

## Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan

Fauzan Prasetyo Eka Putra<sup>1</sup>, Suhdi<sup>2</sup>, Ahmad Ramadhani<sup>3</sup>, Marzuq<sup>4</sup>

Fakultas Teknik, Program Studi Informatika  
Universitas Madura  
prasetyo@unira.ac.id

### Abstrak

Kemajuan teknologi komunikasi yang cepat menuntut sistem jaringan yang lebih cepat, lebih andal, dan aman. Jaringan tradisional berbasis tembaga tidak lagi memadai, yang mengarah pada adopsi serat optik secara luas untuk transmisi berkecepatan tinggi dan latensi rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis evolusi jaringan masa depan, dengan fokus pada transisi dari serat optik ke potensi komunikasi kuantum. Dengan menggunakan tinjauan literatur kualitatif dan simulasi terbatas, penelitian ini mengeksplorasi kekuatan dan keterbatasan kedua teknologi tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa serat optik tetap lebih unggul dalam hal stabilitas dan jangkauan, sementara komunikasi kuantum—melalui prinsip-prinsip seperti keterikatan dan Quantum Key Distribution (QKD)—menawarkan keamanan yang tak tertandingi. Integrasi kedua sistem ini muncul sebagai model hibrida yang menjanjikan. Kesimpulannya, fiber akan terus berfungsi sebagai tulang punggung dalam waktu dekat, tetapi jaringan kuantum siap untuk mendefinisikan kembali konektivitas masa depan dengan keamanan dan kemampuan beradaptasi yang ditingkatkan.

**Kata kunci: Quantum, Fiber, Masa Depan, Konektivitas, Inovasi**

### Abstract

*The rapid advancement of communication technology demands faster, more reliable, and secure network systems. Traditional copper-based networks are no longer sufficient, leading to the widespread adoption of optical fiber for its high-speed and low-latency transmission. This study aims to analyze the evolution of future networks, focusing on the transition from fiber optics to the potential of quantum communication. Using qualitative literature review and limited simulation, the research explores the strengths and limitations of both technologies. Results show that fiber optics remains superior in stability and coverage, while quantum communication—through principles like entanglement and Quantum Key Distribution (QKD)—offers unmatched security. The integration of both systems emerges as a promising hybrid model. In conclusion, fiber will continue to serve as a backbone in the near term, but quantum networks are poised to redefine future connectivity with enhanced security and adaptability.*

**Keywords: Quantum, Fiber, Future, Connectivity, Innovation**

### PENDAHULUAN

Evolusi teknologi jaringan saat ini mengalami perkembangan kritis karena permintaan konektivitas yang lebih cepat dan aman untuk mendukung ekosistem digital modern. Meskipun serat optik memberikan keunggulan dalam kecepatan

dan latensi, teknologi ini dihadapkan pada tantangan skalabilitas, efisiensi enkripsi, dan keamanan terhadap ancaman siber. [1]. Sementara itu, teknologi komunikasi kuantum menjanjikan keamanan data yang tak tertandingi melalui prinsip superposisi dan keterikatan, namun masih memiliki

kendala seperti infrastruktur terbatas, biaya tinggi, dan integrasi yang belum sempurna dengan sistem yang ada [2], [3]. Teknologi kuantum sekarang diakui sebagai solusi disruptif yang dapat mengubah komunikasi jaringan [4]. Jaringan kuantum memanfaatkan prinsip-prinsip kuantum seperti superposisi dan keterikatan untuk memberikan keamanan yang tak tertandingi melalui Quantum Key Distribution (QKD) dan menjanjikan efisiensi transmisi yang lebih baik, meskipun menghadapi tantangan seperti jarak transmisi yang terbatas dan persyaratan perangkat keras khusus [5], [6]. Teknologi kuantum memiliki potensi untuk merevolusi industri jaringan dengan fitur keamanan dan kemampuan transmisi yang canggih [7], [8].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi integrasi antara jaringan serat optik dan kuantum sebagai solusi masa depan yang lebih adaptif dan aman, dengan merumuskan model hibrida yang dapat diimplementasikan secara bertahap untuk mengatasi tantangan dalam pengembangan arsitektur jaringan gen [9]. Masa depan jaringan komputer bergantung pada sinergi serat optik stabil dan teknologi kuantum inovatif dengan fokus pada akses cepat, keamanan data, dan perlindungan cyber [10]. Negara dan perusahaan besar telah memulai pengembangan jaringan kuantum nasional untuk menghadapi tantangan digital global [11], yang membutuhkan pembaruan arsitektur jaringan, protokol komunikasi, dan kriptografi [12]. Tantangan implementasi mencakup aspek teknis, biaya, skalabilitas, dan kesiapan sumber daya manusia, sehingga transisi ke jaringan kuantum adalah proses evolusi bertahap yang saling melengkapi dengan serat optik [13]. Penelitian ini menilai

perkembangan teknologi serat optik dan kuantum, menganalisis integrasi keduanya [14], dan menggambarkan potensi jaringan masa depan yang aman dan efisien untuk panduan para akademisi, praktisi, dan pengambil kebijakan dalam menghadapi era digital yang kompleks [15], [16].

