Vol. 8 No.02 2026
E-ISSN: 2685-6921
Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen

Analisis dan Prediksi *Convergence Time* Protokol STP dan RSTP pada Topologi *Redundant Ring* Menggunakan *Machine Learning*

Fitriani Ramadhani[1*], Zidan Abdul Jabar Saka[1], Bambang Sugiantoro[1]

[1]*Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta, Indonesia*

fitrimachi2@gmail.com[*]

Received: 26/10/2026 | *Revised: 16/11/2026* | *Accepted: 20/11/2026*

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Redundansi jalur pada jaringan *Local Area Network* (LAN) berbasis *switch* meningkatkan ketersediaan, tetapi dapat menimbulkan *loop* jika tidak dikelola dengan baik. *Spanning Tree Protocol* (STP) dan pengembangannya, *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP), mencegah *loop* dengan memblokir salah satu jalur, sedangkan proses pemulihan setelah kegagalan tautan menentukan durasi gangguan layanan. Penelitian ini mengukur waktu pemulihan konektivitas *end-to-end* (*convergence time* terukur) pada topologi ring dengan lima switch dan dua host, serta mengeksplorasi penerapan *machine learning* untuk memprediksinya. Nilai yang diukur adalah lama ping PC-A ke PC-B terputus, bukan waktu konvergensi internal protokol, sehingga 0 detik berarti tidak ada gangguan pada pasangan *host* tersebut. Pengujian di Cisco Packet Tracer mencakup lima skenario kegagalan tautan (F1-F5), masing-masing diuji lima kali pada STP dan RSTP (total 50 sampel). Pada tiga skenario yang memutus jalur aktif antar *host* (F1, F3, F5), rata-rata waktu pemulihan STP adalah 52,0-58,0 detik dan RSTP 7,8-12,6 detik, atau turun 78%-86% (Mann-Whitney U = 225; $p < 0{,}001$; n = 15 per mode); pada F2 dan F4, yang tidak dilalui jalur antar *host*, kedua protokol menghasilkan 0 detik. Dengan validasi silang 5-fold, *Decision Tree* dan *Random Forest* menghasilkan R^2 0,974 (MAE 1,71 detik), dibandingkan *dengan Linear Regression* yang menghasilkan R^2 0,722 (MAE 11,71 detik). Namun, hasil ini sama dengan pembanding sederhana berupa rata-rata per kelompok skenario dan mode (R^2 0,974), sehingga analisis *machine learning* bersifat eksploratif dan belum menunjukkan keunggulan atas pembanding tersebut.

Kata kunci: STP, RSTP, convergence time, machine learning

Abstract

Path redundancy in switch-based Local Area Networks (LANs) increases availability, but can cause loops if left uncontrolled. The Spanning Tree Protocol (STP) and its successor, the Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), prevent loops by logically blocking one path, while the recovery process after a link failure determines the duration of the service outage. This study measured end-to-end connectivity recovery time (measured convergence time) on a ring topology of five

switches and two hosts, and explored machine learning to predict it. The measured value was the duration for which the PC-A to PC-B ping was interrupted, not the protocol's internal convergence time, so 0 seconds means no disruption for that host pair. Tests in Cisco Packet Tracer covered five link-failure scenarios (F1-F5), each run five times in STP and RSTP modes (50 samples). In the three scenarios that cut the active path between hosts (F1, F3, F5), mean STP recovery time was 52.0-58.0 seconds and RSTP 7.8-12.6 seconds, a reduction of 78%-86% (Mann-Whitney U = 225; p < 0.001; n = 15 per mode); in F2 and F4, which the host-to-host path does not traverse, both protocols produced 0 seconds. With 5-fold cross-validation, Decision Tree and Random Forest achieved R^2 0.974 (MAE 1.71 seconds), compared with Linear Regression's R^2 0.722 (MAE 11.71 seconds). However, these results equal a simple baseline of per-scenario-and-mode means (R^2 0.974), so the machine learning analysis is exploratory and has not shown an advantage over that baseline.

Keywords: STP, RSTP, convergence time, machine learning

Pendahuluan

Kebutuhan akan jaringan komputer yang andal dan selalu tersedia terus meningkat seiring bertambahnya ketergantungan organisasi terhadap layanan *digital* (Mauro et al., n.d. 2026 ; Zhang & Fan, 2025). Salah satu pendekatan umum adalah menyediakan jalur cadangan (redundansi) pada jaringan berbasis *switch*, disertai mekanisme pencegah *loop* yang memblokir satu atau lebih jalur secara logis sehingga hanya ada satu jalur aktif menuju *root bridge* pada satu waktu (Hamdani et al., n.d.; Rashid et al., 2024). Namun, jalur *redundant* yang tidak dikelola dengan tepat menimbulkan *broadcast storm* dan duplikasi *frame* akibat *loop* pada topologi Layer 2, yang dapat melumpuhkan seluruh segmen jaringan dalam hitungan detik (Cisco Systems, n.d.-b; Perlman, 1985). Di sisi lain, kecepatan pemulihan (*convergence time*) mekanisme pencegah *loop* berbeda-beda tergantung pada protokol dan posisi kegagalan tautan, sehingga administrator jaringan memerlukan pemahaman kuantitatif mengenai dampaknya terhadap *downtime* layanan (Khan et al., 2023; Papan et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah seberapa besar perbedaan *convergence time* antara STP dan RSTP pada berbagai posisi kegagalan tautan dalam topologi *redundant ring*, serta apakah karakteristik topologis tautan dapat digunakan untuk memprediksinya dengan *machine learning*. Penelitian ini bertujuan (1) membangun topologi *ring* lima *switch* dan mengukur waktu pemulihan konektivitas pada mode STP dan RSTP dengan lima posisi *link failure* (Tabel 1); (2) membandingkan kinerja kedua protokol berdasarkan data empiris dari hasil simulasi; dan (3) mengembangkan serta mengevaluasi model *machine learning* untuk memprediksi *convergence time* berdasarkan karakteristik topologis tautan yang gagal.

