

ສຶກສາປະສິດທິພາບການນຳໃຊ້ງານລະຫວ່າງ ZeroTier Tunnel ແລະ Cloudflare WARP

ພູທອງ ສີສະຫວັດ*, ແສງລັດສະໝີ ຈັນທະມີນາວົງ, ພອນປະດິດ ພູມມະວົງ
ພາກວິຊາ ຄອມພິວເຕີ ແລະ ເຕັກໂນໂລຊີຂໍ້ມູນຂ່າວສານ, ຄະນະວິສະວະກຳສາດ, ມະຫາວິທະຍາໄລແຫ່ງຊາດ

ບົດຄັດຫຍໍ້

ການເຮັດວຽກໄລຍະໄກ (Remote Work) ແລະ Cloud computing ຜ່ານລະບົບ VPN ແບບດັ່ງເດີມ ມີຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ສ່ຽງກັບໄພ ຂົ່ມຂູ່ດ້ານຄວາມປອດໄພທາງອິນເຕີເນັດແບບໃໝ່ໆ. ສະນັ້ນ, ລະບົບ Zero Trust Architecture (ZTA) ຈຶ່ງຖືກພັດທະນາຂຶ້ນມາແທນທີ່. ພາຍໃຕ້ການນຳໃຊ້ສະຖາປັດຕິຍະກຳແບບໃໝ່ມາພັດທະນາກໍ່ເກີດມີຜະລິດຕະພັນໃໝ່ຫຼາຍອັນເຊັ່ນ: ZeroTier (ZT) tunnel, Cloudflare WARP ແລະ ອື່ນໆ ເຊິ່ງແຕ່ລະຜະລິດຕະພັນກໍ່ມີວິທີການ ແລະ ຂະບວນການໃນການຈັດການແຕກຕ່າງກັນເຊິ່ງເຮັດໃຫ້ມີຜົນຕໍ່ກັບ ປະສິດທິພາບການທຳງານຂອງລະບົບແຕກຕ່າງກັນ. ດັ່ງນັ້ນ, ບົດຄັດຫຍໍ້ນີ້ຈຶ່ງໄດ້ສຶກສາການທຳງານລະຫວ່າງ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ໂດຍໄດ້ສຶກສາປຽບທຽບປະສິດຕະພາບດ້ານ Round-Trip Time (RTT), ອັດຕາຄ່າຄວາມໄວ (Data Transmission Rate: DTR) ເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນ ແລະ ການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU&RAM. ໃນການທົດລອງໄດ້ທຳການ ຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນດ້ວຍ FTP protocol, ແຍກເປັນສອງກໍລະນີ ZeroTier (ZT) tunnel ແລະ Cloudflare (CF) WARP ແລະ ໃຊ້ໂປຼແກຼມ Apache JMeter ເປັນເຄື່ອງມືບັນທຶກຂໍ້ມູນຂອງການທົດລອງ. ຜົນຂອງການທົດລອງໄດ້ຮັບສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ: ZT Tunnel ມີການຕອບສະ ໜອງເວລາ RTT ແລະ ອັດຕາການສົ່ງ (DRT) ເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນດີກວ່າ CF WARP. ໃນຂະນະທີ່ CF WARP ນຳໃຊ້ ຊັບພະຍາກອນຕໍ່າກວ່າ ZT Tunnel ໃນເວລາ upload ແຕ່ສູງກວ່າເວລາ download ແຕ່ທັງສອງແມ່ນຍັງມີການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນຕໍ່າ. ເຖິງ ຢ່າງໃດກໍ່ຕາມ ປັດໃຈພາຍນອກເປັນຕົ້ນເງື່ອນໄຂສະພາບແວດລ້ອມຂອງເຄືອຂ່າຍ ແລະ ສະພາບແວດລ້ອມຂອງການທົດລອງອາດສົ່ງຜົນທີ່ ແຕກຕ່າງກັນ. ດັ່ງນັ້ນ, ຈຶ່ງແນະນຳໃຫ້ມີການທົດລອງເພີ່ມເຕີມໃນສະພາບແວດລ້ອມຕ່າງໆກັນ.

ຄຳສັບສຳຄັນ: ZeroTier, Cloudflare, ການສົ່ງຂໍ້ມູນ, ປະສິດທິພາບ, ການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ.

*ຕິດຕໍ່ພົວພັນ: ທ. ພູທອງ ສີສະຫວັດ, ໂທ: 020 99766666; ອີເມວ: phouthong.sv@gmail.com

A Study on the Performance of ZeroTier Tunnel and CloudFlare WARP

Phouthong Sisavath, Senglathamy Chanthamenavong, Phonepadith Phoummavong

Department of Computer Engineering and Information technology, Faculty of Engineering, National University of Laos

Abstract

Remote work and cloud computing through traditional VPN systems face limitations and are increasingly exposed to emerging cybersecurity threats. To address these challenges, the Zero Trust Architecture (ZTA) has been developed as an alternative. Based on this new architectural model, several products have been introduced, such as ZeroTier (ZT) Tunnel and Cloudflare (CF) WARP. Each solution applies different mechanisms in managing network traffic and data, which may impact system performance differently. This study aims to compare the performance of ZeroTier Tunnel and Cloudflare WARP in terms of round-trip time (RTT), data transmission rate (DTR) during upload/download data, and CPU and RAM resource utilization. The experiment simulated client-to-server communication using the FTP protocol under two scenarios (ZT Tunnel and CF WARP) and employed Apache JMeter as the data recording tool. The experimental results show that ZT Tunnel outperforms CF WARP in RTT and data transmission rate (DRT) better than CFWARP, while CF WARP use less resources than ZT tunnel during upload but more during download compared to ZT Tunnel, both still have efficient CPU and RAM utilization. However, external factors such as network conditions and testing environments may influence the outcomes. Therefore, further experiments under diverse environments are recommended to validate the findings.

Key words: ZeroTier, Cloudflare, Data Transmission, Performance, Resource Utilization.

*Correspondence: Phouthong SISAVATH; Tel: 020 99766666; Email: phouthong.sv@gmail.com

1. ພາກສະເໜີ

1.1 ຄວາມເປັນມາ ແລະ ຄວາມສໍາຄັນຂອງບັນຫາ

ປະຈຸບັນນີ້ໂລກເຮົາກໍາລັງຢູ່ໃນໄລຍະຂອງການພັດທະນາຍຸກຂອງການປະຕິວັດອຸດສາຫະກຳຄັ້ງທີ 4 ຫຼື ເຮົາເອີ້ນວ່າ ຍຸກອຸສາຫະກຳ 4.0 ການປ່ຽນແປງທີ່ສໍາຄັນໃນຍຸກນີ້ໜຶ່ງໃນນັ້ນກໍຄືການຫັນເປັນດິຈິຕອນ ແລະ ການນໍາໃຊ້ລະບົບອອນລາຍທີ່ເພີ່ມຂຶ້ນ ເຊິ່ງໄດ້ສົ່ງຜົນກະທົບຢ່າງກວ້າງຂວາງຕໍ່ການບໍລິຫານຈັດການ, ການດໍາເນີນທຸລະກິດ ແລະ ການໃຊ້ຊີວິດໃນສັງຄົມ, ຮຽກຮ້ອງໃຫ້ທຸກພາກສ່ວນຕ້ອງປັບຕົວ. (MTC, 2021) ລັດຖະບານສປປ. ລາວ ກໍາລັງເຫັນເຖິງຄວາມຈໍາເປັນພາວະວິໄສຂອງການປ່ຽນແປງດັ່ງກ່າວຈຶ່ງໄດ້ກໍານົດ ແຜນຍຸດທະສາດການພັດທະນາເສດຖະກິດດິຈິຕອນຮອດປີ 2040 ໂດຍເນັ້ນໜັກໃສ່ 3 ເສົາຄໍ້າຄື: ລັດຖະບານດິຈິຕອນ, ເສດຖະກິດດິຈິຕອນ ແລະ ສັງຄົມດິຈິຕອນ ເພື່ອຂັບເຄື່ອນປະເທດໄປສູ່ຍຸກດິຈິຕອນ. ການປ່ຽນແປງນີ້ໄດ້ເຮັດໃຫ້ກິດຈະກຳທາງອອນລາຍເພີ່ມຂຶ້ນ, ການເຮັດວຽກທາງໄກ ແລະ ການນໍາໃຊ້ການບໍລິການຄລາວ ກໍ່ຂະຫຍາຍຕົວ ເຮັດໃຫ້ VPN ເຂົ້າມາມີບົດບາດທີ່ສໍາຄັນ ແລະ ຈໍາເປັນ. (VPN Market Size Worldwide 2032, n.d.) ໃນຂະນະທີ່ VPN ແບບດັ້ງເດີມໄດ້ຖືກນໍາໃຊ້ຢ່າງກວ້າງຂວາງ ແລະ ເພີ່ມຂຶ້ນຢ່າງຫຼວງຫຼາຍ ພ້ອມກັບການປະເຊີນຫນ້າກັບໄພຂົ່ມຂູ່ທາງອິນເຕີເນັດ ທີ່ພັດທະນາ ແລະ ຄວາມຕ້ອງການຂອງສະພາບແວດລ້ອມໃນການເຮັດວຽກທີ່ທັນສະໄໝ. ຢ່າງໃດກໍຕາມ, ລະບົບ VPN ແບບດັ້ງເດີມກໍາລັງຕໍ່ສູ້ກັບໄພຂົ່ມຂູ່ທາງອິນເຕີເນັດໂດຍສະເພາະໃນສະພາບການເຮັດວຽກທາງໄກ ແລະ ຄອມພິວເຕີ້ງ.

Adahman et al. (2022) ແລະ Ahmadi (2024) ໄດ້ແນະນຳວ່າ ເພື່ອແກ້ໄຂສິ່ງທ້າທາຍເຫຼົ່ານີ້, Zero Trust Architecture (ZTA) ໄດ້ກາຍເປັນວິທີການທີ່ປອດໄພກວ່າ. ZTA ປ່ຽນຂະບວນວິວັດຄວາມປອດໄພຈາກ "ໄວ້ວາງໃຈແຕ່ຍືນຍັນ"ເປັນ" ບໍ່ເຄີຍເຊື່ອ, ຍືນຍັນສະເໝີ." Zero Trust Architecture (ZTA) ຈຶ່ງປັນທາງເລືອກທີ່ປອດໄພ ແລະ ມີຄວາມຍືດຫຍຸ່ນ. (Zero Trust and BeyondCorp Google Cloud, n.d.), (Young, n.d.) ບໍລິສັດເທັກໂນໂລຢີໃຫຍ່ ແລະ ທາງພາກລັດຖະບານຫຼາຍປະເທດກໍາລັງນຳໃຊ້ ZTA ເພື່ອເພີ່ມຄວາມປອດໄພ ແລະ ປັບປຸງປະສິບການຂອງຜູ້ໃຊ້. ອີງໃສ່ການພັດທະນາແນວຄວາມຄິດທົ່ວໄປແຕ່ນຳໃຊ້ວິທີການແລະເຕັກນິກທີ່ແຕກຕ່າງກັນ, ມັນມີຜົນກະທົບຕໍ່ການປະສິດທິພາບການທຳງານຂອງລະບົບໃນລັກສະນະຕ່າງໆ ເຊັ່ນ: ຄວາມໄວ, ອັດຕາການໂອນຂໍ້ມູນ, ການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນຂອງລະບົບ ແລະ ອື່ນໆ.

Adahman et al. (2022) ໄດ້ອະທິບາຍວ່າການຂະຫຍາຍຕົວຂອງການນຳໃຊ້ລະບົບອອນລາຍ, ຄລາວຄອມພິວເຕີ້ງ ແລະ ແຟລດຟອມ ພ້ອມທັງພຶດຕິກຳການເຮັດວຽກແບບໄລຍະໄກຈາກບ້ານ (Work From Home: WFH) ແລະ ການເຮັດວຽກຈາກທຸກບ່ອນ (Work From Anywhere: WFA) ໄດ້ເພີ່ມຄວາມສໍາຄັນຂອງການນຳໃຊ້ລະບົບເຄືອຂ່າຍສະເໝືອນສ່ວນຕົວ (VPN) ເພື່ອເຂົ້າເຖິງຊັບພະຍາກອນຂອງອົງກອນຢ່າງປອດໄພ. Ahmadi (2024) ໄດ້ລະບຸວ່າເຖິງຢ່າງໃດກໍຕາມ, ໄພຄຸກຄາມທາງອິນເຕີເນັດທີ່ນັບມື້ນັບຮຸນແຮງຂຶ້ນໄດ້ເຜີຍໃຫ້ເຫັນເຖິງຂໍ້ຈຳກັດຂອງລະບົບ VPN ແບບດັ້ງເດີມ, ໂດຍສະເພາະໃນສະພາບແວດລ້ອມທີ່ເຊື່ອມຕໍ່ກັບລະບົບຄລາວ ແລະ

ອຸປະກອນເຄື່ອນທີ່ (Mobility) ຫຼາຍຂຶ້ນ. (Can_ZTNA_Replace_Your_VPN_Whitepaper.Pdf, n.d., 2025) ຄວາມສ່ຽງດ້ານຄວາມປອດໄພທີ່ເກີດຈາກການນຳໃຊ້ລະຫັດຜ່ານ ແລະ ການຂາດຄວາມໄວ້ວາງໃຈໂດຍເກີດຂຶ້ນຈາກລະບົບເຄືອຂ່າຍພາຍໃນເຮັດໃຫ້ VPN ບໍ່ສາມາດຕອບສະໜອງຕໍ່ສິ່ງທ້າທາຍໃໝ່ໆ ໄດ້ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ.