### **Rumusan Masalah**

Penelitian ini berangkat dari beberapa pertanyaan inti:

1. Bagaimana peran teknologi fiber optic dalam mendukung kebutuhan konektivitas global saat ini?
2. Apa potensi dan tantangan yang dihadapi dalam penerapan teknologi komunikasi kuantum?
3. Bagaimana integrasi fiber optic dan teknologi kuantum dapat membentuk jaringan masa depan yang lebih aman dan efisien?
4. Apa saja kendala teknis dan infrastruktur yang perlu diatasi untuk menerapkan jaringan hybrid secara luas?

### **Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang betapa pesatnya perkembangan teknologi khususnya di sektor Computer Network yaitu, dari fiber optic ke Quantum Jaringan.

Tujuan spesifik dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis evolusi jaringan komputer dari fiber optic menuju komunikasi kuantum;
2. Mengidentifikasi keunggulan dan keterbatasan kedua teknologi tersebut;
3. Mengeksplorasi potensi integrasi sistem kuantum dengan fiber optic; dan

4. Memberikan rekomendasi strategis untuk pengembangan jaringan masa depan yang lebih adaptif dan aman.

### **Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memberikan kontribusi teoretis, praktis, dan strategis yang selaras dengan lanskap TIK yang berkembang di era kuantum. Dengan munculnya komputasi kuantum dan menurunnya keandalan kriptografi klasik, relevansinya menjadi tepat waktu dan penting.

1. Kontribusi Teoretis

Penelitian ini membahas persimpangan komunikasi optik klasik dan teknologi kuantum, menawarkan model konseptual, simulasi, dan dasar teoretis untuk topik penelitian jaringan kuantum dan infrastruktur yang aman. Menyediakan landasan bagi pengembangan pelajaran baru dan penelitian lanjutan.

2. Manfaat Praktis bagi Praktisi Teknologi  
Studi ini memberikan peta jalan praktis bagi praktisi teknologi di bidang telekomunikasi, keamanan siber, dan infrastruktur TI dengan strategi penerapan sistem serat kuantum hibrida. Manfaatnya termasuk pemahaman skenario dan langkah-langkah persiapan untuk masa depan.

### **Tinjauan Pustaka**

Kemajuan jaringan komputer telah mengalami evolusi yang signifikan, terutama dengan pengembangan dan penyebaran serat optik, yang telah menjadi tulang punggung komunikasi kecepatan tinggi modern [17]. Teknologi serat optik menawarkan bandwidth yang tinggi, latensi yang rendah, dan stabilitas yang sangat baik, sehingga menjadikannya media yang dominan untuk komunikasi metropolitan

dan jarak jauh [18]. Namun, dengan pesatnya pertumbuhan transmisi data dan meningkatnya kekhawatiran tentang keamanan siber, perhatian telah beralih ke teknologi komunikasi kuantum [19]. Komunikasi kuantum, khususnya melalui Quantum Key Distribution (QKD), memperkenalkan pergeseran paradigma tentang bagaimana keamanan dikelola dalam infrastruktur jaringan [20]. QKD memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika kuantum-yaitu teorema tanpa kloning dan prinsip ketidakpastian Heisenberg-untuk memastikan bahwa setiap upaya penyadapan pada saluran kuantum dapat dideteksi [21], [22]. Hal ini menghasilkan metode pertukaran kunci yang sangat aman yang tidak dapat ditandingi oleh kriptografi tradisional.

Penelitian seperti yang dilakukan oleh Diamanti, telah menyoroti potensi sistem hibrida di mana jaringan serat optik klasik diintegrasikan dengan simpul kuantum [23]. Namun, masih ada tantangan yang dihadapi, terutama dengan keterbatasan jarak, sensitivitas perangkat, dan biaya integrasi. Meskipun demikian, simulasi dan uji lapangan (misalnya, di jaringan satelit dan serat kuantum Tiongkok) telah menunjukkan jalan yang layak untuk implementasi hibrida lokal, menjadikan integrasi tersebut sebagai titik fokus inovasi untuk konektivitas di masa depan [24], [25].

### **LANDASAN TEORI**

Evolusi jaringan komputer didorong oleh permintaan pengguna untuk meningkatkan bandwidth [26], latensi yang lebih rendah, dan keamanan yang lebih baik. Integrasi beragam teknologi didukung oleh model OSI klasik dan abstraksi berlapis dari arsitektur jaringan, yang tetap

relevan seiring dengan masuknya paradigma baru seperti komunikasi kuantum [27]. Jaringan serat optik memanfaatkan fisika klasik dan fotonik untuk transmisi data yang cepat dan efisien melalui pulsa cahaya dalam kaca silika atau plastik, mengikuti persamaan Maxwell [28]. Teorema Shannon-Hartley menegaskan kapasitas serat optik yang unggul, dengan kapasitas saluran meningkat secara logaritmik dengan bandwidth dan rasio signal-to-noise [29]. Komunikasi kuantum, yang berasal dari teori informasi kuantum, menggunakan prinsip-prinsip seperti superposisi, keterikatan, dan pengukuran kuantum, dengan protokol BB84 yang mengkodekan bit menggunakan keadaan kuantum foton dalam Quantum Key Distribution (QKD), memastikan keamanan terhadap penyadapan [30].