Penelitian terdahulu tentang STP dan RSTP berbeda dalam metode, variabel, dan objek yang diteliti, sehingga perlu dibandingkan secara kritis. (Alfian et al., 2023) membandingkan STP dan PVST pada topologi lima switch di Cisco Packet Tracer dengan variabel waktu konvergensi, penyeimbangan beban, dan kinerja jaringan secara keseluruhan, lalu menemukan bahwa PVST lebih cepat konvergen dan lebih baik dalam penyeimbangan beban, tetapi konfigurasinya lebih kompleks. Simulator dan jumlah switch-nya sama dengan penelitian ini, tetapi pembandingnya

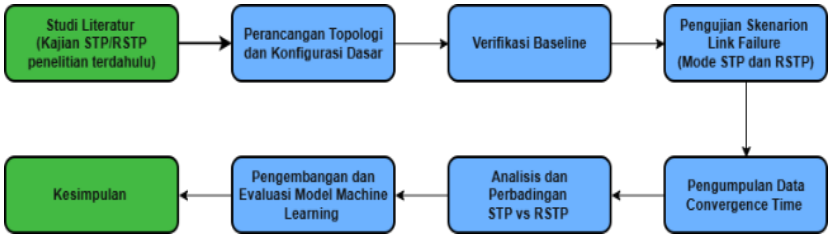
adalah PVST, bukan RSTP, sehingga hasilnya belum menunjukkan selisih kinerja antara STP dan RSTP. (Taufan et al., 2022) merancang topologi redundansi dengan RSTP pada switch dan router Mikrotik, lalu menilai pemulihan melalui ping setelah tautan diputus; pendekatan ini juga diadopsi dalam penelitian ini. Hasilnya menunjukkan RSTP efektif mencegah looping, tetapi penelitian tersebut hanya menguji RSTP pada perangkat Mikrotik sehingga tidak menyediakan pembanding dengan STP. Dari sisi metode analisis, Indrianingsih et al. (2021) menggunakan regresi linier sederhana untuk menganalisis dampak serangan BPDU dan pengambilalihan root bridge. Berbeda dengan penelitian ini, penelitian tersebut berfokus pada keamanan jaringan, bukan pada prediksi convergence time, dan hanya menggunakan satu model linear, sedangkan penelitian ini membandingkannya dengan model berbasis pohon.

Dengan demikian, penelitian terdahulu memiliki tiga keterbatasan yang menjadi dasar penelitian ini. Pertama, dari sisi metode, perbandingan dilakukan antara STP dan PVST atau hanya pada RSTP, dan penerapan machine learning masih berada di luar prediksi *convergence time*; tinjauan komparatif terbaru pun masih bersifat konseptual (Nasr & Ahmed, 2026; Tudoroiu, 2025). Kedua, dari sisi variabel, posisi tautan yang diputus tidak menjadi variabel utama dalam penelitian di atas, padahal tautan aktif, tautan blocking, dan tautan di luar jalur antar host dapat menghasilkan dampak yang berbeda. Ketiga, dari sisi objek, penelitian terdahulu menguji pasangan protokol atau perangkat yang berbeda (STP dengan PVST, serta RSTP pada Mikrotik), sehingga hasilnya tidak dapat langsung digunakan untuk membandingkan STP dan RSTP pada topologi yang sama. Sepengetahuan penulis, belum ada penelitian yang menggabungkan pengujian empiris convergence time STP dan RSTP pada berbagai posisi kegagalan tautan dengan eksplorasi menggunakan machine learning. Penelitian ini melanjutkan penelitian terdahulu dengan mengadopsi topologi lima switch (Alfian et al., 2023) dan pengukuran ping (Taufan et al., 2022), lalu memperluasnya dengan membandingkan STP dan RSTP secara langsung menggunakan konfigurasi yang seragam. Kontribusi penelitian ini adalah pengujian empiris terhadap lima skenario kegagalan yang dianalisis secara statistik, serta analisis eksploratif menggunakan machine learning untuk mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental kuantitatif, yaitu memberikan perlakuan tertentu pada objek penelitian dalam kondisi terkendali untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel yang diukur (Creswell & Creswell, 2018; Em, 2024). Perlakuan dilakukan dengan pemutusan tautan (link failure) pada lima posisi topologis dan dua mode protokol (STP dan RSTP), sedangkan variabel yang diukur adalah convergence time, yaitu waktu pemulihan konektivitas *end-to-end* antar *host* (Alfian et al., 2023; Taufan et al., 2022). Data berupa waktu dalam detik ini dianalisis secara statistik dan dimodelkan menggunakan *machine learning*.

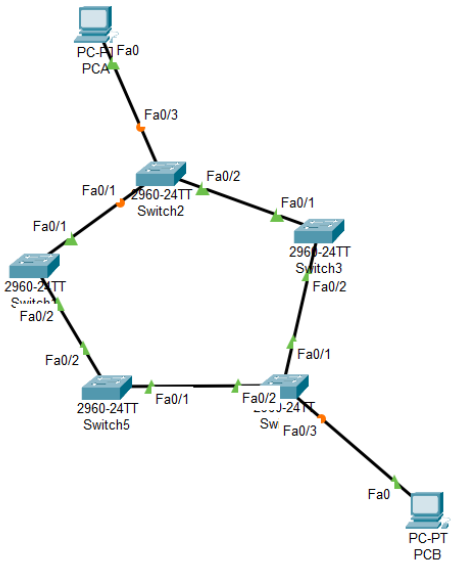
Tahapan penelitian digambarkan pada Gambar 1, dimulai dari studi literatur hingga penarikan kesimpulan.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Topologi dan Perangkat Penelitian

Penelitian ini menggunakan simulasi jaringan pada *Cisco Packet Tracer* (Alfian et al., 2023). Topologi berbentuk *ring redundant* dengan lima *switch Cisco Catalyst* 2960-24TT (SW1-SW5) yang membentuk lingkaran tertutup, serta dua PC sebagai *host*: PC-A pada SW2 dan PC-B pada SW4. SW1 dikonfigurasi sebagai *root bridge* dengan *priority* 4096 (*spanning-tree vlan* 1 *priority* 4096), sedangkan *switch* lain menggunakan *priority default* 32768. Kedua *host* diberi IP statis pada subnet yang sama (PC-A 192.168.1.10/24; PC-B 192.168.1.20/24) sehingga konektivitas *end-to-end* dapat diuji tanpa perlu *routing*. Gambar 2 menunjukkan topologi beserta posisi *root bridge*, *host*, dan satu-satunya port *alternate* (*blocking*).



