam SDN yang menyokong ciri-ciri QoS (D'souza et al. 2016; Egilmez & Dane 2012). Kekurangan ini menyebabkan aplikasi dibangunkan tanpa ciri standard yang diperlukan untuk melaksanakan fungsi QoS sebenar (D'souza et al. 2016). Rangkaian yang dikendalikan oleh perisian mungkin menghadapi masa pendam yang tinggi bergantung kepada jarak pengawal dari peranti fizikal (Oktian et al. 2017). Rangkaian berskala kecil boleh memastikan QoS yang lebih baik tetapi situasi ini tidak akan berlaku dalam rangkaian berskala besar dan kompleks. Oleh itu, penyelidik telah mula mengkaji protokol SDN dan OpenFlow yang memberikan pandangan keseluruhan rangkaian secara berpusat dan boleh membuat keputusan bagi keseluruhan rangkaian. Ciri-ciri ini menjadikan SDN sebagai salah satu mekanisme yang lebih baik untuk menyediakan QoS untuk aplikasi dengan lebih mudah dan lebih fleksibel berbanding rangkaian tradisional (Karakus & Durrezi 2017).

Perlaksanaan protokol DASH melalui rangkaian SDN memberikan kelebihan kepada kedua-dua teknologi tersebut (Cetinkaya, Karayer, et al. 2015). Dengan SDN, data penstriman video dengan kadar bit berbeza dapat dihantar melalui laluan alternatif bergantung kepada kesesakan pada laluan yang disediakan (Egilmez & Dane 2012; Joseph 2015). Ia dapat meningkatkan prestasi kualiti perkhidmatan pada penstriman video (Bentaleb et al. 2016; Zhao et al. 2017) dan dengan pelaksanaan model SVC pada ABR akan sekaligus dapat mengurangkan penggunaan ruang pelayan untuk simpanan fail video serta meningkatkan kecekapan pengagregatan (Joseph 2015).

Kajian tentang penghantaran kandungan penstriman video berasaskan DASH melalui persekitaran SDN telah dilakukan oleh (Zabrovskiy et al. 2016) dengan tujuan untuk mengkaji penghantaran video penstriman dalam keadaan lebar jalur yang berbeza. Kajian tersebut membuat perbandingan antara dua pelagak rangkaian yang berbeza iaitu Mininet dan Linktropy 5500 (Apposite Technologies n.d.). Analisa menunjukkan bahawa kedua-dua pelagak tersebut menghasilkan keputusan yang sama dengan mengambil kira kadar bit yang akan dipilih oleh pemain media dan menunjukkan pelagak Mininet boleh digunakan bagi mendapatkan keputusan setaraf perkakasan sebenar (Zabrovskiy et al. 2016).

Terdapat juga kajian tentang pengawalan trafik penstriman DASH dalam persekitaran SDN (Quinlan et al. 2015) dimana jumlah penghantaran saiz data video DASH dikawal pada satu-satu masa dalam rangkaian yang sesak. Kajian tersebut mendapati pengawalan trafik dapat menjamin prestasi rangkaian sentiasa dalam keadaan terbaik.