Mengintegrasikan sistem kuantum dan klasik menghadirkan tantangan karena ketidakcocokan sinyal kuantum dengan amplifier dan repeater tradisional [31]. Teorema no-cloning membatasi jarak komunikasi kuantum tanpa node tepercaya atau repeater kuantum, yang masih dalam tahap pengembangan [32]. Integrasi jaringan optik dan kuantum memerlukan evolusi bersama perangkat keras, protokol, dan kerangka kerja keamanan [33], dengan pendekatan pragmatis saat ini adalah model hibrida yang memanfaatkan tautan kuantum di segmen kritis dan serat optik untuk lalu lintas tulang punggung [34]. Integrasi ini mencerminkan konsep konvergensi teknologi, yang menggabungkan berbagai paradigma untuk meningkatkan fungsionalitas dan ketahanan [35]. Dalam dunia pendidikan, integrasi mekanika kuantum, keamanan jaringan, dan teknik optik memberikan

pandangan holistik bagi siswa dalam membentuk kembali sistem komunikasi dan menawarkan peluang untuk pengembangan kurikulum dalam jaringan computer [36].

Kesimpulannya, kombinasi dari stabilitas serat optik dan janji keamanan teknologi kuantum mewakili pergeseran besar dalam lintasan teoritis dan praktis evolusi jaringan. Hal ini menunjukkan bagaimana konektivitas masa depan akan ditentukan tidak hanya oleh kecepatan atau kapasitas, tetapi juga oleh kemampuan beradaptasi, ketahanan, dan keamanannya dalam menghadapi ancaman digital yang semakin meningkat dan pertumbuhan data yang eksponensial.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan yang akan digunakan saat dilakukannya ini.



Gambar 1. Tahapan Metode Penelitian

Publikasi jurnal ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dan eksperimen terbatas berbasis simulasi untuk menunjukkan perkembangan teknologi yang cepat, khususnya dalam teknologi jaringan yang bertransisi dari serat optik ke komunikasi kuantum [37]. Penelitian ini bertujuan untuk menginformasikan kepada masyarakat tentang kemajuan teknologi dan memprediksi inovasi jaringan di masa depan dengan menganalisis aspek teknis dan strategis [38]. Desain penelitian ini

terdiri dari dua tahap utama: tahap kualitatif deskriptif yang memetakan kemajuan dalam serat optik dan komunikasi kuantum melalui tinjauan literatur, dan tahap eksperimental terbatas yang mensimulasikan integrasi komunikasi kuantum dengan infrastruktur serat yang sudah ada untuk menilai tantangan dan potensi [39]. Desain penelitian eksploratif ini memprediksi perkembangan di masa depan dengan menyediakan kerangka kerja analisis komprehensif yang menggabungkan teori, inovasi teknologi, dan skenario aplikasi di dunia nyata [40].

## **Pengumpulan Data**

### **Analisis Literatur**

Pengumpulan data utama dilakukan melalui kajian literatur ilmiah terhadap jurnal-jurnal teknologi informasi, komunikasi, fisika kuantum terapan, serta laporan industri dari perusahaan seperti BT, Huawei, IBM, dan Google yang aktif dalam pengembangan jaringan kuantum. Literatur yang dianalisis mencakup Standar komunikasi fiber (seperti ITU-T G.652, G.655) [41]. Prinsip-prinsip dasar komunikasi kuantum dan protokol QKD (BB84, E91), Studi kasus implementasi jaringan kuantum (China Quantum Network, EuroQCI), Penelitian simulatif dan arsitektur hybrid fiber-kuantum. Semua sumber dipilih berdasarkan kriteria validitas ilmiah, keterbaruan (maksimum 3 tahun terakhir), dan relevansi dengan konteks jaringan dan computer [42].

Observasi Terbatas terhadap Infrastruktur Nyata

Sebagai pelengkap data sekunder, dilakukan juga observasi terbatas terhadap arsitektur jaringan lokal (LAN/WAN) berbasis fiber pada beberapa instansi pendidikan dan penyedia layanan internet

[43], untuk memahami kompatibilitas infrastruktur dengan sistem komunikasi kuantum yang masih dalam tahap awal [44]. Data lapangan ini bersifat deskriptif dan digunakan untuk menguji rasionalitas skenario integrasi.

### **Eksperimen Simulatif**

Eksperimen terbatas dilakukan dalam lingkungan simulasi dengan menggunakan beberapa perangkat lunak dan Pustaka. Cisco Packet Tracer, untuk mensimulasikan topologi jaringan fiber klasik. Python + QuNetSim/SimulaQron, untuk memodelkan node kuantum sederhana dan protokol QKD di atas jalur fiber. Wireshark & NetSim, untuk mengamati lalu lintas data klasik vs kuantum secara komparatif [45]. Skema simulasi dilakukan dengan beberapa tahap. Jaringan konvensional fiber optik dengan node dan switch standard. Jaringan hybrid dengan tambahan node kuantum, yang menerapkan proses pertukaran kunci kuantum dan pemantauan kanal. Hasil eksperimen divisualisasikan untuk mengamati aspek kecepatan, latensi, kemungkinan gangguan sinyal, serta interoperabilitas antarsistem [46], [47].

### **Analisis Data**

Sebelum terbentuknya jurnal kali ini, ada beberapa tahap salah satunya ialah dengan mengumpulkan data sebanyak mungkin untuk kita analisis secara matang. Setiap tema utama seperti *keamanan jaringan, kecepatan transmisi, efisiensi, infrastruktur, dan potensi inovasi* dikaji secara mendalam untuk menilai kekuatan dan kelemahan masing-masing teknologi [48].