ເພື່ອແກ້ໄຂບັນຫາດັ່ງກ່າວ, ແນວຄວາມຄິດ ແລະ ສະຖາປັດຕະຍະກຳ ເຊໂຮທຣສ (Zero Trust Architecture: ZTA) (Ahmadi, 2024), (What Is Zero Trust Network Access (ZTNA)?, n.d., 2025) ໄດ້ຖືກພັດທະນາຂຶ້ນມາເພື່ອສ້າງຄວາມປອດໄພໃຫ້ແກ່ການເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງຜູ້ໃຊ້, ແອັບພລິເຄຊັນ, ຂໍ້ມູນ ແລະ ບໍລິການຕ່າງໆ ໂດຍອີງໃສ່ຫຼັກການ "ບໍ່ໄວ້ວາງໃຈສິ່ງໃດເລີຍ, ຕ້ອງກວດສອບທຸກຢ່າງ".

ZeroTier (2025) ໄດ້ລະບຸວ່າ ZeroTier tunnel ແມ່ນອຸໂມງການເຊື່ອມຕໍ່ແບບເພຍທຸເພຍ (peer-to-peer) ທີ່ປອດໄພ ແລະ ເຂົ້າລະຫັດ ສ້າງດ້ວຍຊອບແວ ZeroTier ທີ່ສ້າງເຄືອຂ່າຍສະເໝືອນ ຂຶ້ນທົ່ວໂລກ ເຮັດໜ້າທີ່ຊ່ວຍໃຫ້ອຸປະກອນທົ່ວໂລກສາມາດເຊື່ອມຕໍ່ ແລະ ສື່ສານກັນໄດ້ ສະເໝືອນຢູ່ໃນເຄືອຂ່າຍພາຍໃນດຽວກັນ ໂດຍບໍ່ຕ້ອງໃຊ້ Public IP address ຫຼືການກຳນົດຄ່າທີ່ຊັບຊ້ອນຂອງ Router, ຊອບແວນີ້ໃຊ້ Agent ສາມາດຕິດຕັ້ງເທິງອຸປະກອນຕ່າງໆໂດຍບໍ່ມີຜົນຕໍ່ການທຳງານ ຫຼື ນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນຂອງເຄື່ອງສູງ, ມີຄວາມຍືດຢຸນໃນການປັບຕົວ ແລະ ເຊື່ອຖືໄດ້ໃນການແບ່ງປັນຊັບພະຍາກອນ ແລະ ການຈັດການອຸປະກອນໄລຍະໄກຈາກສະຖານທີ່ຕ່າງໆ.

(Connect Private Networks | Cloudflare Zero Trust Docs, n.d. 2025) Cloudflare WARP ແມ່ນຊອບແວສາມາດຕິດຕັ້ງນຳໃຊ້ໄດ້ໃນລະບົບມືຖື ແລະ ເຄື່ອງຄອມພິວເຕີ ທີ່ຊ່ວຍເພີ່ມຄວາມປອດໄພ ແລະ ຄວາມໄວຂອງອິນເຕີເນັດ ດ້ວຍການເຊື່ອມຕໍ່ແບບເຂົ້າລະຫັດລະຫວ່າງອຸປະກອນຂອງຜູ້ໃຊ້ກັບເຄືອຂ່າຍ Cloudflare ໂດຍກຳນົດເສັ້ນທາງການຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນທັງໝົດຜ່ານເຄືອຂ່າຍທົ່ວໂລກຂອງ Cloudflare ເພື່ອຫຼີກລ້ຽງບັນຫາຄວາມແອອັດ ແລະ ຊ່ວຍປ້ອງກັນໄພຄຸກຄາມ. ມັນເຮັດໜ້າທີ່ເປັນ VPN ທີ່ຊ່ວຍຮັກສາຄວາມປອດໄພໃນການເຊື່ອມຕໍ່ອິນເຕີເນັດ, ເຂົ້າລະຫັດຂໍ້ມູນ ແລະ ອາດຊ່ວຍເພີ່ມປະສິດທິພາບດ້ວຍການເລືອກໃຊ້ເສັ້ນທາງເຄືອຂ່າຍທີ່ເໝາະສົມ ແລະ ໃນຂະນະດຽວກັນກໍ່ຊ່ວຍປ້ອງກັນບໍ່ໃຫ້ບຸກຄົນທີ່ສາມເຫັນການຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນຂອງຜູ້ໃຊ້.

ຜ່ານການສຶກສາບັນດາບົດຄົ້ນຄ້ວາ ໄດ້ສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າເຕັກໂນໂລຊີສະຖາປັດຕິຍາກຳ ZTA (Syed et al., 2022) ຄືທາງເລືອກຂອງການສື່ສານຂໍ້ມູນທີ່ປອດໄພ ແລະ ມີຄວາມຍືດຫຍຸ່ນ ທີ່ຈະມາແທນທີ່ເຕັກໂນໂລຊີ VPN ແບບດັ່ງເດີມ ຢ່າງແທ້ຈິງ (Pratchaya Jaisudthi, 2025). ໃນປັດຈຸບັນມີຫຼາຍ ຜະລິດຕະພັນຂອງສະຖາປັດຕິຍາກຳ ZTA ທີ່ເປັນທີ່ນິຍົມ, ເຊັ່ນ: ZeroTier tunnel, Cloudflare WARP, Palo Alto Networks, Microsoft Entra ID, Zscaler Zero Trust Exchange, Cisco Zero Trust ແລະ ອື່ນໆ... ທັງໝົດເຫຼົ່ານີ້

ລ້ວນແລ້ວແຕ່ມີຈຸດເດັ່ນຈຸດແຂງຂອງໃຜລາວ. ZeroTier Tunnel ແລະ Cloudflare WARP ແມ່ນຜະລິດຕະພັນສະຖາປັດຕິຍາ Cloud ທີ່ໄດ້ຮັບຄວາມນິຍົມ ແລະ ມີການໃຊ້ງານຢ່າງແຜ່ຫຼາຍ ເນື່ອງຈາກເປັນເຄື່ອງມືທີ່ມີປະສິດທິພາບ, ໃຊ້ງານງ່າຍ ແລະ ຄ່າໃຊ້ຈ່າຍບໍ່ສູງ (Rodriguez, 2025), (ZTNA vs VPN, n.d.). ການສຶກສາປຽບທຽບ ປະສິດທິພາບ ຂອງສອງຜະລິດຕະພັນດັ່ງກ່າວ ແມ່ນເປັນເລື່ອງສຳຄັນ ອັນຈະເປັນຂໍ້ມູນທີ່ມີປະໂຫຍດໃຫ້ແກ່ວິສະວະກອນເຄືອຂ່າຍ (Network ໃຫ້ມີປະສິດຕິຜົນສູງສຸດ).

ຈາກເຫດຜົນດັ່ງກ່າວມານັ້ນ, ບົດຄົ້ນຄວ້ານີ້ຈຶ່ງໄດ້ເຮັດການທົດລອງເພື່ອສຶກສາໃຫ້ເຫັນລາຍລະອຽດປະສິດທິພາບດ້ານຕ່າງໆ: (1) ດ້ານເວລາການຕອບສະໜອງ (RTT), (2) ອັດຕາຄວາມໄວ (Data Transmission Rate: DTR) ໃນການຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນ (upload/download), ແລະ (3) ປະສິດທິພາບຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນໜ່ວຍປະເມີນຜົນ (CPU) ແລະ ໜ່ວຍຄວາມຈຳ (RAM)

1.2. ຄຳຖາມຂອງການຄົ້ນຄ້ວາ

1. ເວລາເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງເຄື່ອງ client ແລະ FTP server ຄ່າ Round-Trip Time (RTT) ລະຫວ່າງ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ອັນໃດດີກວ່າ ກັນ?

2. ອັດຕາຄວາມໄວຂອງ Data Transmission Rate: (DTR) ໃນເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນ ລະຫວ່າງເຄື່ອງ client ກັບ FTP server ຜ່ານ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ອັນໃດດີກວ່າ?

3. ເວລາຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນລະຫວ່າງເຄື່ອງ client ກັບ FTP server ຜ່ານລະບົບ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ ໜ່ວຍປະເມີນຜົນ (CPU) ແລະ ໜ່ວຍຄວາມຈຳ (RAM) ຂອງເຄື່ອງເຊີເວີ ໂຕໃດຈະມີປະສິດທິພາບດີກວ່າກັນ?

1.3. ຈຸດປະສົງຂອງການຄົ້ນຄ້ວາ

1. ເພື່ອສຶກສາປຽບທຽບປະສິດທິພາບ Round-Trip Time (RRT) ລະຫວ່າງ ZeroTier tunnel ກັບ Cloudflare WARP ເວລາເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງເຄື່ອງ client ກັບ ftp server.

2. ເພື່ອສຶກສາປຽບທຽບປະສິດທິພາບກ່ຽວກັບອັດຕາຄ່າຄວາມໄວຂອງ Data Transmission Rate: (DTR) ໃນເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນ ຜ່ານ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP.

3. ເພື່ອສຶກສາປຽບທຽບການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນໜ່ວຍປະເມີນຜົນ (CPU) ແລະ ໜ່ວຍຄວາມຈຳ (RAM) ຂອງ server ເວລາໃຊ້ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນລະຫວ່າງ client ກັບ ftp server.

2. ບົດຄົ້ນຄວ້າທີ່ກ່ຽວຂ້ອງ

Osswald et al. (2020) ທຳການທົດສອບ VPN ໂດຍການໃຊ້ OpenVPN, IPsec ແລະ WireGuard ທີ່ນິຍົມໃຊ້ກັນທົ່ວໄປ. ວິທີການທົດລອງຈະເຊື່ອມຕໍ່ Virtual Host 2 ເຄື່ອງເຂົ້າກັນໂດຍກົງຜ່ານລັງ 10Gb/s, Virtual Host ໄດ້ຮັບການຕັ້ງຄ່າໃຫ້ຢູ່ subnet ແຕກຕ່າງກັນ. ການວັດແທກຈະວັດແທກ throughput, ping time ແລະ retransmission count ຂອງ TCP traffic ທັງໃນກໍລະນີທີ່ມີ ແລະ ບໍ່ມີການໃຊ້ CPU pinning. Virtual Host ທັງສອງເຄື່ອງຈະຕິດຕັ້ງ Ubuntu 18.04. ຕິດຕັ້ງ ແລະ ຕັ້ງຄ່າ IPsec ໂດຍໃຊ້ strongSwan, OpenVPN; ເຄື່ອງມືວັດແທກທົດລອງ: nuttcp 8.1.4 ສຳລັບວັດແທກ throughput, ping ສຳລັບວັດແທກ ping time ແລະ mpstat 11.6.1 ສຳລັບການວັດແທກການໃຊ້ CPU utilization. ຜົນຂອງການທົດລອງສາມາດສະຫຼຸບໄດ້ວ່າ: IPsec ທີ່ມີການເຂົ້າລະຫັດຕາມ AES ເປັນຕົວເລືອກທີ່ດີທີ່ສຸດໃນດ້ານປະສິດທິພາບໃນສະພາບແວດລ້ອມ Virtual ທີ່ບໍ່ມີການຕິດໜ່ວຍປະມວນຜົນ (Without CPU Pinning). ສ່ວນໃນສະພາບແວດລ້ອມແບບ Non-virtual ນັ້ນ WireGuard ມີປະສິດທິພາບເໝືອນກ່ວາ IPsec ປະມານ 30% ໂດຍທົ່ວໄປຄວນສັງເກດວ່າການເລືອກລະບົບ VPN ທີ່ເໝາະສົມນັ້ນສົມຄວນມີຫຼາຍປັດໃຈສິ່ງຜົນໃຫ້ທັງສາມລະບົບໃຊ້ງານຕົວຈິງ.