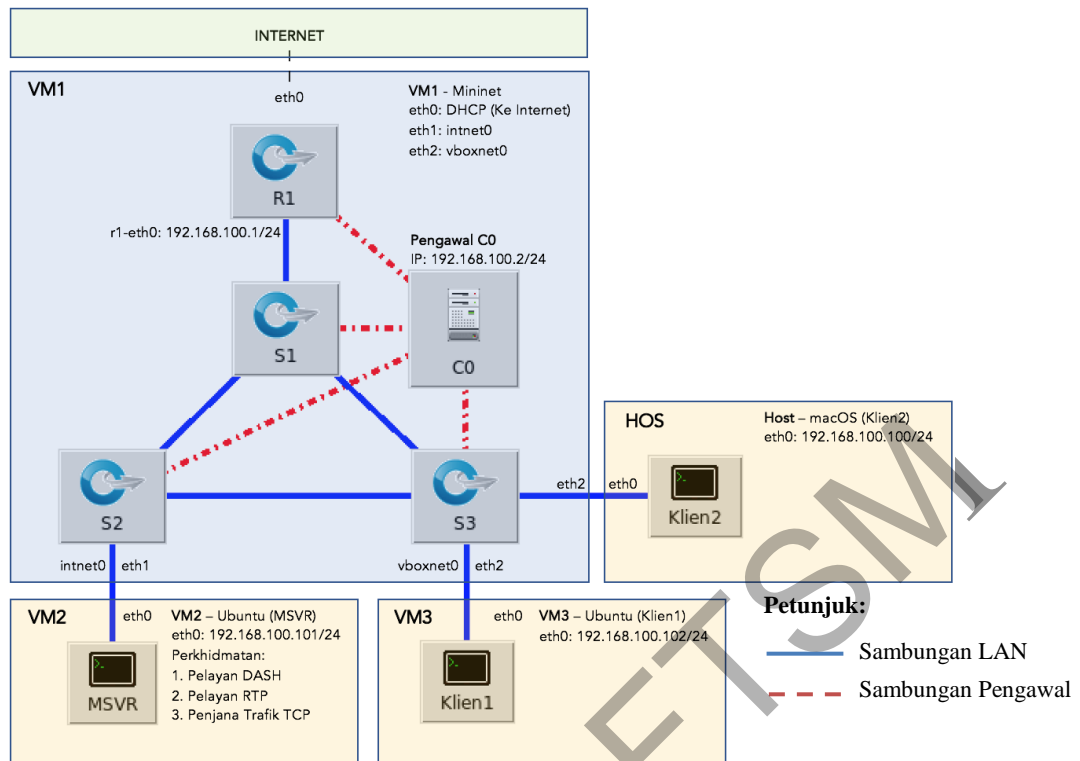
Kajian ini akan memfokuskan kepada perbandingan analisa QoS protokol penstriman video DASH dan protokol penstriman video sedia ada dalam persekitaran SDN menggunakan perisian Mininet.

3. PELAKSANAAN PENSTRIMAN VIDEO DALAM PERSEKITARAN SDN

Kajian analisa ini meliputi dua skop iaitu perkakasan dan perisian. Simulasi akan dilaksanakan menggunakan sebuah komputer dengan spesifikasi pemproses Intel Core i7, 16GB RAM, 512GB SSD dan MacOS High Sierra sebagai sistem operasi utama. Perisian mesin maya Oracle Virtualbox akan digunakan untuk membangunkan beberapa mesin maya bagi tujuan simulasi. Setiap mesin maya akan dipasang dengan sistem operasi Ubuntu Linux. Perisian Mininet juga akan dipasang dalam mesin maya dan bahasa pengaturcaraan Python akan digunakan untuk membangunkan persekitaran SDN mengikut spesifikasi yang telah ditetapkan. Perkakas Iperf3 akan digunakan untuk menjana trafik dan perisian Wireshark akan digunakan untuk menangkap paket yang dihantar. Metrik analisa pula meliputi daya pemprosesan, masa pendam, ketar, purata masa tunda hujung ke hujung dan nisbah penghantaran data.

3.1. Topologi Rangkaian

Topologi rangkaian dan penetapan parameter rangkaian untuk membuat analisa kualiti perkhidmatan penstriman video dalam persekitaran SDN telah dilakukan seperti Rajah 1 dibawah.



Rajah 1 Topologi persekitaran SDN

Suis S2 akan bersambung dengan pelayan MSVR dalam mesin maya VM2 manakala suis S3 akan bersambung dengan komputer pengguna Klien1 dan Klien2. Penyambungan antara setiap mesin maya adalah menggunakan suis maya yang dibina dalam perisian Virtualbox. Setiap mesin maya akan berkomunikasi antara satu sama lain mengikut alamat IP yang telah ditetapkan.