Gambar 2. Topologi Jaringan Ring Redundant

Verifikasi dengan *show spanning-tree vlan* 1 menunjukkan satu titik *blocking* pada port Fa0/2 SW3 (*alternate port* menuju SW4). Jalur aktif terbagi menjadi dua cabang dari *root bridge*, yaitu SW1-SW2-SW3 dan SW1-SW5-SW4, dengan tautan SW3-SW4 berstatus *blocking* untuk menjaga topologi bebas *loop*.

Konsep Dasar Port dan Timer STP/RSTP

Root port adalah port berbiaya jalur terendah menuju *root bridge*, sedangkan *designated port* meneruskan trafik pada suatu segmen; pada STP port selain keduanya diblokir, sedangkan RSTP merinci peran tersebut menjadi *alternate port* dan *backup port* (IEEE, 2004; Nasr & Ahmed, 2026). Biaya jalur FastEthernet 100 Mbps adalah 19 (Cisco Systems, n.d.-c; IEEE, 1998).

Root bridge dipilih berdasarkan *Bridge ID* terendah (*priority* ditambah nomor VLAN), sehingga *priority* 4096 pada VLAN 1 tampil sebagai 4097.

Pada STP (IEEE 802.1D), port berpindah berurutan melalui status *blocking* (tidak meneruskan *frame* maupun mempelajari alamat MAC), *listening* (memproses BPDU), *learning* (mempelajari alamat MAC), dan *forwarding* (meneruskan *frame* secara normal). Perpindahan ini diatur oleh tiga *timer*: *Hello Time* (interval pengiriman BPDU; 2 detik), *Max Age* (batas validitas informasi BPDU sebelum topologi dihitung ulang; 20 detik), dan *Forward Delay* (lama port pada status *listening* dan *learning*; 15 detik) (Cisco Systems, n.d.-d; IEEE, 2004). Akibatnya, perpindahan dari *blocking* ke *forwarding* membutuhkan sekitar 30 detik (dua kali *Forward Delay*), atau 50 detik jika perubahan baru terdeteksi melalui kedaluwarsa BPDU (ditambah *Max Age*). Angka 30-50 detik ini menjadi dasar estimasi teoretis untuk *convergence time* STP. Akibatnya, port yang berpindah dari blocking ke forwarding membutuhkan sekitar 30 detik dan dua kali Forward Delay, bila perubahan terdeteksi secara tidak langsung melalui kedaluwarsa BPDU, ditambah Max Age sehingga menjadi 50 detik. Angka 30-50 detik inilah yang menjadi dasar estimasi teoretis convergence time STP (Cisco Systems, n.d.-d; IEEE, 2004).

RSTP (IEEE 802.1w) menyederhanakan status port menjadi tiga: *discarding* (gabungan *blocking* dan *listening*), *learning*, dan *forwarding*. Port dapat langsung berpindah ke *forwarding* tanpa menunggu *Forward Delay* melalui mekanisme *proposal-agreement*, yaitu satu sisi tautan mengirim *proposal* dan sisi lainnya menjawab dengan *agreement* setelah menyelaraskan port (Cisco Systems, n.d.-f; IEEE, 2004; Rashid et al., 2024). Pada perangkat Cisco, mode STP dalam penelitian ini diimplementasikan sebagai PVST (IEEE 802.1D per VLAN) dengan perintah *spanning-tree mode pvst* dan *rapid-pvst* (Cisco Systems, n.d.-a, n.d.-f).

Skenario Pengujian

Untuk mengukur *convergence time* pada berbagai kondisi kegagalan tautan, penelitian ini menetapkan lima skenario *link failure* yang mewakili posisi berbeda dalam topologi, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Skenario Pengujian *Link Failure*

Kode	Tautan yang Diputus	Karakteristik	Tujuan Pengujian
F1	SW1–SW2	Tautan aktif, dekat *root bridge*	Mengukur dampak kegagalan pada jalur utama dari *root*
F2	SW3–SW4	Tautan *blocking* (cadangan)	Mengukur dampak kegagalan pada jalur yang tidak dilalui trafik aktif
F3	SW4–SW5	Tautan aktif, dekat perangkat *edge*	Mengukur dampak kegagalan yang langsung memengaruhi host (PC-B)
F4	SW2–SW3	Tautan aktif cabang tidak dilalui trafik	Mengukur dampak kegagalan pada tautan aktif namun berada di luar jalur *forwarding* utama antar *host*
F5	SW5–SW1	Tautan aktif, dekat root, jalur utama	Mengukur dampak kegagalan pada tautan yang berada langsung di jalur *forwarding* utama antar *host*

Setiap skenario dijalankan dengan perintah *shutdown* pada *interface* terkait melalui *Command Line Interface* (CLI), lalu dilakukan *no shutdown* setelah pengukuran selesai dan topologi kembali stabil. Setiap skenario diuji pada STP dan RSTP yang dikonfigurasi secara seragam pada seluruh *switch*.