Mackey et al. (2020) ປຽບທຽບປະສິດທິພາບຂອງ WireGuard ແລະ OpenVPN ຊຶ່ງເປັນຄູ່ແຂ່ງກັນໃນມືຕິຕ່າງໆ, ໂດຍວິທີການສ້າງກອບການເຮັດວຽກ ເພື່ອ ທົດສອບແບບອັດຕະໂນມັດ ແລະ ນຳໄປໃຊ້ກັບໂນດ (Node) ທັງໝົດຈຳນວນ 8 ໂນດ ລວມເຖິງ Remote AWS instances ແລະ Local Virtual Machine, ຜົນການທົດສອບສະແດງໃຫ້ເຫັນຢ່າງຈະແຈ້ງເຖິງຂໍ້ໄດ້ປຽບຫຼັກສອງປະການທີ່ WireGuard ມີເໝືອນກ່ວາ OpenVPN ນັ້ນກໍ່ຄືປະສິດທິພາບໃນເຄື່ອງ Multi-core ແລະ ຖານໂຄດທີ່ບໍ່ໜັກເຄື່ອງ (light codebase). ວິທີການທົດສອບດຳເນີນການໃນສອງສະພາບແວດລ້ອມຄື: AWS ແລະ Local Virtual Machine, ແຕ່ລະສະພາບແວດລ້ອມປະກອບດ້ວຍ 2 ໂນດ (Node) ໂດຍໂນດທີ່ໜຶ່ງເຮັດໜ້າທີ່ເປັນເຊີວີ (listening on TCP/UDP socket) ແລະ ອີກໂນດໜຶ່ງເຮັດໜ້າທີ່ເປັນ client, ສຳລັບແຕ່ລະສະພາບແວດລ້ອມປັບໃຊ້ WireGuard ແລະ OpenVPN ໂດຍໃຊ້ Ansible playbook ການທົດລອງໃຊ້ iperf3 ເພື່ອກຳນົດຄ່າໃຫ້ທຳການທົດລອງຊ້າແບບອັດຕະໂນມັດເຊັ່ນດຽວກັນກັບ Python's psutil library. ຜົນການທົດສອບຂອງການທົດລອງສະແດງໃຫ້ເຫັນຢ່າງຈະແຈ້ງວ່າ WireGuard ມີຂໍ້ໄດ້ປຽບເໝືອນ OpenVPN ໂດຍ WireGuard ມີປະສິດທິພາບດີກ່ວາໃນເຄື່ອງ multi-core machines ຊຶ່ງສາມາດໃຊ້ປະໂຫຍດຈາກ multi-threading ໄດ້ຢ່າງເຕັມທີ່. WireGuard ເອົາຊະນະ OpenVPN ໄດ້ທຸກກໍລະນີຕາມການຕັ້ງຄ່າການຂອງການທົດລອງ, ຂໍ້ໄດ້ປຽບອີກປະການໜຶ່ງແມ່ນ ຢູ່ທີ່ codebase, WireGuard ຖືກອອກແບບມາຢ່າງລຽບງ່າຍ ແລະ ເບົາ (lean and light by design) ໂດຍຕິດຕັ້ງ code ພຽງແຕ່ປະມານ 4.000 ບັນທັດ ຊຶ່ງຈະຊ່ວຍໃຫ້ການກວດສອບ ແລະ

ການຄົ້ນຫາຊ່ອງໄວເຮັດໄດ້ງ່າຍຂຶ້ນ ນອກຈາກນີ້ຍັງຊ່ວຍໃຫ້ພື້ນຜິວການໂຈມຕີມີຂະໜາດນ້ອຍລົງເມື່ອທຽບກັບ OpenVPN ທີ່ມີ code ພຽງ 60,000 ບັນທັດ, ຕໍ່ໜ້າ WireGuard ມີໂອກາດທີ່ຈະກາຍເປັນຄູ່ແຂ່ງຕົວຈິງ ແລະ ຄອງສ່ວນແບ່ງການຕະຫຼາດໄດ້ຫຼາຍຂຶ້ນ.

Jaisudthi et al. (2025) ໄດ້ສຶກສາປະສິດທິພາບຂອງສາມ VPN ທີ່ໄດ້ຮັບຄວາມນິຍົມໃນປະຈຸບັນຄື Cloudflare, ZeroTier ແລະ WireGuard ໂດຍວັດຜົນກະທົບຕໍ່ດ້ານປະສິດທິພາບເຄືອຂ່າຍ ແລະ ການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ server ຜ່ານຕົວຊີ້ວັດຕ່າງໆ ເຊັ່ນ: ຄວາມໄວຂອງການ upload/download ຂໍ້ມູນ, ເວລາໄປ-ກັບ (RTT), ຄວາມໜ່ວງຂອງເວັບ (Web latency) ແລະ ການໃຊ້ CPU ຂອງ server ໂດຍການການຕັ້ງຄ່າ ແລະ ສ້າງສະພາບການແວດລ້ອມຂຶ້ນມາທຳການ ຄົ້ນຄວ້າ ປະກອບດ້ວຍການໃຊ້ Cloudflare VPN, ZeroTier ແລະ WireGuard ໃນເຄື່ອງ virtual ແຍກຕ່າງຫາກພາຍໃນສະພາບແວດລ້ອມ Proxmox VE ໃນ Ubuntu Server 22.04 LTS ທີ່ມີ CPU 1-core, RAM 2 GB, ແລະ 1 Gbps Network Interface. ເຄື່ອງ Client ປະກອບດ້ວຍ CPU 8-core ແລະ RAM 16 GB ໄດ້ເຊື່ອມຕໍ່ກັບເຄື່ອງແມ່ຂ່າຍ VPN ຜ່ານ LAN. WireGuard ໄດ້ຖືກທົດສອບໃນ server ທີ່ຄ້າຍຄືກັນ ແລະ ມີ Public IPs. ເຄື່ອງ Client ແລະ Server ວາງຢູ່ຫ່າງກັນປະມານ 64 ກິໂລແມັດ. ເຊື່ອມຕໍ່ Client ຈາກພາຍນອກກັບ Web Server ຜ່ານສະຖາປັບ Cloudflare VPN ທີ່ມີຢູ່ທົ່ວໂລກ ເພື່ອເປັນອຸໂມງໃນການເຊື່ອມຕໍ່. ZeroTier ນຳໃຊ້ Software Define Network (SDN) ເພື່ອສ້າງເປັນອຸໂມງໃນການເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງເຄື່ອງ Client ກັບ Server ຜ່ານສະຖາປັດຕິຍະກຳເຄືອຂ່າຍຂອງ ZeroTier Gateway. ສຳລັບ WireGuard ແມ່ນເຊື່ອມຕໍ່ຜ່ານສະຖາປັດຕິຍະກຳເຄືອຂ່າຍຂອງ WireGuard ໂດຍມີ Public IP ເປັນອຸໂມງເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງ Client ກັບ Server. ເພື່ອປະເມີນປະສິດທິພາບຂອງ Cloudflare, ZeroTier ແລະ WireGuard VPN ໄດ້ທຳການວັດແທກ: upload/download speeds, round-trip time (RTT), web latency, and server CPU utilization. ແຕ່ລະ VPN ໄດ້ຖືກທົດສອບພາຍໃຕ້ເງື່ອນໄຂເຄືອຂ່າຍດຽວກັນ, ໂດຍໃຊ້ການໂອນຟາຍ 1,000MB ແລະ ຈຳລອງການເຂົ້າຂອງຜູ້ໃຊ້ຈາກ 20 ຫາ 1,000 ເຊື່ອມຕໍ່ພ້ອມກັນ. ການທົດສອບແມ່ນເຮັດຊ້າອີກ 30 ຄັ້ງ ເພື່ອຮັບປະກັນຄວາມໜ້າເຊື່ອຖື. ຜົນໄດ້ຮັບແມ່ນ: WireGuard ສະໜອງຄວາມໄວການອັບໂຫຼດ ແລະ ດາວໂຫຼດທີ່ໄວທີ່ສຸດ (19 second ແລະ 52 second ຕາມລຳດັບ ສຳລັບຟາຍຂໍ້ມູນ 1,000MB), ຄ່າ latency ເວັບໄຊຕ້າສຸດ (50ms ສຳລັບການເຊື່ອມຕໍ່ 1,000MB) ແລະ ການນຳໃຊ້ CPU ມີປະສິດທິພາບດີທີ່ສຸດ (24% ໃນເວລາ 1,000 ການເຊື່ອມຕໍ່). ສຳລັບຂະໜາດແພັກເກັດຂະໜາດນ້ອຍ (ໜ້ອຍກ່ວາ 700 Bytes) Cloudflare ມີການຕອບສະໜອງ RTTs ທີ່ດີຢູ່ທີ່ປະມານ 10 ms ແລະ ມີປະສິດທິພາບດີສຳລັບການວຽກເວລາ

ຟາຍມີຂະໜາດນ້ອຍ. ແຕ່ໃນຄະນະດຽວກັນຄ່າ Web latency ປະມານແມ່ນ 200ms ແລະ ການນຳໃຊ້ CPU ສູງກວ່າ 32% ໃນສະຖານະການມີການເຊື່ອມຕໍ່ສູງ. ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ZeroTier ປະສິດກັບບັນຫາໃນກໍລະນີຟາຍຂະໜາດໃຫຍ່ ແລະ ການເຊື່ອມຕໍ່ຫຼາຍ, ຍ້ອນວ່າການດາວໂຫຼດຟາຍ 1,000MB ໃຊ້ເວລາ 84 ວິນາທີ ແລະ ໃຊ້ CPU ເຖິງ 62%. WireGuard ປະສິດທິພາບດີກ່ວາໝູ່ສໍາລັບຄໍາຮ້ອງສະໝັກທີ່ສາມາດຂະຫຍາຍໄດ້. Cloudflare ແລະ ZeroTier ສະໜອງທາງເລືອກທີ່ມີດີກ່ວາສໍາລັບກໍລະນີການນຳໃຊ້ສະເພາະ, ໃຫ້ຄວາມເຂົ້າໃຈກ່ຽວກັບວິທີການແກ້ໄຂ VPN ທີ່ຈະເລືອກໂດຍອີງຕາມຄວາມຕ້ອງການວຽກແລະຂໍ້ຈຳກັດຂອງຊັບພະຍາກອນ.

3. ວິທີດໍາເນີນການຄົ້ນຄວ້າ

ກອບ ແລະ ວິທີການຂອງການຄົ້ນຄວ້າ ແມ່ນໄດ້ສຶກສາກ່ຽວກັບລະບົບ ZeroTier tunnel ແລະ Cloudflare WARP ທີ່ເນັ້ນກ່ຽວກັບ ຜົນກະທົບທາງດ້ານເຄືອຂ່າຍ ແລະ ປະສິດທິພາບການທໍາງານຂອງ Server, ທັງສອງລະບົບນີ້ແມ່ນໄດ້ຮັບຄວາມນິຍົມ. ສິ່ງສໍາຄັນຫຼັກຂອງການຄົ້ນຄວ້ານີ້ແມ່ນປຽບທຽບເປັນຕົ້ນ ຄ່າຂອງ round-time-trip, data transmission rate ແລະ ການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ພາຍໃຕ້ເງື່ອນໄຂຂອງສະພາບແວດລ້ອມທີ່ໄດ້ກຳນົດຂຶ້ນມາດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

3.1 ການຈຳລອງ ແລະ ເຕັກຕິກ client ແລະ server ທັງກໍລະນີ ZT ແລະ CF

(1) Virtual FTP Server ຕິດຕັ້ງ Ubuntu, ZT tunnel ແລະ CF WARP ໄດ້ຕິດຕັ້ງຢູ່ເທິງ ftp server ດັ່ງກ່າວ ໃນຂະນະດຽວກັນນຳໃຊ້ Laptop Client ເຊື່ອມຕໍ່ຜ່ານເຄືອຂ່າຍ LAN Wi-Fi ເຂົ້າຫາ ftp server ຜ່ານລະບົບເຄືອຂ່າຍອຸໂມງຂອງ ZT ແລະ CF ທີ່ຫ່າງຈາກກັນດ້ວຍໄລຍະປະມານ 20km. ສ່ວນການບັນທຶກຜົນແມ່ນນຳໃຊ້ Apache JMeter ບັນທຶກ, ລາຍລະອຽດຂອງອຸປະກອນນຳໃຊ້ເຮັດທົດລອງ ແລະ ການເຊື່ອມຕໍ່ ໄດ້ສະແດງໃນ ຕາຕະລາງ 3.1, ຮູບ 3.1 ແລະ ຮູບ 3.2.