3.2. Senario Analisa

Dua jenis trafik penstriman video digunakan bagi tujuan analisa dalam simulasi ini iaitu trafik penstriman DASH dan RTP. Manakala trafik latarbelakang TCP pula dijana oleh perkakas penjana trafik Iperf3 dalam komputer Klien2 untuk memberikan beban yang tinggi kepada topologi persekitaran SDN. Oleh kerana topologi persekitaran SDN dibina dengan kemampuan untuk menampung trafik sehingga 100Mbps, maka kapasiti beban yang dijana oleh perkakas penjana trafik Iperf3 juga adalah sehingga 100Mbps. Durasi masa simulasi adalah sehingga 200 saat terawal setelah penstriman video dijalankan. Penstriman video akan dimainkan oleh komputer Klien1 (Rujuk Rajah 3.5) dengan kadar bit video sehingga 5.0Mbit/s. Setelah 100 saat simulasi berjalan, trafik latarbelakang TCP akan dijana oleh komputer Klien2 dengan beban sehingga 100Mbps. Dalam senario ini, topologi rangkaian akan berjalan tanpa sebarang tetapan QoS pada setiap trafik penstriman video dan trafik latarbelakang TCP. Kedua-dua trafik tersebut akan bersaing menggunakan setiap sumber rangkaian yang ada. Simulasi ini dijalankan sebanyak 3 kali bagi mendapatkan keputusan yang konsisten. Perbandingan QoS antara trafik penstriman DASH dan RTP digunakan untuk mengesahkan keputusan analisa.

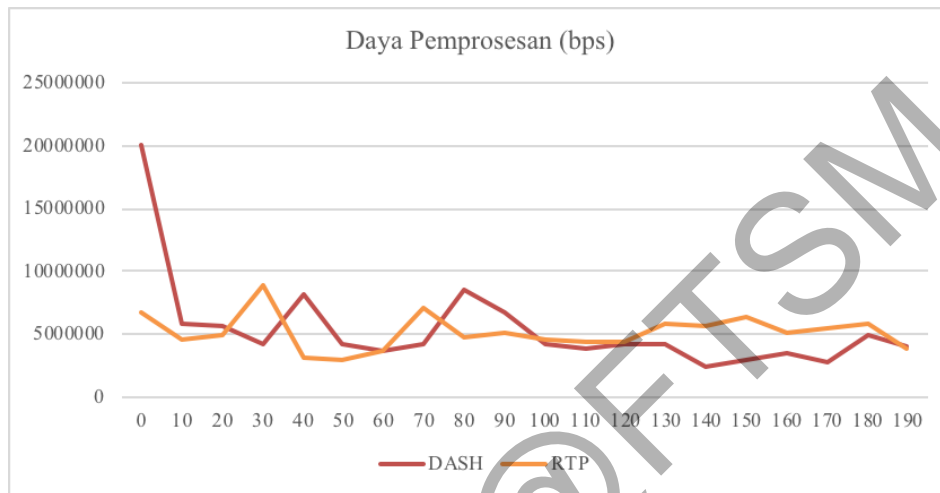
4. KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Metrik yang paling penting untuk mengukur dan menganalisa prestasi rangkaian ialah daya pemrosesan, masa pendam, purata masa tunda hujung ke hujung dan nisbah penghantaran paket. Kajian ini akan menganalisa dan membuat perbandingan antara prestasi kualiti

perkhidmatan penstriman video DASH dan RTP dalam persekitaran SDN menggunakan perisian Mininet.