Parameter dan Instrumen Pengukuran

Parameter utama adalah waktu pemulihan konektivitas *end-to-end*, yaitu rentang waktu sejak tautan diputus hingga konektivitas PC-A dan PC-B kembali normal (*convergence time* terukur). Ukuran ini bukan waktu konvergensi internal protokol, melainkan lamanya gangguan yang dialami oleh satu pasangan *host*. Karena itu, nilai 0 detik pada F2 dan F4 berarti tidak ada gangguan konektivitas pada pasangan *host* ini; protokol tetap dapat melakukan rekonvergensi (misalnya SW3 pada F4 kehilangan *root port*-nya), tetapi perubahan itu tidak terlihat oleh *ping* PC-A ke PC-B. Pengukuran dilakukan dengan menjalankan *ping -t* 192.168.1.20 secara kontinu dari PC-A ke PC-B, lalu mencatat dengan *stopwatch* waktu sejak perintah *shutdown* dieksekusi hingga muncul *pesan "Reply" setelah "Request timed out"*; status port diverifikasi dengan perintah *show spanning-tree vlan* 1 sebelum dan sesudah pengujian. Setiap skenario diuji lima kali (P1-P5) pada setiap mode, sehingga diperoleh $5 \times 5 \times 2 = 50$ sampel. Karena pencatatan manual dan interval *ping* sekitar 1 detik, resolusi pengukuran sekitar ±1 detik, yang lebih berarti pada RSTP (5-14 detik) daripada STP (49-74 detik).

Metode Analisis Data

Data *convergence time* dianalisis secara deskriptif (rata-rata, simpangan baku/SD, minimum, dan maksimum) untuk setiap kombinasi skenario dan mode. Perbedaan antar kelompok diuji dengan dua uji non-parametrik berbasis peringkat, yaitu Mann-Whitney U untuk dua kelompok independen dan Kruskal-Wallis untuk lebih dari dua kelompok, sehingga tidak mensyaratkan data berdistribusi normal (Kruskal & Wallis, 1952; Mann & Whitney, 1947). Uji

lanjutan Mann-Whitney U berpasangan dengan koreksi Bonferroni (Dunn, 1961). Seluruh uji dijalankan menggunakan SciPy di Python (Virtanen et al., 2020).

Hasil dan Pembahasan

Verifikasi Topologi dan *Root Bridge*

SW1 berhasil ditetapkan sebagai *root bridge* (*Bridge ID Priority* 4096, tercatat 4097 pada *output* karena *sys-id-extension* VLAN 1), dan seluruh *switch* lain mengenali SW1 sebagai *root* berdasarkan kesesuaian *Root ID Address*. Tabel 2 merangkum kondisi *baseline* sebelum pengujian.

Tabel 2. *Baseline Root Path Cost* dan *Port Blocking*

Switch	Root Path Cost	Port Blocking	Keterangan
SW1	0	-	Root Brdige
SW2	19	-	Terhubung langsung ke SW1
SW5	19	-	Terhubung langsung ke SW1
SW3	38	Fa0/2 (Alternate/BLK)	Jalur cadangan menuju SW4
SW4	38	-	Jalur aktif melalui SW 5

Hasil Pengujian Convergence Time STP

Mode STP menggunakan standar IEEE 802.1D (*protocol ieee* pada *output* CLI). Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Convergence Time* Mode STP

Skenario	P1	P2	P3	P4	P5	Rata-rata
F1 (SW1-SW2)	52	56	50	52	50	52,0
F2 (SW3-SW4)	0	0	0	0	0	0
F3 (SW4-SW5)	56	56	53	55	53	54,6
F4 (SW2-SW3)	0	0	0	0	0	0
F5 (SW5-SW1)	74	56	56	49	55	58,0

Pada F1, F3, dan F5, *convergence time* berkisar 49-74 detik, sedikit lebih tinggi daripada estimasi teori STP klasik (30-50 detik) (Ali, 2025; Cisco Systems, n.d.-d; IEEE, 2004). Selisih ini diperkirakan akibat *overhead* pemrosesan simulator *Packet Tracer* dan pembulatan pengamatan manual menggunakan *stopwatch*, namun penyebabnya belum diuji. Sebaliknya, F2 dan F4 menghasilkan 0 detik pada seluruh percobaan, artinya pemutusan tautan *blocking* (F2) maupun tautan *forwarding* di luar jalur antar *host* (F4) tidak mengganggu pasangan PC-A dan PC-B,

meskipun dapat terjadi perubahan status port pada protokol (misalnya SW3 kehilangan root port-nya pada F4).

Convergence Time Mode RSTP

Setelah seluruh *switch* dikonfigurasi ulang dengan *spanning-tree mode rapid-pvst*, protokol aktif berubah menjadi RSTP (terverifikasi melalui *show spanning-tree vlan* 1) tanpa mengubah jalur *forwarding* maupun status *port blocking*. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. *Convergence Time* Mode RSTP

Skenario	P1	P2	P3	P4	P5	Rata-rata
F1 (SW1-SW2)	6	10	11	9	10	9,2
F2 (SW3-SW4)	0	0	0	0	0	0
F3 (SW4-SW5)	11	5	6	8	9	7,8
F4 (SW2-SW3)	0	0	0	0	0	0
F5 (SW5-SW1)	13	14	13	12	11	12,6

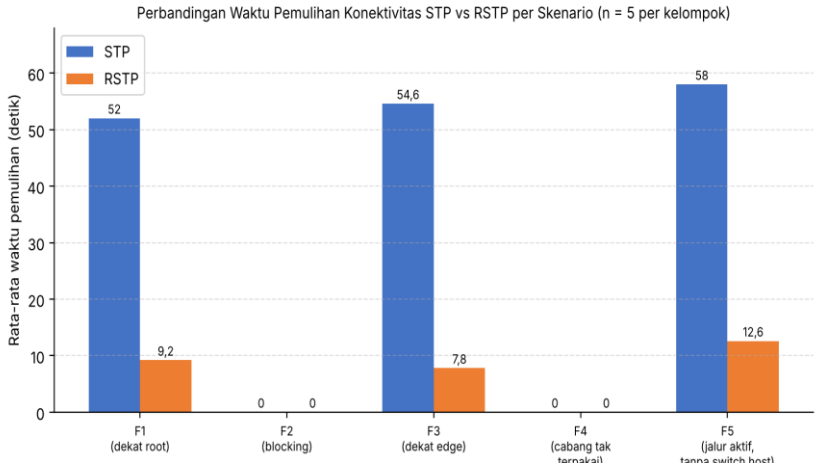
Pada skenario dengan tautan aktif (F1, F3, F5), RSTP menurunkan *convergence time* secara signifikan, dengan rata-rata 7,8-12,6 detik. Percepatan ini sejalan dengan teori bahwa mekanisme *proposal-agreement* RSTP memungkinkan *port* berpindah ke *forwarding* tanpa menunggu *Forward Delay* seperti pada STP klasik (Rashid et al., 2024). Skenario F4 pada RSTP konsisten menghasilkan 0 detik, sedangkan F5 tetap menunjukkan *downtime* terukur (rata-rata 12,6 detik), diduga karena F4 berada di luar jalur trafik antar *host* sedangkan F5 tepat pada jalur *forwarding* utama sehingga memerlukan pengalihan jalur.