Analisis dilakukan dalam beberapa langkah, Reduksi Data, Menyaring data

dari kajian pustaka dan hasil simulasi berdasarkan tema utama. Display Data, Penyajian dalam bentuk tabel, diagram topologi, dan ilustrasi interaksi antara elemen klasik dan kuantum [49]. Generalisasi berdasarkan kecenderungan, tantangan umum, serta prediksi arah perkembangan ke depan [50]. Simulasi jaringan dibandingkan dalam aspek latensi, gangguan sinyal, dan kestabilan [51]. Meskipun terbatas, hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi protokol kuantum dapat dilakukan melalui jalur fiber eksisting, meski dengan jarak terbatas (maks.  $\pm 100-250$  km tanpa repeater kuantum) [52], [53]. Validitas penelitian dijaga melalui penggunaan sumber ilmiah bereputasi dan dokumentasi resmi seperti Scopus dan Google Scholar, sementara reliabilitas diperkuat dengan pengulangan simulasi pada dua skenario berbeda serta analisis triangulatif [54]. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, termasuk simulasi yang belum merepresentasikan tantangan fisik nyata, ketidakterdediaan perangkat keras kuantum aktual, dan belum adanya pengujian skala besar antarwilayah. Metodologi yang digunakan tidak hanya efektif dalam memantau tren dan inovasi, tetapi juga relevan sebagai model eksplorasi awal untuk teknologi frontier seperti komunikasi kuantum, karena terkadang sebagian orang lebih suka membaca dan menganalisis dengan sumber informasi yang berupa teori agar mereka dapat berinovasi dan memperkembangkannya sendiri sesuai apa yang mereka mau, makanya sangat fleksibilitas menggunakan metode pendekatan deskriptif-kualitatif dalam menghadapi dinamika pesatnya perkembangan teknologi jaringan di zaman 5.0 sekarang ini [55], [56].

## Kerangka Berpikir

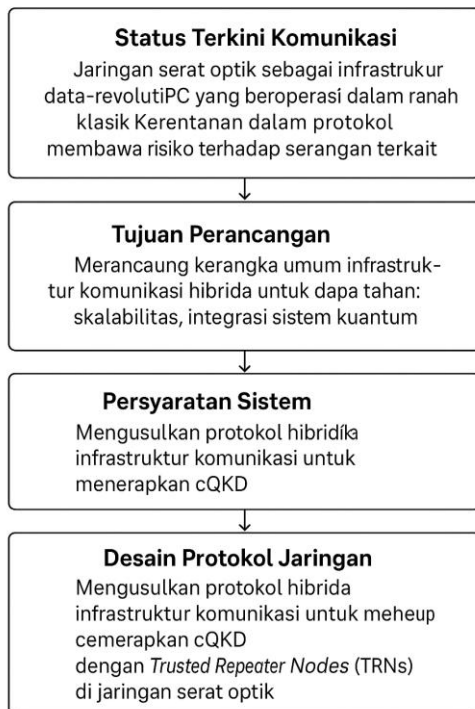


Gambar 2. Kerangka Pikir

Penelitian filosofi akademis didasarkan pada konvergensi teknologi untuk memecahkan tantangan kontemporer dalam evolusi jaringan komputer. Fokus utamanya adalah pada integrasi Quantum Key Distribution (QKD) dalam infrastruktur serat optik yang sudah ada untuk meningkatkan keamanan terhadap ancaman komputasi kuantum. Pendekatan metodologisnya mencakup analisis literatur, simulasi kinerja, dan evaluasi keamanan implikasi dari penerapan serat kuantum hibrida dalam jaringan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang arsitektur jaringan adaptif, tangguh, dan aman untuk generasi mendatang, yang menggabungkan stabilitas jaringan klasik dengan keunggulan keamanan mekanisme kuantum.

## ANALISIS DAN PERANCANGAN

### ANALISIS DAN PERANCANGAN



Gambar 3. Tahapan Analisis dan Rancangan

Penggunaan infrastruktur serat optik dalam jaringan komputer modern telah meningkatkan kinerja dalam hal bandwidth dan latensi, namun keamanan menjadi perhatian utama dengan kemunculan komputer kuantum. Penelitian ini menyoroti Quantum Key Distribution (QKD) sebagai solusi yang tidak dapat dipecahkan untuk pertukaran kunci kriptografi yang dijamin oleh hukum mekanika kuantum. Namun, keterbatasan praktis QKD dan rentan terhadap ancaman siber jaringan serat optik menimbulkan tantangan desain untuk integrasi keamanan QKD dengan efisiensi jaringan optik. Tujuan desain meliputi kompatibilitas antara perangkat kuantum dan jaringan optik klasik, serta pengembangan kerangka kerja hibrida untuk komunikasi tanpa batas.

## IMPLEMENTASI DAN PEMBAHASAN

### Evolusi Jaringan: Dari Fiber Optik Menuju Komunikasi Kuantum

Teknologi jaringan telah mengalami transformasi signifikan, dari penggunaan kabel tembaga hingga adopsi fiber optik yang menawarkan kecepatan tinggi dan latensi rendah. Fiber optik telah menjadi tulang punggung infrastruktur komunikasi global, memungkinkan memangkas waktu yang sangat efisien, dalam mengirimkan suatu data dalam kapasitas/jumlah besar dengan kecepatan cahaya. Namun, dengan meningkatnya kebutuhan akan keamanan dan kecepatan, serta munculnya ancaman dari komputer kuantum terhadap sistem enkripsi konvensional, perhatian beralih ke komunikasi kuantum. Komunikasi kuantum, khususnya melalui Quantum Key Distribution (QKD), menawarkan keamanan yang tidak dapat dicapai oleh metode klasik, karena prinsip-prinsip mekanika kuantum memungkinkan deteksi terhadap upaya penyadapan.