4.1. Daya Pemprosesan (Throughput)

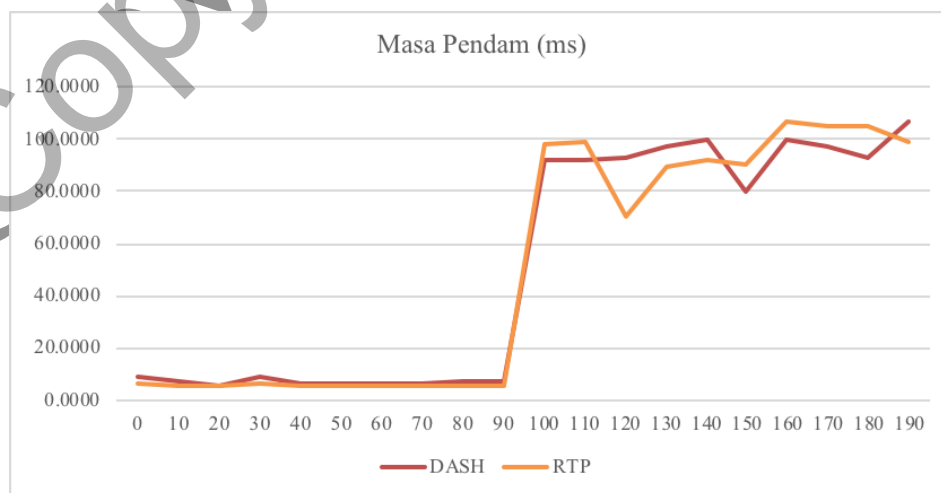
Berdasarkan Rajah 2, keputusan analisa menunjukkan kedua-dua trafik penstriman DASH dan RTP mempunyai daya pemprosesan yang hampir sama dengan nilai purata antara 3Mbps dan 9Mbps dan menurun kepada nilai purata 2Mbps dan 6Mbps setelah trafik TCP dijana pada masa simulasi 100 saat.



Rajah 2 Analisa daya pemprosesan bagi keseluruhan trafik RTP dan TCP

4.2. Masa Pendam (Latency)

Berdasarkan Rajah 3, keputusan analisa menunjukkan kedua-dua trafik penstriman DASH dan RTP mempunyai masa pendam yang hampir sama dengan nilai purata antara 5ms dan 9ms pada permulaan masa simulasi dan naik kepada nilai purata 70ms dan 106ms setelah trafik TCP dijana pada masa simulasi 100 saat. Nilai purata masa pendam antara trafik penstriman DASH dan RTP setelah trafik TCP dijana masing-masing ialah 95.24ms dan 95.05ms dengan perbezaan sebanyak 0.19ms.

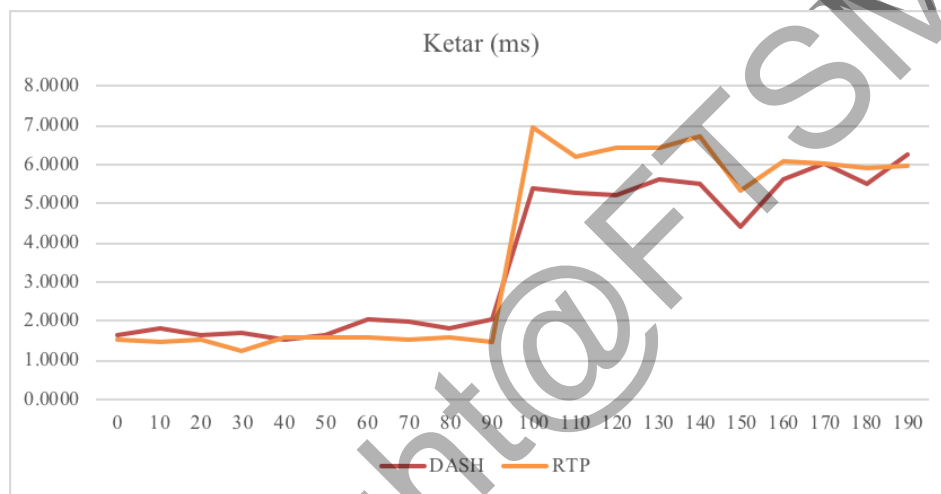


Rajah 3 Analisa masa pendam bagi trafik DASH dan RTP

4.3. Ketar (Jitter)

Berdasarkan Rajah 4, keputusan analisa pada permulaan masa simulasi menunjukkan kedua-dua trafik penstriman DASH dan RTP mempunyai ketar yang hampir sama dengan nilai purata antara 0.57ms dan 7.48ms. Setelah trafik latarbelakang TCP dijana pada masa simulasi 100 saat, ketar naik kepada nilai purata antara 4.39ms dan 31.47ms.