Perbandingan dan Analisis STP vs RSTP

Perbandingan menyeluruh antara *convergence time* mode STP dan RSTP pada kelima skenario disajikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan pada Gambar 3.

Tabel 5. Rata-rata Convergence Time STP vs RSTP

Skenario	STP (rata-rata)	RSTP (rata-rata)	Penurunan Waktu
F1 (dekat root)	52,0 detik	9,2 detik	82%
F2 (blocking)	0 detik	0 detik	-
F3 (dekat edge)	54,6 detik	7,8 detik	86%
F4 (cabang tidak terpakai)	0 detik	0 detik	-
F5 (jalur aktif)	58,0 detik	12,6 detik	78%



Gambar 3. Grafik Perbandingan STP vs RSTP

Tabel 6. Statistik Deskriptif Per Skenario dan Mode

Skenario	Mode	n	Rata-rata (detik)	SD (detik)	Min-Maks (detik)
F1	STP	5	52,0	2,45	50-56
F1	RSTP	5	9,2	1,92	6-11
F2	STP	5	0	0	0-0
F2	RSTP	5	0	0	0-0
F3	STP	5	54,6	1,52	53-56
F3	RSTP	5	7,8	2,39	5-11
F4	STP	5	0	0	0-0
F4	RSTP	5	0	0	0-0
F5	STP	5	58,0	9,41	49-74
F5	RSTP	5	12,6	1,14	11-14

Perbedaan *convergence time* STP dan RSTP diuji dengan Mann-Whitney U pada data gabungan skenario berjalur aktif (F1, F3, F5); F2 dan F4 tidak diikutkan karena nilainya konstan 0 detik pada kedua mode. *Convergence time* STP (n = 15; rata-rata 54,9 detik) secara signifikan lebih besar daripada RSTP (n = 15; rata-rata 9,9 detik), dengan U = 225 dan $p < 0{,}001$. Nilai U sama dengan $n_1 \times n_2$, artinya seluruh pengamatan STP lebih besar daripada seluruh pengamatan RSTP tanpa tumpang tindih.

Uji Kruskal-Wallis terhadap F1, F3, dan F5 pada mode STP tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan ($H = 3{,}12$; $p = 0{,}210$), meskipun rata-rata F5 (58,0 detik) secara numerik lebih tinggi daripada F1 (52,0 detik) dan F3 (54,6 detik). Sebaliknya, pada mode RSTP terdapat perbedaan signifikan antarskenario ($H = 9{,}27$; $p = 0{,}010$), dengan F5 (12,6 detik; rentang 11-14 detik) lebih tinggi daripada F1 (9,2 detik) dan F3 (7,8 detik).

Berdasarkan Tabel 5, Tabel 6, dan Gambar 3, pada skenario dengan tautan di jalur *forwarding* aktif (F1, F3, F5), RSTP secara konsisten menurunkan *convergence time* sebesar 78%-86% dibandingkan STP, dan perbedaan ini signifikan secara statistik (Mann-Whitney U; $p < 0,001$). Skenario F2 dan F4 tidak menimbulkan gangguan terukur pada kedua protokol, sehingga faktor penentu adanya gangguan bagi pasangan host bukanlah status fisik tautan (F4 berstatus forwarding), melainkan apakah tautan tersebut berada pada jalur *forwarding* utama antara kedua *host*.

Secara mekanisme, F1, F3, dan F5 sama-sama memutus satu-satunya jalur aktif pada cabangnya menuju *root bridge* dan memaksa port Fa0/2 SW3 berpindah dari *blocking* ke *forwarding*, sehingga mekanisme ini tidak menjelaskan mengapa F5 berbeda dari F1 dan F3 pada RSTP. Pada STP, rata-rata F5 yang lebih tinggi (58,0 detik) lebih sesuai dijelaskan oleh variasi pengukuran yang besar (SD = 9,41 detik) akibat satu nilai sebesar 74 detik. Pada RSTP, uji berpasangan dengan koreksi Bonferroni menunjukkan bahwa F5 berbeda dari F1 (selisih 3,4 detik; $p = 0,046$) dan F3 (selisih 4,8 detik; $p = 0,047$), sedangkan F1 dan F3 tidak berbeda. Perbedaan ini tidak dapat dijelaskan oleh jarak tautan terhadap *port blocking*, karena F1 dan F5 sama-sama berjarak dua tautan dari tautan SW3-SW4. Salah satu dugaan adalah bahwa F5 merupakan satu-satunya skenario yang tautannya tidak bersinggungan dengan *switch* tempat *host* terhubung (SW2 dan SW4), sehingga kedua *switch* baru mengetahui perubahan topologi secara tidak langsung melalui BPDU dan *topology change*, yang secara teori memerlukan waktu lebih lama daripada kegagalan yang terdeteksi secara langsung (Cisco Systems, n.d.-f; IEEE, 2004; Tudoroiu, 2025). Dugaan ini sejalan dengan besaran selisih (sekitar dua kali *Hello Time default*; IEEE, 2004), tetapi belum diuji; mengingat selisih hanya 3-5 detik pada pengukuran manual dengan $n = 5$ per kelompok, temuan ini masih bersifat awal.