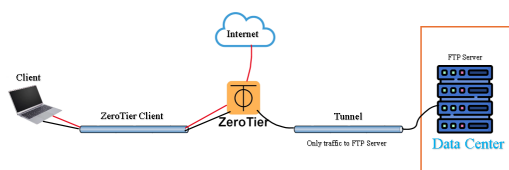
(2) ຕິດຕັ້ງ ZT tunnel/CF WARP:

ຕິດຕັ້ງ ZT: ລົງທະບຽນເຂົ້າໃຊ້ ZeroTier account ຜ່ານ web portal (<https://www.zerotier.com/>), ສ້າງ Virtual Network ເພື່ອສ້າງ ID ແລະ ຊື່ ເຄືອຂ່າຍ. (“ZeroTier | Download,” n.d.) ຈາກນັ້ນທໍາການຕັ້ງຄ່າ ZT Programme ໂດຍການຕິດຕັ້ງ ZT ທັງເຄື່ອງ Client ແລະ FTP server, ຕັ້ງ Network ID. ຈາກນັ້ນ login ເພື່ອກຳນົດຄ່າໃຫ້ເຊື່ອມຕໍ່ກັບເຄືອຂ່າຍທີ່ເຮົາສ້າງ (Create a Network | ZeroTier Documentation, n.d.).

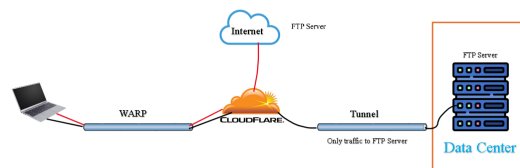
ຕິດຕັ້ງ CF: ລົງທະບຽນເຂົ້າ CF ຜ່ານ web portal (<https://dash.cloudflare.com/login>). (Get Started, 2025) ເພື່ອເຊື່ອມຕໍ່ເຄືອຂ່າຍ ຕິດຕັ້ງ CF WARP ໃນ Client ແລະ FTP Server ແລ້ວເປີດ tunnel. ທໍາການຢືນຢັນ ແລະ

ຕັ້ງຄ່າ ເພື່ອເຊື່ອມຕໍ່ຜ່ານເຄືອຂ່າຍ CF (Set up Your First Tunnel · Cloudflare Zero Trust Docs, 2024).

- (3) ການທົດລອງ RTT ໂດຍໃຊ້ຄໍາສັ່ງ ping ຈາກ Client ຫາ Server ຜ່ານ ZT tunnel/CF WARP;
- (4) ການທົດລອງ Upload/Download ຂໍ້ມູນ ເພື່ອວັດບັນທຶກອັດຕາຄວາມໄວຂອງການຮັບ/ສົ່ງຂໍ້ມູນຜ່ານ tunnel ດັ່ງກ່າວໄວ້. ໃຊ້ Apache JMeter ບັນທຶກຄ່າ;
- (5) ການທົດລອງ CPU ແລະ RAM ໃຊ້ JMeter ເປັນເຄື່ອງມືທົດລອງ ແລະ ບັນທຶກຜົນແຕ່ລະກໍລະນີ;
- (6) ນຳເອົາຄ່າທີ່ບັນທຶກໄດ້ຈາກການທົດລອງມາສຶກສາວິເຄາະ ແລະ ປຽບທຽບປະສິດທິພາບດ້ານຕ່າງໆ;
- (7) ອະທິບາຍຜົນ ແລະ ສະຫຼຸບຜົນການຄົ້ນຄວ້າທົດລອງ.



ຮູບ 1 ການອອກແບບລະບົບທົດລອງ ZeroTier tunnel



ຮູບ 2 ການອອກແບບລະບົບທົດລອງ Cloudflare tunnel

3.2 ເຄື່ອງມືທີ່ໃຊ້ໃນການເກັບກຳຂໍ້ມູນ

ເຄື່ອງມືທີ່ໃຊ້ໃນການຄົ້ນຄວ້າທົດລອງໃນບົດນີ້ ແມ່ນມີທັງການນຳໃຊ້ ລະບົບ Hardware, Software ທີ່ຜູ້ທົດລອງໄດ້ອອກແບບຕິດຕັ້ງ ແລະ ກະກຽມສໍາລັບການທົດລອງປະກອບມີດັ່ງໃນຕາຕະລາງ 3.1.

ຕາຕະລາງ 3.1 ເຄື່ອງມືໃຊ້ໃນການຄົ້ນຄວ້າທົດລອງ

1	FTP Server (VPS)	HW: VM CPU 2 cores, RAM 4 G, HDD 100 G OS: Ubuntu22.04.3.desktop. amd64 Install and Configure Software: FTP, ZeroTier, Cloudflare, JMeter Agent	ຕິດຕັ້ງຢູ່ຊຸມ (ແຕ່ລັງໝາກຄາຍ) ນະຄອນຫຼວງວຽງຈັນ
2	Laptop	LAPTOP Processor 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz Installed RAM 8.00 GB (7.70 GB usable) System type 64-bit operating system, x64-based processor - OS: Edition Windows 11 Home Single Language Version 23H2, Installed on 1/30/2023 OS build 22631.4317, Experience, Windows, Feature Experience Pack 1000.22700.1041.0 - ຕິດຕັ້ງ ZeroTier Client 1.14.0 - ຕິດຕັ້ງ Cloudflare WARP ver. 2024.11.150.0	
3	ຕິດຕັ້ງໃຊ້ໃນການ ຍົກສູງຄ່າສະເລັຍ ມູນ	- Apache JMeter 5.6.3 - CVS File - Graphic tool. - Etc.	ຕິດຕັ້ງຢູ່ Laptop

3.3 ວິທີເກັບກຳຂໍ້ມູນ

3.3.1 ການທົດລອງ ແລະ ເກັບກຳຂໍ້ມູນ Round-Trip Time (RTT).

ໃນການທົດລອງທັງສອງກໍລະນີ, ໃຊ້ຄຳສັ່ງ “ping <server’s IP address> -n 10” ຈາກເຄື່ອງ client ຫາ server ຜ່ານ tunnels ເພື່ອ ຫາຄ່າສະເລັຍຂອງ RTT ທີ່ສະແດງຜົນຈາກການ ping ແຕ່ລະຄັ້ງ ($RTT_1, \dots, RTT_N$) ແລ້ວບັນທຶກຄ່າສະເລຍເວລາ (RTT_n) ໃສ່ໃນຕາຕະລາງ 4.1. ການທົດລອງຈະເຮັດແບບດຽວກັນ ແຕ່ແຍກເປັນ 2 ກໍລະນີ ZT ແລະ CF.

ຕາຕະລາງ 3.2 ຕາຕະລາງບັນທຶກຂໍ້ມູນການທົດລອງ RTT ສະເລັຍແຕ່ຄັ້ງ

ຄັ້ງ	Round Trip Time (ms)	
	ZeroTier	Cloudflare
1	RTT^{ZT}_1	RTT^{CF}_1
2	RTT^{ZT}_2	RTT^{CF}_2
3	RTT^{ZT}_3	RTT^{CF}_3
4	RTT^{ZT}_4	RTT^{CF}_4
5	RTT^{ZT}_5	RTT^{CF}_5
6	RTT^{ZT}_6	RTT^{CF}_6
7	RTT^{ZT}_7	RTT^{CF}_7
8	RTT^{ZT}_8	RTT^{CF}_8
...	...	...
N	RTT^{ZT}_n	RTT^{CF}_n

ຈາກນັ້ນ, ຄຳນວນຫາຄ່າສະເລັຍ RTT ຂອງການ ping ທັງ n ຄັ້ງ ທັງ 2 ກໍລະນີ, ໂດຍໃຊ້ສູດ (2.1) & (2.2) ຂ້າງລຸ່ມ.

$$averageRTT^{ZT} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N RTT^{ZT}_n \quad (2.1)$$

$$averageRTT^{CF} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N RTT^{CF}_n \quad (2.2)$$

$averageRTT^{ZT}$ ແລະ $averageRTT^{CF}$ ແມ່ນຄ່າສະເລັຍ RTT ຂອງກໍລະນີ ZT ແລະ CF ຕາມລຳດັບ.

3.3.2 ການທົດລອງ ແລະ ເກັບຂໍ້ມູນກ່ຽວກັບອັດຕາຄວາມໄວຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນຂອງການ Upload/Download.

ການທົດລອງນີ້ຈະນຳໃຊ້ Apache JMeter ເຊິ່ງເປັນເຄື່ອງມືມາດຕະຖານສາກົນສຳລັບການທົດສອບປະສິດທິພາບຂອງລະບົບ. ການຕັ້ງຄ່າການທົດລອງຈະເລີ່ມຕົ້ນດ້ວຍການສ້າງ Test Plan ທີ່ປະກອບໄປດ້ວຍ Thread Group ກຳນົດຄ່າ FTP User (Number of Thread) ເປັນ 1 user, ໄລຍະຫ່າງຂອງເວລາໃນການສົ່ງແຕ່ລະຄັ້ງ (Ramp-up period), ຈຳນວນຄັ້ງທີ່ທົດລອງ (Loop Count) 10 ຄັ້ງ ແລະ ຄ່າອື່ນໆ. ສ້າງ Sampler ໂດຍເພີ່ມ FTP Request ເຂົ້າໃນ Test Plan ຈາກນັ້ນ ກຳນົດຄ່າ ຕ່າງໆ ກ່ຽວກັບ FTP server ເຊັ່ນ: IP address ຂອງ FTP Server, ທີ່ເກັບ Remote file, ທີ່ເກັບ Local file ເພື່ອຈະທຳການ upload ແລະ download. ເພີ່ມ Listener ເພື່ອ ສະແດງຜົນການບັນທຶກຂໍ້ມູນໄດ້ຈາກການທົດລອງ ສະແດງອອກມາໃນຕາຕະລາງ (View Results in Table). ຫຼັງຈາກສຳເລັດ ກຳທຳການທົດລອງ ດ້ວຍການກົດປຸ່ມທຳການ, ລະບົບຈະທຳການຕາມຂັ້ນຕອນທີ່ເຮົາໄດ້ກຳນົດມາຂ້າງເທິງ ແລ້ວ ສະແດງຜົນອອກມາໃນໜ້າຕ່າງ ແລະ log file ຂອງ Apache JMeter, ການທົດລອງ upload/download files ຈະເຮັດທົດລອງເປັນຈຳນວນ 10 ຄັ້ງ, ຈາກນັ້ນຈະນຳເອົາຄ່າສະເລັຍຂອງການສົ່ງ (Delay or Transmission Time) ຂອງແຕ່ລະກໍລະນີຂອງແຕ່ລະຂະໜາດຟາຍຂໍ້ມູນ (ຕາຕະລາງ 3.3)

ຕາຕະລາງ 3.3 ຕົວຢ່າງການບັນທຶກຜົນຄ່າສະເລັຍ delay & latency ໃນການຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນຂະໜາດ 1MB

1MB No. (CF)	upload	download
	Delay (ms)	Delay (ms)
1	1,619	2,987
2	1,636	2,923
3	1,577	2,921
4	1,511	3,009
5	1,598	2,984
6	1,515	1,249
7	1,568	2,949
8	1,598	2,962
9	1,597	2,950
10	1,587	2,993
AV-1MB	1,581	2,788

ຕາຕະລາງ 3.4 ຄ່າສະເລັຍ upload, download CF&ZT

	Download				
	Cloudflare		ZeroTier		
	Delay (ms)	DTR (bit/s)	Delay (ms)	DTR (bit/s)	
AV- 1MB	1,581	5,305.89			8,388,608
AV- 100MB					838,860,800
AV- 500MB					4,194,304,000
AV- 1000MB					8,589,934,592
AV- 2000MB					17,179,869,184
AV- 3GB					25,769,803,776
AV- 5GB					42.949.672.960

ແລ້ວ ມາຫາຄ່າ DTR ດ້ວຍສູດຄິດໄລ່ (2.3) ຈາກນັ້ນ ບັນທຶກຜົນທີ່ໄດ້ທັງໝົດເຂົ້າໃສ່ໃນຕາຕະລາງ 3.4 ເພື່ອການ ວິເຄາະປຽບທຽບ.