Analisa menunjukkan setelah trafik latarbelakang TCP dijana pada masa simulasi 100 saat, trafik penstriman DASH mempunyai nilai purata ketar yang lebih rendah berbanding trafik penstriman RTP. Faktor protokol DASH yang menyokong penyesuaian kadar bit video mengikut keadaan semasa rangkaian sedikit sebanyak menyumbang kepada nilai ketar yang rendah. Dengan penyesuaian kadar bit video dalam keadaan rangkaian yang sesak, saiz segmen video yang dihantar akan menjadi lebih kecil serta beban trafik akan semakin berkurangan. Saiz paket yang kecil dapat mengurangkan masa paket tersebut sampai ke destinasi. Ini sekaligus menyumbang kepada nilai ketar yang rendah dan kelancaran prestasi penstriman video.

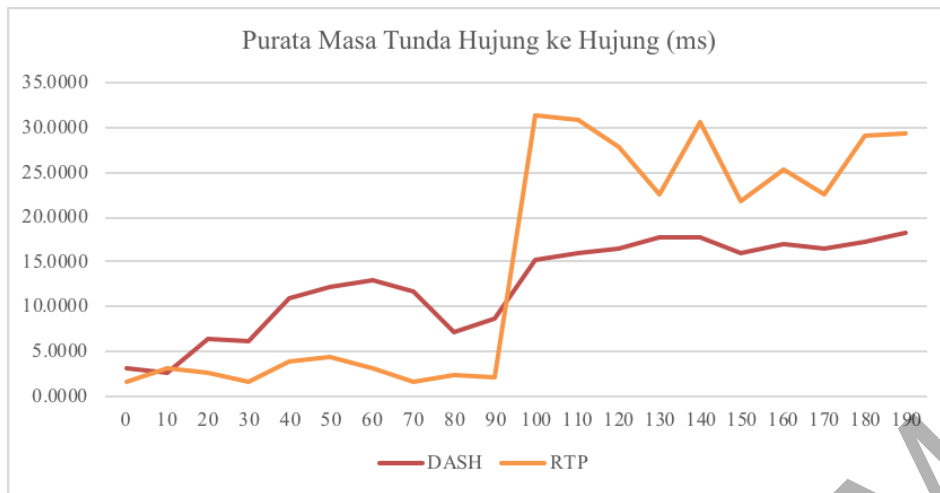


Rajah 4 Analisa ketar bagi trafik DASH dan RTP

4.4. Purata Masa Tunda Hujung Ke Hujung (Avg. End to End Delay)

Berdasarkan Rajah 5, keputusan analisa menunjukkan trafik penstriman DASH mempunyai purata masa tunda hujung ke hujung yang lebih tinggi berbanding trafik penstriman RTP pada permulaan masa simulasi. Hal ini terjadi kerana pemain media DASH akan sentiasa menguji prestasi rangkaian semasa dan memuat turun segmen video dengan kadar bit yang bersesuaian. Bagi memainkan video DASH, minimum 3 segmen video perlu dimuat turun kepada pengguna pada satu-satu masa.

Purata masa tunda hujung ke hujung bagi trafik penstriman DASH terus meningkat sehingga 18.33ms setelah trafik latarbelakang TCP dijana pada masa simulasi 100 saat. Berbeza dengan trafik penstriman RTP yang mempunyai purata masa tunda hujung ke hujung yang rendah, tetapi meningkat secara mendadak setelah trafik latarbelakang TCP dijana. Analisa menunjukkan trafik penstriman DASH setelah trafik latarbelakang TCP dijana pada masa simulasi 100 saat mempunyai nilai purata masa tunda hujung ke hujung yang lebih rendah berbanding trafik penstriman RTP. Protokol DASH yang boleh menyesuaikan kadar bit video mengikut keadaan semasa rangkaian secara langsung dapat mengurangkan beban trafik dan sekaligus dapat menawarkan nilai purata masa tunda hujung ke hujung yang rendah berbanding RTP.