Secara keseluruhan, hasil ini konsisten dengan kajian sebelumnya bahwa RSTP dirancang untuk mengatasi lambatnya pemulihan STP tanpa mengorbankan pencegahan *loop* (Tudoroiu, 2025).

Eksperimen Prediksi Convergence Time Menggunakan Machine Learning

Sebagai analisis eksploratif tambahan, dikembangkan model *machine learning* untuk memprediksi *convergence time* berdasarkan karakteristik tautan yang gagal (Su, 2024). Seluruh 50 data (Tabel 3 dan Tabel 4) digunakan sebagai dataset dengan tiga fitur, yaitu mode protokol (STP/RSTP), status jalur aktif (*on-path*, yakni apakah tautan berada pada jalur *forwarding* utama antar *host*), dan posisi skenario (F1-F5), serta satu keluaran berupa *convergence time* dalam detik. Dibandingkan dengan tiga model regresi, yaitu Linear Regression, Decision Tree Regression (max_depth = 4; Breiman et al., 1984), dan Random Forest Regressor (100 pohon, max_depth = 4; Breiman, 2001) menggunakan pustaka scikit-learn (Pedregosa et al., 2011), serta pembanding sederhana berupa rata-rata per kombinasi skenario dan mode. Model berbasis pohon dipilih karena mampu menangkap hubungan *nonlinier* (Hastie et al., 2009; Malekzadeh, 2023).

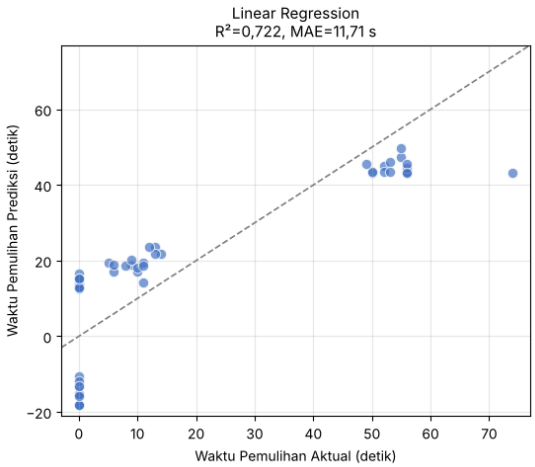
Evaluasi menggunakan validasi silang 5-fold: dataset dibagi menjadi lima bagian secara acak (shuffle, random_state = 42), empat bagian untuk melatih dan satu untuk menguji, lalu proses diulang lima kali sehingga setiap data pernah menjadi data uji. Dengan $n = 50$, setiap lipatan berisi 10 sampel (Abedin et al., 2026; Hastie et al., 2009; James, 2024; Kohavi, 1995). Karena pengulangan skenario yang sama dapat terdapat pada data latih maupun data uji, dilakukan juga

validasi leave-one-scenario-out, yaitu seluruh data dari satu skenario ditahan sebagai data uji (Roberts et al., 2017). Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 7.

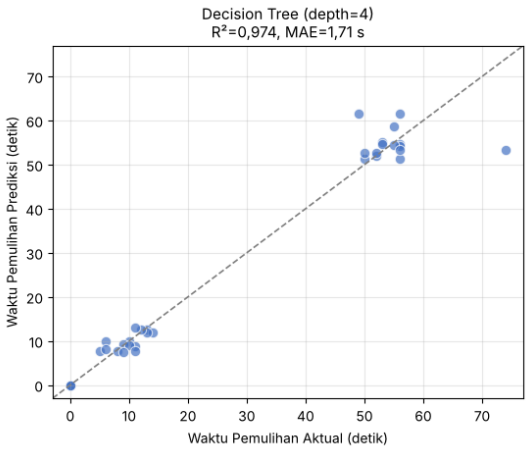
Tabel 7. Hasil Evaluasi Model Prediksi

Model	MAE (detik)	RMSE (detik)	R^2
Linear Regression	11,71	12,56	0,722
Decision Tree (depth=4)	1,71	3,85	0,974
Random Forest (100 pohon)	1,71	3,81	0,974
Rata-rata per kelompok	1,71	3,85	0,974

Tabel 7 membandingkan model berdasarkan MAE dan RMSE (rata-rata selisih antara prediksi dan nilai aktual, dalam detik) serta R2 (proporsi variasi waktu pemulihan yang dijelaskan oleh model, skala 0-1) (Hastie et al., 2009; Willmott & Matsuura, 2005). *Decision Tree* dan *Random Forest* unggul dibandingkan *Linear Regression* pada ketiga metrik, dengan selisih R^2 lebih dari 0,2 dan MAE yang jauh lebih rendah. Namun, keduanya hampir identik (selisih R^2 di bawah 0,001) dan sebanding dengan pembanding rata-rata per kelompok (R^2 0,974; MAE 1,71 detik), sehingga model berbasis pohon tidak memberikan keunggulan pada data ini. Pada validasi *leave-one-scenario-out*, *Decision Tree* menghasilkan R^2 0,976, MAE 2,04 detik, dan RMSE 3,72 detik, meskipun hasil ini masih dipengaruhi oleh skenario lain dengan status on-path yang sama. Gambar 4 hingga 6 menyajikan nilai prediksi dibandingkan dengan nilai aktual untuk setiap model.