DTR = Number of Bit/Transmission Time (b/s)
(2.3)

=> DTR = 8,388,608bits (or 1MB) / 1.581 second
(1,581ms)= 5.31 b/s (1MB=8,388,608bits)

ກ. ຕາຕະລາງຄ່າຕົວປ່ຽນ ບັນທຶກຜົນການທົດລອງຄ່າ delay time ຈຳນວນ10 ຮອບ ຂອງການ upload ແລະ download

ຄັ້ງທີ	Delay (ms)	
	Upload	Download
1	$d_u(1)$	$d_d(1)$
2	$d_u(2)$	$d_d(2)$
3	$d_u(3)$	$d_d(3)$
4	$d_u(4)$	$d_d(4)$
5	$d_u(5)$	$d_d(5)$
6	$d_u(6)$	$d_d(6)$
...	...	...
10	$d_u(10)$	$d_d(10)$

$d_u(1), \dots, d_u(10)$: ຄ່າໃຊ້ໃນການອັບໂລດຄັ້ງທີ 1, ..., 10

$d_d(1), \dots, d_d(10)$: ຄ່າໃຊ້ໃນການດາວໂລດຄັ້ງທີ 1, ..., 10

ຫຼັງຈາກນັ້ນເຮົາຈະຫາຄ່າເວລາສະເລ່ຍໂດຍໃຊ້ສູດຄິດໄລ່:

$$D_u^{ZT}(1) = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} d_u(n) \quad (3.4)$$

$$D_d^{ZT}(1) = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} d_d(n) \quad (3.5)$$

$D_u^{ZT}(1)$ ຄ່າສະເລ່ຍເວລາ upload ກໍລະນີທີ (ZT, 1MB)

$D_d^{ZT}(1)$ ຄ່າສະເລ່ຍເວລາ download ກໍລະນີທີ (ZT, 1MB)

$n = 1, \dots, 10$ ຈຳນວນຄັ້ງທົດລອງແຕ່ລະກໍລະນີ

$$average D_u^{ZT} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_u^{ZT}(i) \quad (3.6)$$

$$average D_d^{ZT} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_d^{ZT}(i) \quad (3.7)$$

$$average D_u^{CF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_u^{CF}(i) \quad (3.8)$$

$$average D_d^{CF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_d^{CF}(i) \quad (3.9)$$

$average D_d^{ZT}$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍລວມເວລາ download ສໍາລັບ ກໍລະນີທົດລອງ ZT; $average D_u^{ZT}$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍລວມ ເວລາ upload ສໍາລັບກໍລະນີທົດລອງ ZT; $average D_d^{CF}$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍລວມເວລາ download ສໍາລັບກໍລະນີທົດລອງ

CF; $average D_u^{CF}$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍລວມເວລາ upload ສໍາ ລັບກໍລະນີທົດລອງ CF; $D_u^{ZT}(i)$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍເວລາ upload ຂອງການທົດລອງກໍລະນີ (ZT, iMB); $D_d^{ZT}(i)$ ແມ່ນ ຄ່າສະເລ່ຍເວລາ download ຂອງການທົດລອງກໍລະນີ (ZT, iMB); $D_u^{CF}(i)$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍເວລາ upload ຂອງກໍລະນີ (CF, iMB); $D_d^{CF}(i)$ ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍເວລາ download ຂອງ ການທົດລອງກໍລະນີ (CF, iMB); ເຊິ່ງ $i = 1, \dots, N$ ແມ່ນ ກໍລະນີປ່ຽນຂະໜາດຂໍ້ມູນທົດລອງ; N ແມ່ນ ຈຳນວນຄັ້ງທີ່ປ່ຽນ ຂະໜາດຂໍ້ມູນທົດລອງ; ZT ແມ່ນ ກໍລະນີ ZeroTier; CF ແມ່ນ ກໍລະນີ CloudFlare.

ຈາກນັ້ນ, ເຮັດການທົດລອງ ແບບດຽວກັນກັບການ ທົດລອງກໍລະນີ (ZT, 1MB) ສໍາລັບກໍລະນີທົດລອງອື່ນໆ: (ZT, 100MB), (ZT, 500MB), ..., (ZT, XMB) ແລະ (CF, 1MB), (CF, 100MB), (CF, 500MB), ..., (CF, XGB) ແລ້ວບັນທຶກເຂົ້າໃນຕາຕະລາງ 3.5.

ຕາຕະລາງ 3.5 ຄ່າສະເລ່ຍເວລາ Upload/Download ຂອງ ກໍລະນີ ZeroTier (ZT) ທີ່ຂະໜາດ file ຕ່າງໆ

ກໍລະນີ	Sent Bytes (MB)	Upload Delay (ms)	Download Delay (ms)
1MB	1	$D_u^{ZT}(1)$	$D_d^{ZT}(1)$
100MB	100	$D_u^{ZT}(100)$	$D_d^{ZT}(100)$
500MB	500	$D_u^{ZT}(500)$	$D_d^{ZT}(500)$
1000MB	1000	$D_u^{ZT}(1000)$	$D_d^{ZT}(1000)$
2000MB	2000	$D_u^{ZT}(2000)$	$D_d^{ZT}(2000)$
3GB	3G	$D_u^{ZT}(3G)$	$D_d^{ZT}(3G)$
...	...	...	...
XGB	XG	$D_u^{ZT}(XG)$	$D_d^{ZT}(XG)$

ຂ. ການທົດລອງກໍລະນີຂອງ CloudFlare

ເຮັດຄ້າຍຄືກັນກັບ ກໍລະນີ ZT ໃນຂໍ້ ກ, ແລ້ວບັນທຶກ ຜົນຄ່າສະເລ່ຍ ກໍລະນີ (CF, 1MB), (CF, 100MB), (CF, 500MB), ..., (CF, XGB) ເຂົ້າ ຕາຕະລາງ 3.6.

ຕາຕະລາງ 3.6 ຄ່າສະເລ່ຍເວລາ Upload/Download ຂອງ ກໍລະນີ Cloudflare (CF) ທີ່ຂະໜາດ file ຕ່າງໆ.

ກໍລະນີ	Sent Bytes (MB)	Upload Delay (ms)	Download Delay (ms)
1MB	1	$D_u^{CF}(1)$	$D_d^{CF}(1)$
100MB	100	$D_u^{CF}(100)$	$D_d^{CF}(100)$
500MB	500	$D_u^{CF}(500)$	$D_d^{CF}(500)$
1000MB	1000	$D_u^{CF}(1000)$	$D_d^{CF}(1000)$
2000MB	2000	$D_u^{CF}(2000)$	$D_d^{CF}(2000)$
3GB	3G	$D_u^{CF}(3G)$	$D_d^{CF}(3G)$
...	...	...	...
XGB	XG	$D_u^{CF}(XG)$	$D_d^{CF}(XG)$

3.3.3 ການທົດລອງ ແລະ ເກັບຂໍ້ມູນການນໍາໃຊ້ ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ຂອງເຄື່ອງເຊີເວີ

ໃຊ້ JMeter ທົດລອງ ແລະ ເກັບຂໍ້ມູນ: ໃນ JMeter ສ້າງ Test Plan ແລະ ຕັ້ງຄ່າຕ່າງໆ ເຊັ່ນ: FTP Request ເພື່ອ ທົດລອງ upload/download ຂໍ້ມູນ, ສ້າງ listener ປະເພດ PerfMon ເພື່ອ ວັດແທກການນໍາໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM, ກໍານົດຄ່າອື່ນໆກ່ຽວຂ້ອງກັບຈຸດປະສົງຂອງການທົດລອງ. ເບື້ອງຂອງ FTP Server ກໍ່ໃຫ້ run ServerAgent ເພື່ອ ສື່ສານ ກັນກັບ JMeter PerfMon ໃນການສົ່ງຂໍ້ມູນຂອງຄ່າ CPU ແລະ RAM ມາຍັງ JMeter. ຫຼັງຈາກຕິດຕັ້ງຄ່າສໍາເລັດທັງໝົດກໍ່ໃຫ້ JMeter ທໍາງານ ແລ້ວ ສະແດງຂໍ້ມູນອອກມາ, ເຮົາຈະນໍາເອົາຂໍ້ມູນທີ່ໄດ້ບັນທຶກແຕ່ລະຄັ້ງເຂົ້າໃສ່ໃນຕາຕະລາງ 3.7.

ຕາຕະລາງ 3.7 ບັນທຶກຂໍ້ມູນກ່ຽວກັບການທໍາງານຂອງ CPU ແລະ RAM ທົດລອງກັບຂະໜາດ file N Megabytes

Elapsed time	CPU	Memory
ET1	C1	M1
ET2	C2	M2
ET3	C3	M3
ET4	C4	M4
ET5	C5	M5
ET6	C6	M6
ET7	C7	M7
....	...	...
ETn	Cn	Mn
Average(ET)	Average(C)	Average(M)

- Elapsed time: ເວລາ ໂດຍ ET1, ET2, ...ETn ແມ່ນ ເວລາສະເລັຍຂອງການທົດລອງແຕ່ລະຮອບ.
- CPU: ການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນໜ່ວຍປະມວນຜົນ CPU ໂດຍ C1, C2,...Cn ແມ່ນຄ່າສະເລັຍທີ່ໄດ້ຈາກການ ທົດລອງການໃຊ້ CPU ແຕ່ລະຮອບ (%)
- Memory: ຄ່າການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນໜ່ວຍຄວາມຈໍາ RAM ໂດຍ M1, M2,...Mn ແມ່ນຄ່າສະເລັຍໄດ້ຈາກ ການທົດລອງວັດການນໍາໃຊ້ RAM ແຕ່ລະຮອບ (%).
- Average(ET) ຄ່າສະເລັຍເວລາລວມໄດ້ຈາກ:

$$\text{Average(ET)} = (\text{ET1} + \text{ET2}, \dots + \text{ETn}) / n \quad (3.10)$$
 - Average(C): ຄ່າສະເລັຍການໃຊ້ CPU ລວມໄດ້ຈາກ:

$$\text{Average(C)} = (\text{C1} + \text{C2}, \dots + \text{Cn}) / n \quad (3.11)$$
 - Average(M): ຄ່າສະເລັຍການໃຊ້ RAM ລວມໄດ້ ຈາກ:

$$\text{Average(M)} = (\text{M1} + \text{M2}, \dots + \text{Mn}) / n \quad (3.12)$$

3.4 ການວິເຄາະຂໍ້ມູນ

ຈາກທົດລອງຈະນໍາເອົາຜົນທີ່ໄດ້ຮັບ ມາຄໍານວນ ເພື່ອ ວິເຄາະ, ອະທິບາຍ ແລະ ປຽບທຽບ ຄ່າຕ່າງໆ ດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

3.4.1 ວິເຄາະປຽບທຽບຄ່າ Round-Trip Time (RTT):

ເອົາຜົນຂອງການທົດລອງ ແລະ ການຄໍານວນໃນຂໍ້ 3.3.1 ມາ ເພື່ອ ປຽບທຽບໃຫ້ເຫັນຄ່າຄວາມແຕກຕ່າງ ເປັນຕົ້ນ ຄ່າສູງສຸດ RTT ເພື່ອ ລະບຸບັນຫາທີ່ເກີດຂຶ້ນຊົ່ວຄາວ; ຄ່າຕໍ່າສຸດ RTT ເພື່ອ ເບິ່ງປະສິດທິພາບທີ່ດີທີ່ສຸດ; ຄ່າສະເລັຍ (Average) RTT ເພື່ອເສັງເກດພາບລວມຂອງປະສິດທິພາບ; ວິເຄາະການ ກະຈາຍຂອງຂໍ້ມູນ ໃຊ້ Graph ຫຼື ຕາຕະລາງ ເພື່ອ ເບິ່ງການ ກະຈາຍຂອງຄ່າ RTT; ວິເຄາະສາເຫດ ທີ່ເຮັດໃຫ້ຄ່າ RTT ສູງ ຫຼື ຜັນຜວນ ເປັນຕົ້ນ ບັນຫາຂອງ ຮາດແວ, ຊອບແວ, ເຄືອຂ່າຍ ຫຼື ປະລິມານການໃຊ້ງານສູງ ແລະ ອື່ນໆ. ຂໍ້ມູນຈາກຕາຕະລາງ 3.2 ເມື່ອມາຄິດໄລ່ດ້ວຍສົມຜົນທີ (2.1) ແລະ ທີ (2.1) ໄດ້ຄ່າສະເລັຍ RTT ຂອງ ZT ແລະ CF. ປຽບທຽບຜົນ: ຄ່າ $averageRTT^{ZT}$ ແລະ $averageRTT^{CF}$ ເພື່ອ ສັງເກດເບິ່ງຜົນກະທົບ, ຄ່າ RTT ທີ່ນ້ອຍກ່ວາຈະມີຜົນທີ່ດີກ່ວາ.