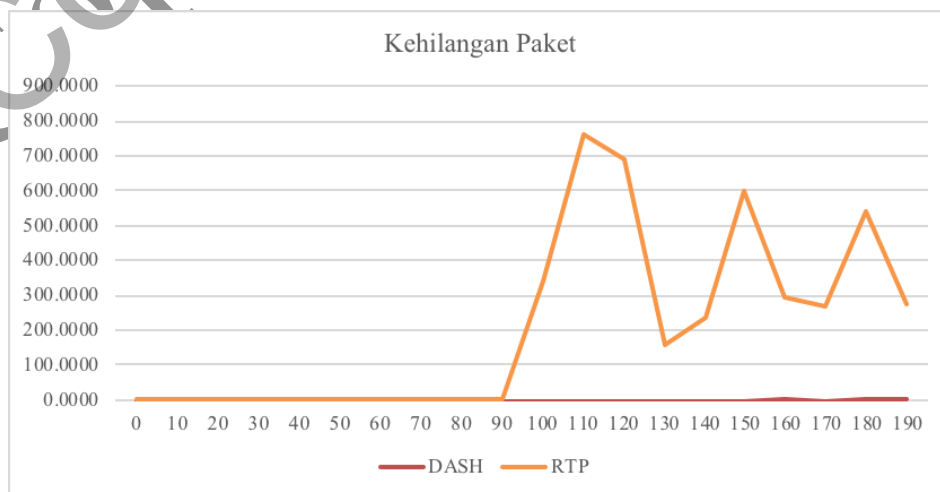
Rajah 5 Analisa purata masa tunda hujung ke hujung bagi trafik DASH dan RTP

4.5. Nisbah Penghantaran Paket (Packet Delivery Ratio)

Berdasarkan Rajah 6, keputusan analisa menunjukkan trafik penstriman DASH mempunyai nisbah penghantaran paket yang lebih tinggi berbanding trafik penstriman RTP setelah trafik latarbelakang TCP dijana pada masa simulasi 100 saat. Terdapat perbezaan yang ketara antara jumlah paket yang dihantar oleh trafik penstriman DASH berbanding RTP dengan trafik penstriman DASH telah menghantar sebanyak 23139 paket manakala RTP telah menghantar sebanyak 95454 paket. Perbezaan ini adalah disebabkan protokol DASH yang menghantar video dalam segmen bersaiz kecil dan kadar bit serta saiz video akan berkurangan bergantung kepada keadaan semasa rangkaian manakala RTP pula akan berterusan menghantar satu fail video dengan kadar bit tetap 5Mbit/s sehingga selesai simulasi.

Dengan penyesuaian kadar bit video oleh protokol DASH, saiz paket yang dihantar berkurangan sesuai dengan keadaan semasa rangkaian. Masa yang diambil untuk setiap paket sampai ke destinasi juga akan berkurangan. Ini sekaligus akan mengekalkan prestasi penghantaran trafik DASH disamping menjamin kelancaran penstriman video yang dimainkan.

Analisa juga menunjukkan kadar purata masa tunda hujung ke hujung yang tinggi menyumbang kepada kadar kehilangan paket yang banyak. Dengan kadar purata masa tunda hujung ke hujung yang tinggi, rangkaian tidak dapat mengendalikan paket yang banyak sekaligus menyebabkan kehilangan paket yang banyak.