### Integrasi Fiber Optik dan Komunikasi Kuantum.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa komunikasi kuantum dapat diintegrasikan dengan infrastruktur fiber optik yang ada. Misalnya, para ilmuwan berhasil mengirimkan pesan kuantum sejauh 254 km melalui jaringan telekomunikasi komersial di Jerman tanpa memerlukan peralatan kriogenik mahal. Ini menunjukkan bahwa teknologi QKD dapat diterapkan pada jaringan fiber optik yang sudah ada, membuka jalan bagi adopsi luas komunikasi kuantum. Selain itu, eksperimen di Inggris dan Irlandia berhasil mendemonstrasikan komunikasi kuantum melalui kabel bawah laut sepanjang 224 km, menandai pertama kalinya komunikasi

kuantum berhasil dilakukan antara kedua negara tersebut.

### 1. Perbandingan Kinerja: Fiber Optik vs. Komunikasi Kuantum

Tabel 1. perbandingan antara jaringan fiber optik konvensional dan jaringan berbasis komunikasi kuantum:

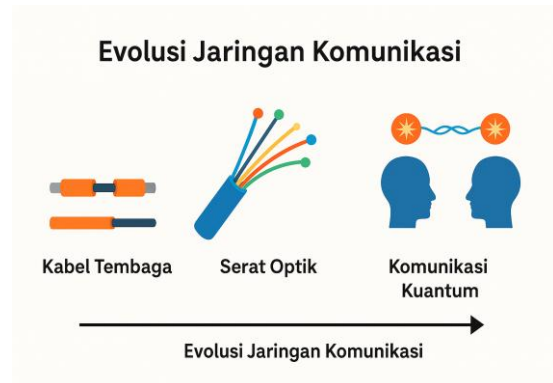
Aspek	Fiber Optik Konvensional	Komunikasi Kuantum (QKD)
Kecepatan Transmisi	Hingga 100 Gbps	Terbatas oleh detektor
Jarak Transmisi	1000 km dengan repeater	~250 km tanpa repeater
Keamanan	Bergantung pada enkripsi	Keamanan intrinsik
Biaya Implementasi	Relatif rendah	Masih tinggi
Kompatibilitas	Sangat kompatibel	Sedang dikembangkan

Meskipun komunikasi kuantum menawarkan keamanan superior, tantangan seperti jarak transmisi dan biaya implementasi masih menjadi hambatan untuk adopsi luas.

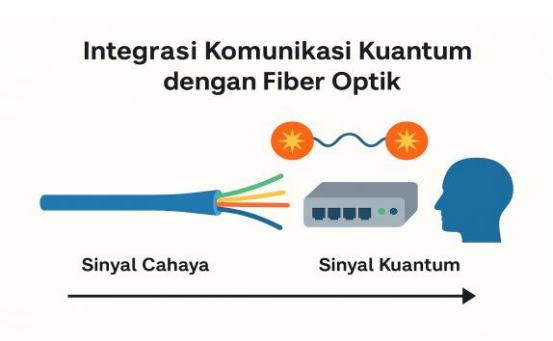
### 2. Inovasi dan Masa Depan Konektivitas

Inovasi dalam komunikasi kuantum terus berkembang. Perusahaan seperti KETS Quantum Security di Inggris telah mengembangkan sistem keamanan kuantum berbasis chip silikon yang sedang diuji oleh BT. Teknologi ini bertujuan untuk mengurangi ukuran dan biaya sistem komunikasi kuantum, memudahkan integrasi ke dalam peralatan telekomunikasi yang ada. Selain itu, penelitian di Tokyo oleh SoftBank dan LQUOM sedang menguji komunikasi kuantum melalui serat optik di lingkungan perkotaan, mengatasi tantangan seperti getaran dan perubahan suhu yang dapat mempengaruhi stabilitas sinyal kuantum.

### 3. Visualisasi dan Ilustrasi



Gambar 4. Evolusi jaringan komunikasi



Gambar 5. Integrasi komunikasi kuantum dengan fiber optic



Gambar 6. Penerapan komunikasi kuantum dilingkungan

### KESIMPULAN

Penelitian ini mengeksplorasi transisi dari serat optik ke komunikasi kuantum dalam jaringan komputer untuk mencapai konektivitas yang lebih baik di masa depan dengan kecepatan, keamanan, dan efisiensi yang ditingkatkan. Studi ini menyoroti

keandalan serat optik dan keamanan komunikasi kuantum melalui distribusi kunci kuantum. Meskipun terdapat tantangan seperti infrastruktur terbatas dan pengujian perangkat keras kuantum, penelitian ini menunjukkan potensi integrasi teknologi kuantum dengan serat optik. Meskipun ada keterbatasan pada simulasi skenario hibrida, penelitian ini menegaskan pentingnya menggabungkan teknologi optik dan kuantum untuk menghasilkan jaringan yang lebih tangguh dan aman di masa depan, dengan penekanan pada kemajuan teknologi yang berkelanjutan.