3.4.2 ສຶກສາປະສິດທິພາບດ້ານອັດຕາຄ່າຄວາມໄວ ຂອງການ upload/download ຂໍ້ມູນ:

ເອົາຜົນການທົດລອງ ແລະ ຄິດໄລ່ໃນຂໍ້ 3.3.2 ແລ້ວ ເອົາຄ່າສະເລັຍທີ່ໄດ້ແຕ່ລະກໍລະນີເຂົ້າໃນຕາຕະລາງ 3.3, 3.4, 3.5 ແລະ 3.6 ແລ້ວຫາຜົນສະເລັຍດ້ວຍການໃຊ້ສົມຜົນຄິດໄລ່ (3.6), (3.7), (3.8) ແລະ (3.9) ເພື່ອຫາຄ່າສະເລັຍເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນ ລວມຂອງກໍລະນີ ZT ແລະ CF. ເຮັດການວິເຄາະປຽບທຽບຄ່າ delay ສະເລັຍຂອງການ upload/download ລະຫວ່າງ ZT ແລະ CF ທີ່ໄດ້ຈາກສົມຜົນ (3.6), (3.7), (3.8) ແລະ (3.9) ຕາມລຳດັບ. ຖ້າຄ່າສະເລັຍ ເວລາ upload/download ກໍລະນີໃດນ້ອຍໜ້າຄວາມວ່າ ກໍລະນີນັ້ນມີປະສິດທິພາບດີກ່ວາ. ຄ່າ Delay ຈະເປັນອັດຕາ ພົວພັນບິ້ນກັບຄ່າອັດຕາ DTR, ຖ້າ delay ມີຄ່ານ້ອຍລົງ ແມ່ນ ຄ່າອັດຕາການຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນຈະສູງຂຶ້ນ.

3.4.3 ສຶກສາຜົນການນໍາໃຊ້ CPU ແລະ RAM:

ນໍາເອົາຜົນທີ່ໄດ້ຈາກຂໍ້ 3.3.3 ໃນຕາຕະລາງ 3.7 ມາສຶກສາຜົນການນໍາໃຊ້ CPU ແລະ RAM ຂອງເຄື່ອງເຊີເວີ ຄ່າ ນວນດ້ວຍສູດ (3.10), (3.11) ແລະ (3.12) ແລ້ວປຽບທຽບ, ຄ່າສະເລັຍໂຕໃດຕໍ່າຈະມີຜົນດີຕໍ່ກັບການທໍາງານຂອງ CPU ແລະ RAM.

4. ຜົນການຄົ້ນຄວ້າ

4.1 ວິເຄາະຂໍ້ມູນຂອງຄ່າເວລາການເດີນທາງໄປກັບ (Round-Trip Time)

ຈາກຜົນການທົດລອງ ດັ່ງທີ່ໄດ້ກ່າວໄວ້ໃນຂໍ້ 3.3.1, ສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ: ZT ມີຄ່າຕອບສະໜອງເວລາ (RTT), ມີຄ່າ ທີ່ຕໍ່າສຸດແມ່ນ 23 ms ແລະ ຄ່າຫຼາຍສຸດແມ່ນ 40ms ຖືວ່າຢູ່ໃນ ລະດັບທີ່ຍອມຮັບໄດ້ສໍາລັບການນໍາໃຊ້ງານທົ່ວໄປ. ການຄິດໄລ່ຄ່າ ສະເລັຍຂອງ ZT ໂດຍນໍາໃຊ້ສູດ (2.1) ແລະ (2.2) ທີ່ໄດ້ກ່າວມາ ຂ້າງຕົ້ນ ໄດ້ຜົນລັບເທົ່າກັບ 29 ms. ສ່ວນ CF ແມ່ນມີຄ່າຕອບ

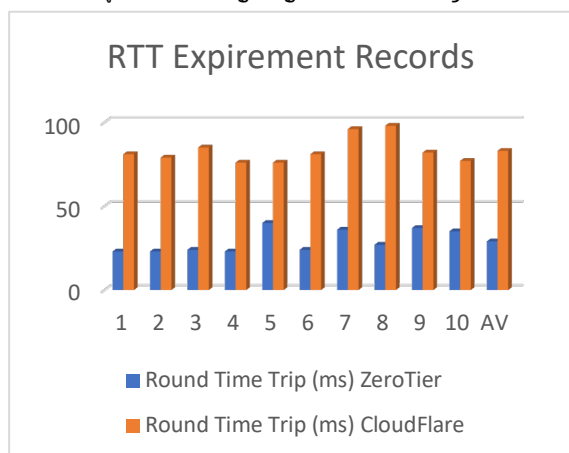
ສະໜອງເວລາຕໍ່ສູດຢູ່ທີ່ 76ms ແລະ ຄ່າ ຫຼາຍສຸດແມ່ນ 83ms ເຊິ່ງສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງການຜັນແປທີ່ຫຼາຍກວ່າເມື່ອທຽບກັບ ZT. ການຄິດໄລ່ຄ່າສະເລ່ຍຂອງ CF ໄດ້ຜົນລັບ 83 ms, ເຊິ່ງສູງກວ່າ ZT ເກືອບສາມເທົ່າ.

ຄວາມແຕກຕ່າງທີ່ໜ້າສົນໃຈນີ້ສາມາດອະທິບາຍໄດ້ຈາກຫຼາຍປັດໃຈ. ZT ໃຊ້ເຕັກໂນໂລຢີ peer-to-peer networking ທີ່ສາມາດສ້າງການເຊື່ອມຕໍ່ໂດຍກົງລະຫວ່າງອຸປະກອນ, ລົດຄວາມຈຳເປັນໃນການຜ່ານເຊີເວີສໍາລັບການສື່ສານ. ໃນຂະນະທີ່ CF ອາດຈະຕ້ອງຜ່ານຂັ້ນຕອນການປະມວນຜົນເພີ່ມເຕີມ ຫຼືການເດີນທາງຜ່ານເຊີເວີ proxy (CDN) ທີ່ຫ່າງໄກກວ່າ. ໂດຍລາຍລະອຽດແມ່ນໄດ້ສະແດງໃນຕາຕະລາງ 4.1 ແລະ ຮູບ 4.1.

ຕາຕະລາງ 4.1 ບັນທຶກຄ່າ RTT

No	Round Time Trip (ms)	
	ZeroTier	CloudFlare
1	23	81
2	23	79
3	24	85
4	23	76
5	40	76
6	24	81
7	36	96
8	27	98
9	37	82
10	35	77
AV	29	83

ຮູບ 4.1 ການປຽບທຽບ RTT ລະຫວ່າງ ZT&CF



4.2 ຂໍ້ມູນດ້ານປະສິດທິພາບຂອງການຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນ

ພາຍຫຼັງຈາກການທົດລອງແຕ່ລະກໍລະນີ ຂອງ ZT ແລະ CF. ຈາກນັ້ນ, ມາຫາຄ່າສະເລ່ຍຂອງແຕ່ລະກໍລະນີຕາມຂະ

ໜາດຂອງຂໍ້ມູນໃຊ້ upload/download, ໃນນີ້ ຄ່າສະເລ່ຍສໍາລັບການ upload/download 1MB ແມ່ນໃຊ້ສັນຍາລັກ AV-1 MB, 500MB ແມ່ນສໍາລັບກໍລະນີຂະໜາດຂໍ້ມູນ AV-500MB ຈົນເຖິງ AV-5GB ແລ້ວບັນທຶກຜົນເຂົ້າໃສ່ໃນການ upload/download ເຂົ້າໃສ່ຕາຕະລາງ 4.2.a (upload) ແລະ ຕາຕະລາງ 4.2.b (download).

- Delay ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍຄວາມຊັກຊ້າຂອງການ upload/download ມີຫົວໜ່ວຍເປັນ milliseconds;
- Data Transmission Rate (DTR) ແມ່ນຄ່າສະເລ່ຍອັດຕາການຮັບສົ່ງ

$$DTR = \text{Number of Bit/Transmission Time (b/s)}$$

ໃນກໍລະນີຂອງການ Upload:

ຄ່າຂໍ້ມູນ delay ຂອງ CF ໂດຍລວມຈະມີຄ່າສູງກ່ວາຄ່າ delay ຂອງ ZT ເປັນສ່ວນຫຼາຍ ມີພຽງກໍລະນີດຽວທີ່ CF ຕໍ່າກ່ວາຂອງ ZT ຄື: ກໍລະນີທົດລອງກັບຂໍ້ມູນຂະໜາດ 500MB ເຊິ່ງຄ່າ delay ຂອງ CF ແມ່ນ 270,887 ແລະ ຂອງ ZT ແມ່ນ 273,021 . ສ່ວນຄ່າຂອງອັດຕາການສົ່ງຂໍ້ມູນ DTR ເຫັນວ່າສອດຄ່ອງກັນກັບຜົນຂອງອັດຕາຄ່າ delay ເຊິ່ງ CF ໂດຍສ່ວນຫຼາຍແມ່ນມີຄ່າທີ່ຕໍ່າກ່ວາ, ມີພຽງກໍລະນີຂອງ 500MB ທີ່ມີຄ່າໜ້ອຍກ່ວາເລັກນ້ອຍ.

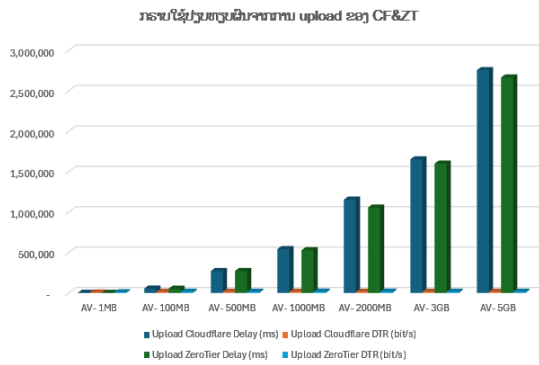
ໃນກໍລະນີຂອງການ Download:

ຄ່າຂໍ້ມູນຂອງການທົດລອງໃນຈຳນວນ 7 ກໍລະນີ, ເຫັນໄດ້ວ່າຄ່າ delay ຂອງ CF ຈະມີຕໍ່າກ່ວາ ຄ່າ delay ຂອງ ZT ເຖິງ 5 ກໍລະນີ ຍົກເວັ້ນ 2 ກໍລະນີທີ່ສະແດງຄ່າສູງກ່ວາຄື: ກໍລະນີຂໍ້ມູນຂະໜາດ 1MB, CF ມີຄ່າ 2,788 ສ່ວນ ZT ມີຄ່າ 2,184 ແລະ ໃນກໍລະນີຂໍ້ມູນຂະໜາດ 3GB CF ມີຄ່າ 1,763,663 ສ່ວນ ZT ແມ່ນ 1,681,952). ສ່ວນຄ່າຂອງອັດຕາການສົ່ງຂໍ້ມູນ DTR ເຫັນວ່າ CF ກໍຈະມີຄ່າສອດຄ່ອງກັນໃນ 2 ກໍລະນີ ຄື: ກໍລະນີຂໍ້ມູນຂະໜາດ 1MB, CF ມີຄ່າ 3.01 ສ່ວນ ZT ມີຄ່າ 3.84 ແລະ ໃນກໍລະນີຂໍ້ມູນຂະໜາດ 3GB CF ມີຄ່າ 14.61 ສ່ວນ ZT ແມ່ນ 15.32. ສ່ວນທີ່ເຫຼືອ 5 ກໍລະນີແມ່ນມີຄ່າສູງກ່ວາຂອງ CF ທັງໝົດ.