Rajah 6 Analisa kehilangan paket bagi trafik DASH dan RTP

5. KESIMPULAN

Kajian ini memfokuskan kepada mempelajari kaedah protokol DASH dalam mempengaruhi prestasi dan kualiti perkhidmatan untuk penstriman video dalam persekitaran SDN. DASH merupakan piawai MPEG yang dibangunkan bagi membolehkan penyesuaian kadar bit video dilakukan di pihak pengguna dengan menentukan format dan penebatan fail video di dalam pelayan. Fail video terkod dengan kadar bit yang berbeza dan dibahagikan kepada segmen bersaiz kecil dan segmen video yang bersesuaian akan dihantar mengikut keadaan rangkaian pada masa tersebut. Pelaksanaan protokol DASH melalui persekitaran SDN memberikan kelebihan kepada kedua-dua teknologi tersebut dimana data penstriman video dengan kadar bit berbeza dapat dihantar melalui laluan alternatif bergantung kepada kesesakan pada laluan yang disediakan dan seterusnya dapat meningkatkan prestasi penstriman video.

Selain itu, kajian ini juga memfokuskan kepada perbandingan analisa prestasi kualiti perkhidmatan protokol DASH dan RTP untuk penstriman video dalam persekitaran SDN. Simulasi dilaksanakan menggunakan mesin maya dengan Ubuntu 14.04 LTS sebagai sistem operasi dan telah sedia dipasang perisian Mininet. Terdapat dua simulasi yang akan dijalankan. Simulasi pertama menggunakan protokol DASH untuk penstriman video dalam persekitaran SDN mengikut spesifikasi yang telah ditetapkan dengan masa simulasi 200 saat. Pada masa simulasi 100 saat, trafik latarbelakang TCP dijana dengan beban yang sangat tinggi sehingga 100Mbps oleh perkakas penjana trafik Iperf3 sehingga tamat simulasi. Perisian Wireshark digunakan untuk menangkap paket penstriman video pada pelayan dan pengguna. Simulasi kedua pula menggunakan protokol RTP untuk penstriman video dalam persekitaran SDN mengikut spesifikasi yang telah ditetapkan dan langkah sama seperti simulasi pertama dilaksanakan. Metrik yang digunakan untuk mengukur dan menganalisa prestasi rangkaian ialah daya pemprosesan, masa pendam, purata masa tunda hujung ke hujung dan nisbah penghantaran paket.

Keputusan analisa menunjukkan daya pemprosesan dan masa pendam bagi kedua-dua trafik tidak menunjukkan perbezaan yang ketara. Analisa juga menunjukkan protokol DASH mempunyai kadar ketar, purata masa tunda hujung ke hujung dan kadar kehilangan paket yang rendah berbanding protokol RTP setelah trafik latarbelakang TCP dijana. Analisa juga dapat mengenalpasti bahawa kadar ketar dan purata masa tunda hujung ke hujung berkadar terus dengan kadar kehilangan paket dimana kadar ketar dan purata masa tunda hujung ke hujung yang tinggi menyumbang kepada kadar kehilangan paket yang tinggi.

Analisa mendapati prestasi kualiti perkhidmatan protokol DASH untuk penstriman video dalam persekitaran SDN adalah lebih baik berbanding RTP. Protokol DASH mempunyai kadar lebar jalur, ketar, purata masa tunda hujung ke hujung yang rendah serta mempunyai masa pendam yang stabil. Fungsi protokol DASH yang boleh menyesuaikan kadar bit video mengikut keadaan rangkaian menyumbang kepada prestasi penstriman yang baik. Analisa juga mendapati RTP mempunyai kadar daya pemprosesan yang hampir sama berbanding protokol DASH. Faktor RTP yang menggunakan UDP sebagai protokol pengangkutan antara penyebab utama RTP mempunyai kadar daya pemprosesan tinggi.

Cadangan kerja masa hadapan ialah dengan melaksanakan analisa prestasi kualiti perkhidmatan protokol penstriman video pada persekitaran SDN yang lebih kompleks dan melibatkan peranti tanpa wayar kerana pada masa kini, kebanyakan pengguna selesa menggunakan peranti mudah alih untuk penstriman video. Selain itu, kajian boleh dikembangkan kepada pelbagai kadar bit video sehingga resolusi video 8K dalam pelbagai topologi rangkaian.