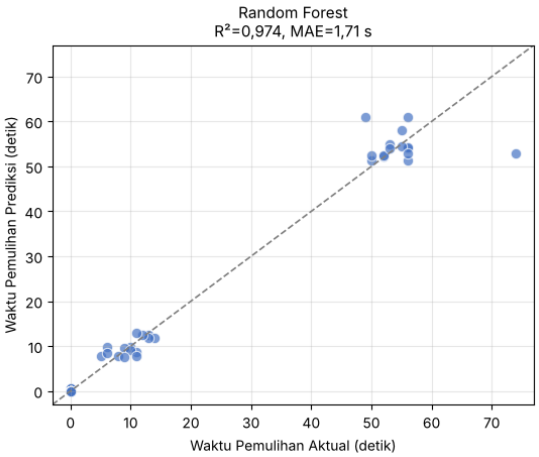


Gambar 4. *Convergence Time Linear Regression*



Gambar 5. *Convergance Time Decision Tree*

Decision Tree (R^2 0,974; MAE 1,71 detik; RMSE 3,85 detik) menghasilkan titik prediksi yang mengelompok rapat di sepanjang garis diagonal (Gambar 5), termasuk pada nilai 0 detik yang menjadi kelemahan utama *Linear Regression* (Gambar 4), karena pembagian berbasis aturan lebih sesuai untuk pola data yang kategorikal dan *non-linear*.



Gambar 6. *Convergence Time Random Forest*

Random Forest (R^2 0,974; MAE 1,71 detik; RMSE 3,81 detik; Gambar 6) tidak lebih baik secara signifikan daripada *Decision Tree*; keunggulan teoretisnya yang lebih tahan terhadap data anomali tidak terlihat pada dataset ini.

Lonjakan akurasi dari model *linear* ke model berbasis pohon menunjukkan bahwa hubungan antara variabel topologis dan waktu pemulihan lebih sesuai dimodelkan secara *non-linear*, meskipun akurasi tinggi ini sebagian mencerminkan struktur skenario pengujian, karena status jalur aktif sudah menentukan apakah gangguan terjadi atau tidak.

Analisis *feature importance* model *Random Forest* (Breiman, 2001; Louppe et al., 2013) menunjukkan bahwa mode protokol berkontribusi terbesar (53,1%), diikuti oleh status jalur aktif (46,2%), sedangkan skenario hanya berkontribusi 0,7%. Artinya, waktu pemulihan terutama ditentukan oleh protokol yang digunakan dan apakah tautan yang gagal berada pada jalur *forwarding* aktif, bukan oleh posisi spesifiknya. Nilai ini berbasis penurunan *impurity* pada data kecil dengan variabel *on-path* dan posisi skenario yang saling berkaitan, sehingga hanya digunakan sebagai indikasi.

Hasil perlu ditafsirkan secara hati-hati. Pertama, data berasal dari satu topologi ring dengan lima switch dan lima pengulangan per skenario, sehingga model belum tentu dapat digeneralisasi ke topologi lain. Kedua, validasi silang 5-fold dilakukan secara acak pada data yang memuat pengulangan skenario yang sama, sehingga R^2 cenderung lebih optimis daripada kemampuan model pada skenario yang benar-benar baru. Ketiga, status *on-path* sudah menentukan ada atau tidaknya gangguan, sehingga akurasi yang tinggi mencerminkan struktur skenario, bukan pola yang ditemukan oleh model. Model ini lebih tepat dipandang sebagai studi awal; penelitian lanjutan disarankan menggunakan topologi yang lebih beragam, pengulangan yang lebih banyak, dan validasi per skenario.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa, pertama, pada tiga skenario yang memutus jalur aktif antar *host* (F1, F3, F5), waktu pemulihan RSTP rata-rata 7,8-12,6 detik, lebih singkat daripada STP (52,0-58,0 detik), atau turun 78%-86%, dan perbedaan ini signifikan secara statistik (Mann-Whitney U = 225; $p < 0,001$; n = 15 per mode). Kedua, F2 dan

F4 menghasilkan 0 detik pada kedua protokol, yang berarti tidak ditemukan gangguan konektivitas pada pasangan host PC-A dan PC-B selama pengamatan. Hal ini tidak berarti protokol tidak mengalami perubahan status jaringan; adanya gangguan ditentukan oleh apakah tautan berada pada jalur forwarding antar host, bukan oleh status fisik tautan. Ketiga, pada RSTP, skenario F5 sedikit lebih lama daripada F1 dan F3 (selisih 3,4 dan 4,8 detik; $p = 0{,}046$ dan 0,047), sedangkan pada STP perbedaannya tidak signifikan ($p = 0{,}210$); selisih pada RSTP ini bersifat awal dan penyebabnya belum diuji. Keempat, *Decision Tree* dan *Random Forest* memprediksi waktu pemulihan dengan R^2 0,974 pada validasi silang 5-fold (*Linear Regression* 0,722), namun hasil ini sejalan dengan pembanding rata-rata per kelompok sehingga belum menunjukkan keunggulan model; mode protokol dan status jalur aktif menjadi fitur yang paling berpengaruh. Seluruh hasil ini bersifat awal karena berasal dari satu topologi.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperbanyak pengulangan percobaan, menggunakan simulator berbasis IOS asli seperti GNS3 atau EVE-NG (Harahus et al., 2023) agar akurasi *timer* lebih presisi daripada *Cisco Packet Tracer*, mengeksplorasi topologi dengan lebih banyak *switch* atau topologi *mesh*, serta membandingkan RSTP dengan protokol lain seperti *Multiple Spanning Tree Protocol* (MSTP) (Cisco Systems, n.d.-e; IEEE, 2002).

Daftar Pustaka

Abedin, T., Xu, H., & Uddin, S. (2026). *The impact of K selection in K - fold cross-validation on bias and variance in supervised learning models*. 1–13.

Alfian, T., Sandi, A., Anwar, R. S., & Fauzi, A. (2023). *Analisis Performa Redundancy Link Menggunakan Metode Spanning Tree Protocol Dan Per VLAN Spanning Tree*. *5*(1), 47–52.

Ali, M. H. (2025). *Dynamic Fast Convergence Improvement using Predictive Network Analysis*. *17*(1), 1–19.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth.