### Saran

Adapun saran yang diharapkan terkait dengan teknologi yang sangat pesat saat ini yang hampir di luar akal sehat manusia pada umumnya, penelitian lebih lanjut disarankan untuk fokus pada uji coba lapangan dengan menggunakan perangkat keras kuantum yang sesungguhnya, termasuk pengujian pada jaringan serat optik skala besar yang melibatkan antardaerah atau bahkan antarnegara. Selain itu, kolaborasi lintas disiplin ilmu antara ahli jaringan, fisikawan kuantum dan pengambil kebijakan sangat diperlukan untuk mengembangkan standar baru dan mendukung kesiapan infrastruktur dan sumber daya manusia. Eksplorasi lebih lanjut mengenai arsitektur jaringan hybrid dan optimalisasi protokol komunikasi kuantum juga menjadi langkah penting untuk memastikan keberlanjutan dan skalabilitas teknologi ini dalam jangka panjang.

### DAFTAR PUSTAKA

[1] A. M. Aslam, R. Chaudhary, A. Bhardwaj, I. Budhiraja, N. Kumar, and S. Zeadally, “Metaverse for 6G

and Beyond: The Next Revolution and Deployment Challenges,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 32–39, 2023, doi: 10.1109/iotm.001.2200248.

- [2] M. Nance-Hall, Z. Liu, V. Sekar, and R. Durairajan, “Analyzing the Benefits of Optical Topology Programming for Mitigating Link-Flood DDoS Attacks,” *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, vol. 22, no. 1, pp. 146–163, 2024, doi: 10.1109/TDSC.2024.3391188.
- [3] M. Hashemi *et al.*, “Principles and Operation of Virtual Brain Twins,” *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, 2025, doi: 10.1109/RBME.2025.3562951.
- [4] R. Gambheer and M. S. Bhat, “CCD Sensor Based Cameras for Sustainable Streaming IoT Applications With Compressed Sensing,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 67882–67892, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3291396.
- [5] P. Crotty, K. Segall, and D. Schult, “Biologically Realistic Behaviors From a Superconducting Neuron Model,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 4, 2023, doi: 10.1109/TASC.2023.3242901.
- [6] H. S. Nguyen and M. Voznak, “A Bibliometric Analysis of Technology in Digital Health: Exploring Health Metaverse and Visualizing Emerging Healthcare Management Trends,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 23887–23913, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3363165.
- [7] N. Taghinezhad and M. Yazdi, “A New Unsupervised Video Anomaly Detection Using Multi-Scale Feature Memorization and Multipath Temporal Information Prediction,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9295–9310, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237028.
- [8] C. K. Wu, C. T. Cheng, Y. Uwate, G. Chen, S. Mumtaz, and K. F. Tsang, “State-of-the-Art and Research Opportunities for Next-Generation

- Consumer Electronics*,” IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 69, no. 4, pp. 937–948, 2023, doi: 10.1109/TCE.2022.3232478.
- [9] C. F. Hung, Y. R. Chen, C. H. Tseng, and S. M. Cheng, “Security Threats to xApps Access Control and E2 Interface in O-RAN,” IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 5, pp. 1197–1203, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3364840.
- [10] P. Rito *et al.*, “Aveiro Tech City Living Lab: A Communication, Sensing, and Computing Platform for City Environments,” IEEE Internet Things J., vol. 10, no. 15, pp. 13489–13510, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3262627.
- [11] R. Dulout, L. Mendiboure, Y. Pousset, V. Deniau, and F. Launay, “Non-Orthogonal Multiple Access for Offloading in Multi-Access Edge Computing: A Survey,” IEEE Access, vol. 11, pp. 118983–119016, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3326846.
- [12] A. Hazra, A. Kalita, and M. Gurusamy, “Meeting the Requirements of Internet of Things: The Promise of Edge Computing,” IEEE Internet Things J., vol. 11, no. 5, pp. 7474–7498, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3339492.
- [13] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, “Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan,” INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [14] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, “Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds,” 2024. doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [15] F. Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, Riyan, Yayu Rahma Febriani, and Muhammad Umar Mansyur, “Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools,” J. Inf. dan Teknol., pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.
- [16] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, “Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik,” 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [17] S. Munikoti, D. Agarwal, L. Das, M. Halappanavar, and B. Natarajan, “Challenges and Opportunities in Deep Reinforcement Learning With Graph Neural Networks: A Comprehensive Review of Algorithms and Applications,” IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst., vol. 35, no. 11, pp. 15051–15071, 2023, doi: 10.1109/TNNLS.2023.3283523.
- [18] S. McKnight *et al.*, “Three-Dimensional Residual Neural Architecture Search for Ultrasonic Defect Detection,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 71, no. 3, pp. 423–436, 2024, doi:10.1109/TUFFC.2024.3353408.
- [19] L. Beckwith, D. T. Nguyen, and K. Gaj, “Hardware Accelerators for Digital Signature Algorithms Dilithium and FALCON,” IEEE Des. Test, vol. 41, no. 5, pp. 27–35, 2024, doi: 10.1109/MDAT.2023.3305156.
- [20] M. Mehic *et al.*, “Quantum Cryptography in 5G Networks: A Comprehensive Overview,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 26, no. 1, pp. 302–346, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3309051.
- [21] W. Arshad *et al.*, “Cancer Unveiled: A Deep Dive Into Breast Tumor Detection Using Cutting-Edge Deep Learning Models,” IEEE Access, vol. 11, pp. 133804–133824, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2023.3335604.