RUJUKAN

- Agarwal, S., Kodialam, M. & Lakshman, T. V. 2013. Traffic engineering in software defined networks. *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*, hlm. 2211–2219. IEEE. doi:10.1109/INFOCOM.2013.6567024
- Apposite Technologies. (n.d.). Linktropy 5500 Hardware Guide. Retrieved from www.apposite-tech.com/assets/pdfs/linktropy-5500-hwguide.pdf
- Bakshi, K. 2013. Considerations for Software Defined Networking (SDN): Approaches and use cases. *IEEE Aerospace Conference Proceedings* 1–9. doi:10.1109/AERO.2013.6496914
- Bentaleb, A., Begen, A. C. & Zimmermann, R. 2016. SDNDASH: Improving QoE of HTTP Adaptive Streaming Using Software Defined Networking. *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference* 1296–1305. doi:10.1145/2964284.2964332
- Cetinkaya, C., Karayer, E., Sayit, M. & Hellge, C. 2015. SDN for segment based flow routing of DASH. *IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin, ICCE-Berlin 2015*–Febru(February): 74–77. doi:10.1109/ICCE-Berlin.2014.7034284
- Cisco. 2017. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. *Forecast and Methodology* 22. doi:1465272001663118
- D'souza, D., Sundharan, K. P., Lokanath, S. & Mittal, V. 2016. Improving QoS in a Software-Defined Network 1–9.
- Egilmez, H. E. & Dane, S. T. 2012. OpenQoS: An OpenFlow controller design for multimedia delivery with end-to-end Quality of Service over Software-Defined Networks. *Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)* 1–8. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6411795
- Feamster, N., Rexford, J. & Zegura, E. 2014. The road to SDN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 44(2): 87–98. doi:10.1145/2602204.2602219
- Hassan, R. & Jabbar, R. 2017. End-to-end (e2e) Quality of Service (QoS) for IPv6 video streaming. *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* 1–4. doi:10.23919/ICACT.2017.7890045
- Hu, F., Hao, Q. & Bao, K. 2014. A Survey on Software Defined Networking (SDN) and OpenFlow: From Concept to Implementation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16(c): 1–1. doi:10.1109/COMST.2014.2326417
- Joseph, C. 2015. Optimizing Video Delivery using OpenFlow.
- Karakus, M. & Durrezi, A. 2017. A survey: Control plane scalability issues and approaches in Software-Defined Networking (SDN). *Computer Networks*. doi:10.1016/j.comnet.2016.11.017
- Kim, H. & Feamster, N. 2013. Improving network management with software defined networking. *IEEE Communications Magazine* 51(2): 114–119. doi:10.1109/MCOM.2013.6461195
- Oktian, Y. E., Lee, S. G., Lee, H. J. & Lam, J. H. 2017. Distributed SDN controller system: A survey on design choice. *Computer Networks* 121: 100–111. doi:10.1016/j.comnet.2017.04.038
- Yu, T. F., Wang, K. & Hsu, Y. H. 2015. Adaptive routing for video streaming with QoS support over SDN networks. *International Conference on Information Networking* 2015–Janua: 318–323. doi:10.1109/ICOIN.2015.7057904
- Zabrovskiy, A., Kuzmin, E., Petrov, E. & Fomichev, M. 2016. Emulation of dynamic adaptive streaming over HTTP with Mininet. *Conference of Open Innovation Association, FRUCT 2016*–Septe: 391–396. doi:10.1109/FRUCT-ISPIT.2016.7561555
- Zhao, S., Li, Z., Medhi, D., Lai, P. & Liu, S. 2017. Study of user QoE improvement for dynamic adaptive streaming over HTTP (MPEG-DASH). *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2017* 566–570. doi:10.1109/ICCNC.2017.7876191