ຕາຕະລາງ 4.2.a ຄ່າສະເລ່ຍການ upload ຜ່ານ CF&ZT

	Upload				
	Cloudflare		ZeroTier		
	Delay (ms)	DTR (bit/s)	Delay (ms)	DTR (bit/s)	
AV- 1MB	1,581	5,305.89	940	8,924.05	8,388,608
AV- 100MB	54,904	15,278.68	52,882	15,862.88	838,860,800
AV- 500MB	270,887	15,483.59	272,201	15,408.85	4,194,304,000
AV- 1000MB	542,575	15,831.79	529,464	16,223.83	8,589,934,592
AV- 2000MB	1,154,420	14,881.82	1,056,953	16,254.15	17,179,869,184
AV- 3GB	1,653,365	15,586.28	1,599,657	16,109.58	25,769,803,776
AV- 5GB	2,756,167	15,583.12	2,666,449	16,107.44	42,949,672,960

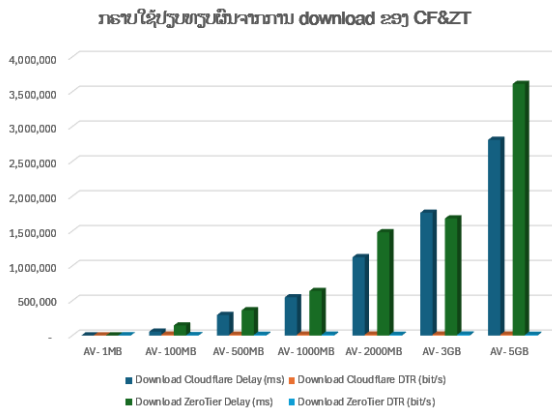
ຮູບ 4.2.a ສະແດງຜົນການ upload ຂອງ CF&ZT



ຕາຕະລາງ 4.2.b ຄ່າສະເລັຍການ download ຜ່ານ CF&ZT

	Download				MB to Bit
	Cloudflare		ZeroTier		
	Delay (ms)	DTR (bit/s)	Delay (ms)	DTR (bit/s)	
AV- 1MB	2,788	3,008.83	2,184	3,840.94	8,388,608
AV- 100MB	56,762	14,778.56	145,920	5,748.77	838,860,800
AV- 500MB	295,935	14,173.06	363,525	11,537.87	4,194,304,000
AV- 1000MB	550,551	15,602.43	640,233	13,416.89	8,589,934,592
AV- 2000MB	1,125,532	15,263.78	1,483,777	11,578.47	17,179,869,184
AV- 3GB	1,763,663	14,611.52	1,681,952	15,321.37	25,769,803,776
AV- 5GB	2,809,870	15,285.29	3,613,409	11,886.19	42,949,672,960

ຮູບ 4.2.b ສະແດງຜົນການ download ຂອງ CF&ZT



4.3 ຂໍ້ມູນປະສິດທິພາບຂອງຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM

ໃນສ່ວນຂອງການທົດລອງດ້ານປະສິດທິພາບຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນໜ່ວຍປະເມີນຜົນ (CPU) ແລະ ໜ່ວຍຄວາມຈຳຫຼັກ (RAM), ຫຼັງຈາກການທົດສອບແຕ່ລະກໍລະນີຜ່ານການ upload/download ສາມາດນຳຜົນບັນທຶກທີ່ໄດ້ມາຄິດໄລ່ຄ່າສະເລັຍຂອງ CPU & Memory. ຈາກຜົນການທົດລອງບັນທຶກໃນ ຕາຕະລາງ 4.3, ຕາຕະລາງ 4.4 ແລະ ຕາຕະລາງ 4.5, ສ່ວນ ຮູບ 4.3, ຮູບ 4.4 ແລະ ຮູບ 4.5 ແມ່ນ ກຣາຟທີ່ໃຊ້ເພື່ອປຽບທຽບ.

- Elapsed time ແມ່ນຄ່າສະເລັຍຂອງໄລຍະເວລາທີ່ໃຊ້ upload/download ຂອງແຕ່ລະກໍລະນີ.
- AV CPU ແມ່ນຄ່າສະເລັຍການທຳງານຂອງ CPU ຂອງແຕ່ລະກໍລະນີ.

- AV Memory ຫຼື RAM ແມ່ນຄ່າສະເລັຍການທຳງານຂອງ RAM ຂອງແຕ່ລະກໍລະນີ.

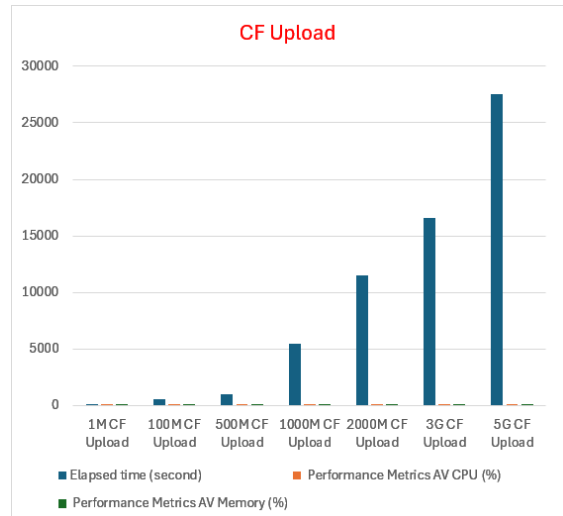
ຜົນການທົດລອງກໍລະນີໃຊ້ CF WARP:

ໃນຕາຕະລາງ 4.4 ແມ່ນການ upload ຂໍ້ມູນຜ່ານ CF: ໂດຍຂໍ້ມູນສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ ດ້ານເວລາທີ່ໃຊ້ມີການປ່ຽນແປງເພີ່ມຂຶ້ນຕາມການເພີ່ມຂະໜາດຂອງຂໍ້ມູນ. ຄ່າຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ຢູ່ລະຫວ່າງ 3.31% ຫາ 5.74% ແລະ RAM ມີຄ່າຢູ່ລະຫວ່າງ 11.58% ຫາ 14.11%, ຄ່າທັງສອງມີການປ່ຽນແປງພຽງເລັກນ້ອຍເທົ່ານັ້ນ ແລະ ນຳໃຊ້ໜ້ອຍຫຼາຍ ແລະ ເກືອບຈະຄືງທີ່ ແລະ ສະໜ້າສະເໝີ ເຮັດໃຫ້ມີຄວາມສະດຽນພຽງພໍສຳລັບການ upload.

ຕາຕະລາງ 4.3 ຂໍ້ມູນ CPU&RAM ກໍລະນີ upload ຂອງ CF

	Elapsed time (second)	Performance Metrics	
		AV CPU (%)	AV Memory (%)
1M CF Upload	16	3.31	11.58
100M CF Upload	548	5.02	13.97
500M CF Upload	1002	4.22	12.17
1000M CF Upload	5426	5.61	13.63
2000M CF Upload	11,544	5.36	12.7
3G CF Upload	16,593	5.74	13.45
5G CF Upload	27,561	5.64	14.11

ຮູບ 4.3 ປຽບທຽບ CPU&RAM ກໍລະນີ upload ຂອງ CF

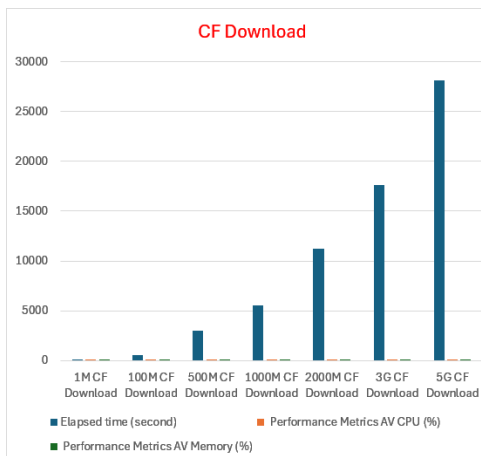


ໃນຕາຕະລາງ 4.5 ແມ່ນການ download ຂໍ້ມູນຜ່ານ CF: ໂດຍຂໍ້ມູນສະແດງໃຫ້ເຫັນ ດ້ານເວລາທີ່ໃຊ້ມີການປ່ຽນແປງເພີ່ມຂຶ້ນຕາມການເພີ່ມຂະໜາດຂອງຂໍ້ມູນ ເຊັ່ນດຽວກັນກັບກໍລະນີ upload ແຕ່ຄ່າຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ຢູ່ລະຫວ່າງ 0.49% ຫາ 1.59% ຕໍ່າກ່ວາກໍລະນີ Upload , ສ່ວນຄ່າຂອງ RAM ມີຄ່າລະຫວ່າງ 10.63% ຫາ 11.79% ມີການປ່ຽນແປງພຽງເລັກນ້ອຍເທົ່ານັ້ນ. ການນຳໃຊ້ຊັບພະຍາກອນທັງ CPU ແລະ RAM ແມ່ນໜ້ອຍຫຼາຍ ເຮັດໃຫ້ປະສິດທິພາບຍັງມີຄວາມສະດຽນພຽງພໍສຳລັບການ download.

ຕາຕະລາງ 4.4 ຂໍ້ມູນ CPU&RAM ກໍລະນີ download CF

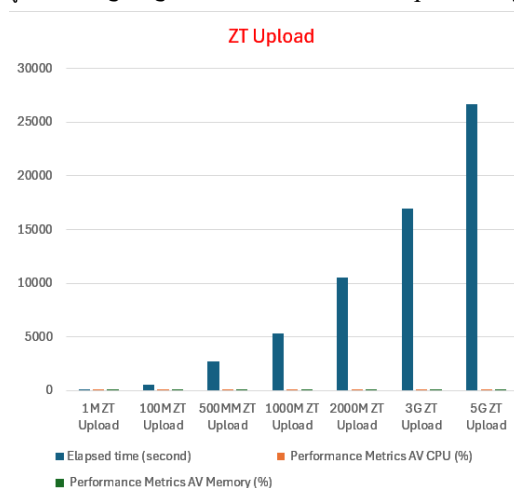
	Elapsed time (second)	Performance Metrics	
		AV CPU (%)	AV Memory (%)
1M CF Download	28	1.59	11.6
100M CF Download	568	0.49	11.02
500M CF Download	2960	0.77	10.63
1000M CF Download	5509	1.01	12.42
2000M CF Download	11,254	0.79	11.79
3G CF Download	17,637	1.48	11.11
5G CF Download	28097	1.35	10.69

ຮູບ 4.4 ປຽບທຽບ CPU&RAM ກໍລະນີ download ຂອງ CF



	Elapsed time (second)	Performance Metrics	
		AV CPU (%)	AV Memory (%)
1M ZT Upload	8	4.96	11.67
100M ZT Upload	528	5.34	14.25
500MM ZT Upload	2725	5.02	11.34
1000M ZT Upload	5294	5.15	13.77
2000M ZT Upload	10,569	5.46	14.6
3G ZT Upload	16,997	5.22	13.49
5G ZT Upload	26,664	5.16	13.96

ຮູບ 4.5 ປຽບທຽບ CPU&RAM ກໍລະນີ upload ຂອງ ZT

**ຜົນການທົດລອງກໍລະນີໃຊ້ ZT Tunnel:**

ຕາຕະລາງ 4.5 ແມ່ນການ upload ຂໍ້ມູນຜ່ານ ZT: ໂດຍຂໍ້ມູນສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ ດ້ານເວລາທີ່ໃຊ້ມີການປ່ຽນແປງເພີ່ມຂຶ້ນຕາມການເພີ່ມຂະໜາດຂອງຂໍ້ມູນ ແຕ່ ຄ່າຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ແມ່ນມີການປ່ຽນແປງພຽງເລັກນ້ອຍເທົ່ານັ້ນ (ຢູ່ລະຫວ່າງ 4.96% ຫາ 5.46% ສໍາລັບ CPU ແລະ ລະຫວ່າງ 11.34% ຫາ 14.6% ສໍາລັບ RAM) ແລະ ນໍາໃຊ້ໜ້ອຍຫຼາຍ ແລະ ເກືອບຈະຄືງທີ່ ແລະ ສະໜໍາສະເໜີເຮັດໃຫ້ມີຄວາມສະຖຽນພຽງພໍສໍາລັບການ upload ໃນກໍລະນີທີ່ໄດ້ທົດລອງ.

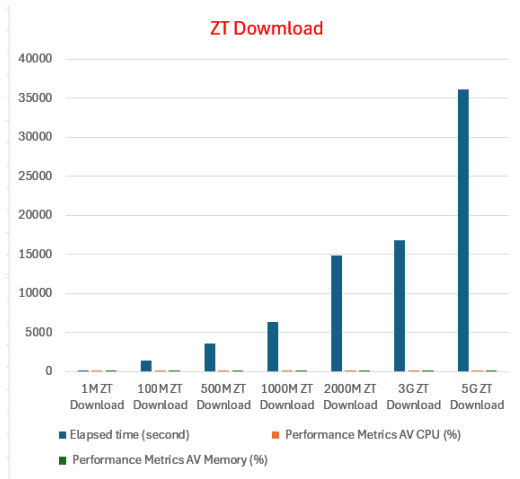
ຕາຕະລາງ 4.6 ແມ່ນການ download ຂໍ້ມູນຜ່ານ ZT: ໂດຍຂໍ້ມູນສະແດງໃຫ້ເຫັນຄ້າຍຄືກັນກັບກໍລະນີ upload ເຊິ່ງເວລາທີ່ໃຊ້ມີການປ່ຽນແປງເພີ່ມຂຶ້ນຕາມການເພີ່ມຂະໜາດຂອງຂໍ້ມູນ ແຕ່ ຄ່າຂອງການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ແມ່ນມີການປ່ຽນແປງພຽງເລັກນ້ອຍເທົ່ານັ້ນ (ຢູ່ລະຫວ່າງ 0.47% ຫາ 1.87% ຕໍ່າກວ່າກໍລະນີ upload, ສໍາລັບ CPU ແລະ ລະຫວ່າງ 10.48% ຫາ 13.41% ສໍາລັບ RAM) ແລະ ນໍາໃຊ້ໜ້ອຍຫຼາຍ ແລະ ເກືອບຈະຄືງທີ່ ແລະ ສະໜໍາສະເໜີ ເຮັດໃຫ້ມີຄວາມສະຖຽນພຽງພໍສໍາລັບການ upload ໃນກໍລະນີ.