- [22] Y. Chen *et al.*, “Automated Dominative Subspace Mining for Efficient Neural Architecture Search,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 34, no. 10, pp. 9281–9297, 2024, doi: [10.1109/TCSVT.2024.3395463](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2024.3395463).
- [23] K. Song *et al.*, “Digital Biomarker for Muscle Function Assessment Using Surface Electromyography With Electrical Stimulation and a Non-Invasive Wearable Device,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 32, pp. 3048–3058, 2024, doi: [10.1109/TNSRE.2024.3444890](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3444890).
- [24] T. Jalonon, “Real-Time Damage Detection in Fiber Lifting Ropes Using Lightweight Convolutional Neural Networks,” *IEEE Sens. J.*, vol. 25, no. 4, pp. 7496–7507, 2025, doi: [10.1109/JSEN.2024.3521118](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3521118).
- [25] L. Wang, H. Liang, and D. Zhao, “Deep-Reinforcement-Learning-Based Computation Offloading and Power Allocation Within Dynamic Platoon Network,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 6, pp. 10500–10512, 2024, doi: [10.1109/JIOT.2023.3327712](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3327712).
- [26] A. Baidawi, “Jaringan Sensor Nirkabel Dan Iot Untuk Kota Pintar Pamekasan,” *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: [10.59697/jsik.v7i2.108](https://doi.org/10.59697/jsik.v7i2.108).
- [27] S. J. Ben Yoo *et al.*, “Quantum Wrapper Networking,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 3, pp. 76–81, 2024, doi: [10.1109/MCOM.001.2300067](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300067).
- [28] S. L. Tsang, M. T. West, S. M. Erfani, and M. Usman, “Hybrid Quantum-Classical Generative Adversarial Network for High-Resolution Image Generation,” *IEEE Trans. Quantum Eng.*, vol. 4, 2023, doi: [10.1109/TQE.2023.3319319](https://doi.org/10.1109/TQE.2023.3319319).
- [29] A. Gupta, E. A. Karahan, C. Bhat, K. Sengupta, and U. K. Khankhoje, “Tandem Neural Network Based Design of Multiband Antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 8, pp. 6308–6317, 2023, doi: [10.1109/TAP.2023.3276524](https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3276524).
- [30] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Zulfikri, G. Arifin, and R. M. Ilhamsyah, “Analysis of Phishing Attack Trends, Impacts and Prevention Methods: Literature Study,” 2024, [pdfs.semanticscholar.org](https://pdfs.semanticscholar.org/10.47709/brilliance.v4i1.4357). doi: [10.47709/brilliance.v4i1.4357](https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4357).
- [31] F. Samiullah, M. L. Gan, S. Akleylek, and Y. Aun, “Group Key Management in Internet of Things: A Systematic Literature Review,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 77464–77491, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3298024](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3298024).
- [32] S. Bajric, “Enabling Secure and Trustworthy Quantum Networks: Current State-of-the-Art, Key Challenges, and Potential Solutions,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 128801–128809, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3333020](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3333020).
- [33] J. Akram, A. Anaissi, R. S. Rathore, R. H. Jhaveri, and A. Akram, “GALTrust: Generative Adversarial Learning-Based Framework for Trust Management in Spatial Crowdsourcing Drone Services,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 70, no. 3, pp. 6196–6207, 2024, doi: [10.1109/TCE.2024.3384978](https://doi.org/10.1109/TCE.2024.3384978).
- [34] A. Alomari and S. A. P. Kumar, “DEQSVC: Dimensionality Reduction and Encoding Technique for Quantum Support Vector Classifier Approach to Detect DDoS Attacks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 110570–110581, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3322723](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3322723).
- [35] A. Ayub Khan *et al.*, “ORAN-B5G: A Next-Generation Open Radio Access Network Architecture with Machine Learning for beyond 5G in Industrial 5.0,” *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 8, no. 3, pp. 1026–1036, 2024, doi: [10.1109/TGCN.2024.3396454](https://doi.org/10.1109/TGCN.2024.3396454).