Cisco Systems. (n.d.-a). *Spanning tree from PVST+ to Rapid-PVST migration configuration example*. https://www3-realm.cisco.com/en/US/products/hw/switches/ps708/products_configuration_example09186a00807b0670.shtml

Cisco Systems. (n.d.-b). *Troubleshoot STP problems & related design considerations*. https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/10556-16.html

Cisco Systems. (n.d.-c). *Understand and configure Spanning Tree Protocol (STP) on Catalyst switches*. https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/5234-5.html

Cisco Systems. (n.d.-d). *Understand and tune Spanning Tree Protocol timers*. https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/19120-122.html

Cisco Systems. (n.d.-e). *Understand Multiple Spanning Tree Protocol (802.1s)*. https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/24248-147.html

Cisco Systems. (n.d.-f). *Understand Rapid Spanning Tree Protocol (802.1w)*. https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/24062-146.html

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.

Dunn, O. J. (1961). Multiple comparisons among means. *Journal of the American Statistical Association, 56*(293), 52–64. https://doi.org/10.1080/01621459.1961.10482090

Em, S. (2024). *Exploring Experimental Research : Methodologies , Designs , and Applications Across Disciplines*. *March*, 1–9.

Hamdani, M., Irawan, D., Kusuma, A. A. N. A., Agastani, T., & Iqbal, M. (n.d.). Preliminary Assessment of Using Spanning Tree Open Protocols in INA-CBT Communication System. In *The 2022 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2022), November 22â•fi23, 2022, Virtual Event, Indonesia* (Vol. 1, Issue 1). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3575882.3575884

Harahus, M., Čavojský, M., Bugár, G., & Pleva, M. (2023). Interactive network learning: An assessment of EVE-NG platform in educational settings. *Acta Electrotechnica et Informatica, 23*(3), 3–9. https://doi.org/10.2478/aei-2023-0011

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7

IEEE. (1998). *Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Common specifications—Part 3: Media access control (MAC) bridges* (ANSI/IEEE Std 802.1D, 1998 ed.). IEEE.

IEEE. (2002). *IEEE standard for local and metropolitan area networks—Virtual bridged local area networks—Amendment 3: Multiple spanning trees* (IEEE Std 802.1s-2002). IEEE.

IEEE. (2004). *IEEE standard for local and metropolitan area networks: Media access control (MAC) bridges* (IEEE Std 802.1D-2004). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.94569

Indrianingsih, Y., Wintolo, H., & Saputri, E. Y. (2021). *Spanning Tree Protocol (STP) Based Computer Network Performance Analysis on BPDU Config Attacks and Take Over Root Bridge Using the Linear Regression Method*. *6*(2), 155–162. https://doi.org/10.15575/join.v6i2.703

James, G. (2024). *Sciences Analysis of support vector machine and random forest models for predicting the scalability of a broadband network*. *6*, 1–10.

Khan, N., Koubaa, A., Khan, Z., Khurram, M., & Ali, I. (2023). Data plane failure and its recovery techniques in SDN : A systematic literature review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, *35*(3), 176–201. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.02.001

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)* (Vol. 2, pp. 1137–1143). Morgan Kaufmann.

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, *47*(260), 583–621. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441

Louppe, G., Wehenkel, L., Sutera, A., & Geurts, P. (2013). Understanding variable importances in forests of randomized trees. In *Advances in Neural Information Processing Systems 26* (pp. 431–439). Curran Associates.

Malekzadeh, M. (2023). Performance prediction and enhancement of 5G networks based on linear regression machine learning. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. https://doi.org/10.1186/s13638-023-02282-z

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, *18*(1), 50–60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

Mauro, M. Di, Cerroni, W., Postiglione, F., Tornatore, M., & Trivedi, K. S. (2026). *Reliability and Availability in Virtualized Networks : A Survey on Standards , Modeling Approaches , and Research Challenges*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 28, 5121–5158.

Nasr, A., & Ahmed, N. A. S. (2026). ةينقتلاو مولعلل دنارلا ةلجم Comparative Review of STP , RSTP , and PVST Protocols : Loop Prevention in Layer 2 Networks (1)3 .ةينقتلاو مولعلل دنارلا ةلجم, 104–120.

Papan, J., Chovanec, T., Bridova, I., & Kvet, M. (2024). THE NEW LABEL BIT REPAIR FAST REROUTE MECHANISM. *IEEE Access*, *PP*, 1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3379150

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825–2830.

Perlman, R. (1985). An algorithm for distributed computation of a spanning tree in an extended LAN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, *15*(4), 44–53. https://doi.org/10.1145/318951.319004

Rashid, R. A., Abd, D. F., Othman, D. A., & Abdulqader, H. (2024). *Performance Evaluation using Spanning Tree Protocol , Rapid Spanning Tree Protocol , Per-VLAN Spanning Tree , and Multiple Spanning Tree*. *8*(1). https://doi.org/10.21928/uhdjst.v8n1y2024.pp20-30

Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., Hauenstein, S., Lahoz-Monfort, J. J., Schröder, B., Thuiller, W., Warton, D. I., Wintle, B. A., Hartig, F., & Dormann, C. F. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, *40*(8), 913–929. https://doi.org/10.1111/ecog.02881

Su, J. (2024). ScienceDirect Construction of a Computer Network Performance Prediction Optimization Model Based on Machine Learning Algorithms. *Procedia Computer Science*, *243*, 364–371. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.045

Taufan, M., Zaen, A., & Tantoni, A. (2022). *Topologi Redundansi Link Untuk Keamanan Serta Mitigasi Ketersediaan Jaringan Komputer Menggunakan Rapid Spanning Tree Protocol*. *4*(1), 88–100. https://doi.org/10.47065/josyc.v4i1.2336

Tudoroiu, A. (2025). *EVOLUTION OF SPANNING TREE PROTOCOL : FROM STP TO SPB AND TRILL – A COMPARATIVE ANALYSIS*. 30–35. https://doi.org/10.2478/sbeef-2025-0018

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., . . . SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, *17*(3), 261–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, *30*(1), 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Zhang, R., & Fan, L. (2025). *Research on Self-Diagnosis and Self-Healing Technologies for Intelligent Fiber Optic Sensing Networks*. 1–15.