ຕາຕະລາງ 4.5 ບັນທຶກຂໍ້ມູນ CPU&RAM ກໍລະນີ Upload ຂອງ ZT

ຕາຕະລາງ 4.6 ບັນທຶກຂໍ້ມູນ CPU and Memory ກໍລະນີ Download ຂອງ ZT

	Elapsed time (second)	Performance Metrics	
		AV CPU (%)	AV Memory (%)
1M ZT Download	22	1.87	11.26
100M ZT Download	1460	0.55	13.3
500M ZT Download	3635	0.48	10.86
1000M ZT Download	6401	0.7	13.16
2000M ZT Download	14837	0.47	13.41
3G ZT Download	16819	1.74	10.48
5G ZT Download	36135	1.01	11.95

ຮູບ 4.6 ປຽບທຽບ CPU&RAM ກໍລະນີ download ຂອງ ZT



5. ອະພິປາຍຜົນ

ຜົນການຄົ້ນຄວ້າວິໄຈນີ້ສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ: ລະບົບ ZT ໂດຍລວມມີຄ່າ RTT, Delay ຕໍ່າກວ່າ CF ສ່ວນໃຫຍ່, ເຮັດໃຫ້ມີການຕອບສະໜອງທີ່ໄວກວ່າ, ແຕ່ຍັງມີບາງກໍລະນີ (ເຊັ່ນ: ການອັບໂຫຼດ 500MB) ທີ່ CF ມີ Delay ຕໍ່າກວ່າ. ສ່ວນບົດວິໄຈທີ່ກ່ຽວຂ້ອງນັ້ນ.

ບົດຄົ້ນຄວ້າວິໄຈນີ້ມີຄວາມສໍາຄັນເພາະໄດ້ໃຫ້ຂໍ້ມູນທີ່ເປັນປະໂຫຍດໃນການປຸງປະສິດທິພາບຂອງສອງລະບົບທີ່ໃຊ້ງານຕົວຈິງ. ຜົນທີ່ໄດ້ຮັບແມ່ນສອດຄ່ອງກັບແນວຄິດຫຼັກຂອງບົດວິໄຈທີ່ກ່ຽວຂ້ອງ, ຊຶ່ງສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າປະສິດທິພາບຂອງລະບົບ VPN ແຕກຕ່າງກັນໄປຕາມໂປໂຕຄອນ ແລະ ສະພາບແວດລ້ອມການນໍາໃຊ້.

6. ສະຫຼຸບຜົນ

ຜົນຈາກການສຶກສາໃນການທົດລອງປຸງປະສິດທິພາບລະຫວ່າງ ZeroTier ແລະ Cloudflare ຄັ້ງນີ້ ສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ ZeroTier ມີປະສິດທິພາບດີກວ່າ Cloudflare ໃນດ້ານການຕອບສະໜອງຂອງເວລາການເດີນທາງໄປກັບ (Round Time Trip) ເກືອບ 3 ເທົ່າຕົວ. ສ່ວນຂອງຄ່າ delay time ຫຼື ອັດຕາຄວາມໄວຂອງການສົ່ງຂໍ້ມູນ (Data Rate Transmission:

9. ເອກະສານອ້າງອີງ

Adahman, Z., Malik, A. W., & Anwar, Z. (2022). An analysis of zero-trust architecture and its cost-effectiveness for organizational security. *Computers & Security*, 122, 102911. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102911>

Ahmadi, S. (2024). Zero trust architecture in cloud networks: Application, challenges and future opportunities.

Ahmadi, S.(2024). Zero Trust Architecture in Cloud Networks: Application, Challenges and Future Opportunities. Journal of Engineering Research and Reports, 26(2), 215–228.

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4725283

DRT) ໃນເວລາ upload/download ຂໍ້ມູນນັ້ນ ZeroTier ມີຄ່າ delay time ຕໍ່າກວ່າ ແລະ ຄ່າ DRT ສູງກວ່າ ຂອງ Cloudflare. ແລະ ສ່ວນໃນດ້ານການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ຂອງ Cloudflare ແລະ ZeroTier ແມ່ນມີປະສິດທິພາບໃກ້ຄຽງກັນໃນເວລາທໍາການ download, ແຕ່ໃນຄະນະທໍາການ upload Cloudflare ມີການໃຊ້ຊັບພະຍາກອນ CPU ແລະ RAM ຕໍ່າກວ່າຂອງ ZeroTier. ແນວດກໍຕາມເຖິງວ່າປະສິດທິພາບການທໍາງານໂດຍລວມ ຂອງ ZT tunnel ຈະດີກວ່າ CF WARP ແຕ່ກໍບໍ່ໄດ້ເຖິງກັບດີກວ່າຈົນເຮັດໃຫ້ເຫັນເຖິງຄວາມແຕກຕ່າງຫຼາຍ.

7. ຂໍ້ສະເໜີແນະ

ຢ່າງໃດກໍຕາມ, ສິ່ງສໍາຄັນທີ່ຕ້ອງໄດ້ເອົາໃຈໃສ່ ແລະ ສັງເກດຕໍ່ມັນກໍຄື: ໃນການສຶກສາທົດລອງຄັ້ງນີ້ ທັງລະບົບ ZeroTier ແລະ Cloudflare ອາດມີຫຼາຍປັດໃຈອື່ນພາຍນອກທີ່ອາດຈະມີຜົນຕໍ່ການທົດລອງເປັນຕົ້ນແມ່ນ ສະພາບຂອງເຄືອຂ່າຍອິນເຕີເນັດ, ສະຖານທີ່ຕັ້ງ ຂອງເຄື່ອງເຮັດການທົດລອງ ແລະ ອັດຕາຄວາມໄວອິນເຕີເນັດທີ່ນໍາໃຊ້ເຂົ້າໃນການຮັບສົ່ງຂໍ້ມູນທີ່ແຕກຕ່າງກັນໃນຂະນະທົດລອງ, ສະນັ້ນ ຜູ້ຄົນຄ້ວາ ຈຶ່ງຂໍແນະນໍາໃຫ້ມີການທົດລອງໃນກໍລະນີທີ່ແຕກຕ່າງຈາກການທົດລອງຂອງສະພາບແວດລ້ອມຄັ້ງນີ້ເພີ່ມເຕີມຕື່ມ ເພື່ອ ພິຈາລະນາປະກອບເຂົ້າໃນການຕັດສິນໃຈໄດ້ຢ່າງຖືກຕ້ອງ ແລະ ຊັດເຈນຂຶ້ນຕື່ມ.

8. ຂໍ້ຈຳກັດຂອງການຄົ້ນຄວ້າ

ລະຫວ່າງທໍາການຄົ້ນຄວ້າທົດລອງພົບພໍ້ຂໍ້ຈຳກັດຫຼາຍດ້ານ ບໍ່ວ່າຈະເປັນ ຂໍ້ຈຳກັດຂອງຊັບພະຍາກອນ ແລະ ລະບົບອຸປະກອນເຕັກນິກທີ່ນໍາໃຊ້ເຂົ້າໃນການເຮັດທົດລອງ, ວັດແທກຜົນ, ສັນຍານອິນເຕີເນັດບໍ່ສະຖຽນ ແລະ ຈຳກັດຄວາມໄວ ເຮັດໃຫ້ການທົດລອງ ມີຂໍ້ຈຳກັດທາງດ້ານການຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນຂະໜາດໃຫຍ່, ເວລາເຮັດການທົດລອງເກີດມີບັນຫາຂໍ້ຜິດພາດຫຼາຍຄັ້ງ ແລະ ຕ້ອງໄດ້ເຮັດການທົດລອງຊໍ້າຄືນຫຼາຍຄັ້ງ ເນື່ອງຈາກວ່າການຮັບ-ສົ່ງຂໍ້ມູນບໍ່ສໍາເລັດ ສາຍເຫດເກີດຈາກຄວາມບໍ່ສະຖຽນ ແລະ ຂໍ້ຈຳກັດທາງດ້ານລະບົບເຄືອຂ່າຍ.

- Can_ZTNA_Replace_Your_VPN_Whitepaper.pdf*. (n.d.). Retrieved September 20, 2025, from https://cf-assets.www.cloudflare.com/slt3lc6tev37/IcpGyTHplQhOeB60k1Egp/9743767b6f9156f63af04543377685c8/Can_ZTNA_Replace_Your_VPN_Whitepaper.pdf?_gl=1*1hcwwpt*_gcl_au*MjA1NTgwNDMxLjE3MjA0NDcxODk.*_ga*YjFIYjAwYTEtMTFmZC00NDRmLWJjMDQtMjlkNWM4MDE4ZjAy*_ga_SQCRB0TXZW*MTcyMjUwMzEyNy4xOC4xLjE3MjI1MDMyNzQuMC4wLjA.
- Connect private networks | Cloudflare Zero Trust docs*. (n.d.). Cloudflare Docs. Retrieved August 15, 2024, from <https://developers.cloudflare.com/cloudflare-one/connections/connect-networks/private-net/cloudflared/>
- Create a Network | ZeroTier Documentation*. (n.d.). Retrieved November 19, 2024, from <https://docs.zerotier.com/start>
- Get started*. (2025, August 20). Cloudflare Docs. <https://developers.cloudflare.com/warp-client/get-started/>
- Jaisudthi, P., Sridee, P. T., Phungkoed, N., Srisuk, K., & Phueaknumpol, V. (2025). Comparative Study of Modern VPN Solutions: Impact of Cloudflare, ZeroTier, and WireGuard on Network and Server Performance. *Engineering and Technology Horizons*, 42(2), 420203–420203. <https://doi.org/10.55003/ETH.420203>
- Mackey, S., Mihov, I., Nosenko, A., Vega, F., & Cheng, Y. (2020). A Performance Comparison of WireGuard and OpenVPN. *Proceedings of the Tenth ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*, 162–164. <https://doi.org/10.1145/3374664.3379532>
- MTC. (2021). *MPT-ວິໄສທັດ, ຍຸດທະສາດ ແລະ ແຜນພັດທະນາເສດຖະກິດດິຈິຕອນແຫ່ງຊາດ*. <https://mtc.gov.la/index.php?r=site%2Fdetail&id=1084>
- Osswald, L., Haeberle, M., & Menth, M. (2020). *Performance Comparison of VPN Solutions*. <https://doi.org/10.15496/publikation-41810>
- Rodriguez, A. (2025, January 22). ZeroTier | 5 Reasons to Move Away from a VPN Solution & to a Virtual Networking Platform. *ZeroTier*. <https://www.zerotier.com/blog/5-reasons-to-use-a-virtual-networking-platform-instead-of-vpn-solution/>
- Set up your first tunnel · Cloudflare Zero Trust docs*. (2024, January 11). Cloudflare Docs. <https://developers.cloudflare.com/cloudflare-one/connections/connect-networks/get-started/>
- Syed, N. F., Shah, S. W., Shaghaghi, A., Anwar, A., Baig, Z., & Doss, R. (2022). Zero Trust Architecture (ZTA): A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 10, 57143–57179. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174679>
- What is Zero Trust Network Access (ZTNA)?* (n.d.). Retrieved July 9, 2024, from <https://www.cloudflare.com/learning/access-management/what-is-ztna/>

Young, S. D. (n.d.). *M-22-09 MEMORANDUM FOR THE HEADS OF EXECUTIVE DEPARTMENTS AND AGENCIES.*

Zero Trust and BeyondCorp Google Cloud. (n.d.). Google Cloud Blog. Retrieved August 26, 2024, from

<https://cloud.google.com/blog/topics/developers-practitioners/zero-trust-and-beyondcorp-google-cloud>

ZeroTier. (2025, September 11). *What is ZeroTier? | ZeroTier Documentation.* <https://docs.zerotier.com/what/>

ZeroTier | Download. (n.d.). *ZeroTier.* Retrieved September 20, 2025, from <https://www.zerotier.com/download/>

ZTNA vs VPN: What's the Difference and Which Is Better? (n.d.). Retrieved September 20, 2025, from

<https://www.miniorange.com/blog/ztna-vs-vpn/>, <https://www.miniorange.com/blog/ztna-vs-vpn/>