- [36] P. H. Lin, P. Nowitzki, E. A. Jorswieck, D. Pohle, and J. Czarske, "Secret Key Generation Over Multi-Mode Fiber: Channel Measurements, Key Rate Analysis, and System Implementation," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, 2025, doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3549090](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3549090).
- [37] A. Trenti, M. Achleitner, P. Walther, and H. Höbel, "Demonstration of GHz Sequential Time-bin Entanglement distribution in a Metropolitan Fiber Network," *IET Conf. Proc.*, vol. 2023, no. 34, pp. 916–919, 2023, doi: [10.1049/icp.2023.2372](https://doi.org/10.1049/icp.2023.2372).
- [38] Z. Deng *et al.*, "Leakage-Resilient and Carbon-Neutral Aggregation Featuring the Federated AI-enabled Critical Infrastructure," *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, 2024, doi: [10.1109/TDSC.2025.3532957](https://doi.org/10.1109/TDSC.2025.3532957).
- [39] R. Saha *et al.*, "A Blockchain Framework in Post-Quantum Decentralization," *IEEE Trans. Serv. Comput.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: [10.1109/TSC.2021.3116896](https://doi.org/10.1109/TSC.2021.3116896).
- [40] A. Castiglione, J. G. Esposito, V. Loia, M. Nappi, C. Pero, and M. Polsinelli, "Integrating Post-Quantum Cryptography and Blockchain to Secure Low-Cost IoT Devices," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 21, no. 2, pp. 1674–1683, 2024, doi: [10.1109/TII.2024.3485796](https://doi.org/10.1109/TII.2024.3485796).
- [41] A. A. Khan *et al.*, "Data Security in Healthcare Industrial Internet of Things With Blockchain," *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 20, pp. 25144–25151, 2023, doi: [10.1109/JSEN.2023.3273851](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3273851).
- [42] B. Narottama and S. Y. Shin, "Federated Quantum Neural Network With Quantum Teleportation for Resource Optimization in Future Wireless Communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 11, pp. 14717–14733, 2023, doi: [10.1109/TVT.2023.3280459](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3280459).
- [43] S. Nanataki, O. Koyama, K. Narumiya, K. Ikeda, and M. Yamada, "Expansion of Measurement Range of Low-Cost Ethernet-Based Temperature Sensing System Using Long-Period Fiber Grating," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 8, no. 1, 2024, doi: [10.1109/LSENS.2023.3344105](https://doi.org/10.1109/LSENS.2023.3344105).
- [44] D. Wen *et al.*, "Feature Extraction Method of EEG Signals Evaluating Spatial Cognition of Community Elderly With Permutation Conditional Mutual Information Common Space Model," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 31, pp. 2370–2380, 2023, doi: [10.1109/TNSRE.2023.3273119](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3273119).
- [45] W. Khalid, N. Ahmed, S. Khan, Z. Ullah, and Y. Javed, "Simulative Survey of Flooding Attacks in Intermittently Connected Vehicular Delay Tolerant Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 75628–75656, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3297439](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3297439).
- [46] M. Murakami, T. Kurimoto, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "Experimental Evaluation on Priority-Aware Guaranteed Resource Allocation for Resource Pool Based Reconfigurable Hardware," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 32, no. 1, pp. 298–307, 2024, doi: [10.1109/TNET.2023.3288021](https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3288021).
- [47] S. Kaneko, K. Honda, T. Kanai, J. I. Kani, and T. Yoshida, "Photonic Gateway and Protocol-Independent End-to-End Optical-Connection Provisioning in All-Photonic Metro-Access Converged Network," *IEEE Photonics J.*, vol. 15, no. 3, 2023, doi: [10.1109/JPHOT.2023.3262215](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3262215).
- [48] Y. Lin, X. Wang, F. Hao, L. Wang, and C. Huang, "Effective Knowledge Dissemination Modeling and

- Regulation in Blended Learning Networks,* *IEEE Trans. Comput. Soc. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 51–65, 2024, doi: [10.1109/TCSS.2022.3213076](https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3213076).
- [49] C. Piveteau and D. Sutter, “*Circuit Knitting With Classical Communication,*” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 70, no. 4, pp. 2734–2745, 2024, doi: [10.1109/TIT.2023.3310797](https://doi.org/10.1109/TIT.2023.3310797).
- [50] R. Zhang, L. Jiao, L. Li, X. Liu, F. Liu, and S. Yang, “*A Quantum Evolutionary Learning Tracker for Video,*” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 28, no. 2, pp. 418–431, 2024, doi: [10.1109/TEVC.2023.3264641](https://doi.org/10.1109/TEVC.2023.3264641).
- [51] L. Jiao *et al.*, “*Graph Representation Learning Meets Computer Vision: A Survey,*” *IEEE Trans. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 2–22, 2023, doi: [10.1109/TAI.2022.3194869](https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3194869).
- [52] P. Xu, H. Wu, X. Tao, C. Wang, D. Chen, and G. Nan, “*Anti-Quantum Certificateless Group Authentication for Massive Accessing IoT Devices,*” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 9, pp. 16561–16577, 2024, doi: [10.1109/JIOT.2024.3353807](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3353807).
- [53] X. H. Zhou *et al.*, “*Learning Skill Characteristics From Manipulations,*” *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 34, no. 12, pp. 9727–9741, 2023, doi: [10.1109/TNNLS.2022.3160159](https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3160159).
- [54] Z. Song *et al.*, “*A Hybrid-Integrated Photonic Spiking Neural Network Framework Based on an MZI Array and VCSELS-SA,*” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 2, 2023, doi: [10.1109/JSTQE.2022.3200942](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2022.3200942).
- [55] A. Rauniyar *et al.*, “*Federated Learning for Medical Applications: A Taxonomy, Current Trends, Challenges, and Future Research Directions,*” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 5, pp. 7374–7398, 2024, doi: [10.1109/JIOT.2023.3329061](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3329061).
- [56] M. D. Alea *et al.*, “*A Fingertip-Mimicking 1280×1600-Resolution m-skin Taxel Readout Chip with per-Taxel Spiking Readout and Embedded Receptive Field Processing,*” *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 18, no. 6, pp. 1308–1320, 2024, doi: [10.1109/TBCAS.2024.3387545](https://doi.org/10.1109/TBCAS.2024.3387545).