

Studi Komparasi Teknik Efisiensi Penggunaan Energi pada Komputasi Kuantum dan Pemanfaatan Teknologi AI

Jarwo

Program Studi Teknik Informatika Sekolah Tinggi Teknologi Pomosda Nganjuk
e-mail: jarwosttpmd@gmail.com

Abstract

Current computing paradigms face significant challenges related to limited power scalability and algorithmic efficiency in classical systems, where the energy consumption of supercomputers (HPC) increases exponentially alongside problem complexity. Quantum computing emerges as a futuristic solution offering radical algorithmic efficiency, yet it encounters a paradox of thermal inefficiency within its cryogenic support systems. This study presents a comparative analysis evaluating various energy efficiency techniques, ranging from cryogenic system optimization to hardware architecture. The findings indicate that innovations in superconducting coaxial cables and optical control can drastically reduce heat loads. Furthermore, the implementation of hybrid algorithms such as VQE and QAOA, combined with improvements in gate fidelity, is proven to reduce operational time and computational repetitions, directly enhancing the system's overall energy efficiency. This study concludes that the diversification of photonics-based and trapped-ion architectures offers a more sustainable pathway for the future integration of quantum technology and AI.

Keywords: Quantum Computing, Artificial Intelligence (AI), Energy Efficiency, Cryogenic Systems, Gate Fidelity, Hybrid Computing.

Abstrak

Paradigma komputasi saat ini menghadapi tantangan besar terkait keterbatasan skalabilitas daya dan efisiensi algoritma pada sistem klasik, di mana konsumsi energi superkomputer (HPC) meningkat secara eksponensial seiring kompleksitas masalah. Komputasi kuantum hadir sebagai solusi futuristik dengan efisiensi algoritma radikal, namun menghadapi paradoks inefisiensi termal pada sistem pendukung kriogenik. Penelitian ini merupakan studi komparasi yang mengevaluasi berbagai teknik efisiensi energi, mulai dari optimalisasi sistem pendingin hingga arsitektur perangkat keras. Hasil studi menunjukkan bahwa inovasi pada kabel koaksial superkonduktor dan kontrol optik dapat mengurangi beban panas secara drastis. Selain itu, penerapan algoritma hybrid seperti VQE dan QAOA serta peningkatan kesetiaan gerbang (*gate fidelity*) terbukti mampu menekan waktu operasional dan jumlah pengulangan komputasi, yang secara langsung meningkatkan efisiensi energi sistem. Studi ini menyimpulkan bahwa diversifikasi arsitektur berbasis fotonik dan ion terperangkap menawarkan jalur yang lebih berkelanjutan bagi integrasi teknologi kuantum dan AI di masa depan.

Kata Kunci: Komputasi Kuantum, Kecerdasan Buatan (AI), Efisiensi Energi, Sistem Kriogenik, *Gate Fidelity*, Komputasi Hybrid.

Pendahuluan

Paradigma komputasi dewasa ini menghadapi tantangan besar terkait keterbatasan skalabilitas daya dan efisiensi algoritma pada sistem klasik (Bluefors, 2026). Seiring dengan meningkatnya kompleksitas masalah—khususnya dalam simulasi kimia dan optimasi skala besar—konsumsi energi pada Superkomputer Klasik (HPC) cenderung meningkat secara eksponensial (McClean, 2025). Hal ini menciptakan beban operasional yang masif dan jejak karbon yang sangat tinggi akibat kebutuhan infrastruktur *server farm* yang luas. Meskipun komputer klasik mampu menyelesaikan berbagai tugas, efisiensi operasionalnya mulai mencapai titik jenuh ketika harus menangani miliaran operasi untuk satu jenis simulasi kompleks, sehingga memicu urgensi untuk mencari alternatif teknologi yang lebih berkelanjutan (Google Quantum AI, 2026; IBM Quantum, 2025; IonQ, 2026).

Komputasi kuantum hadir sebagai solusi futuristik yang menawarkan efisiensi algoritma secara radikal, di mana simulasi yang membutuhkan miliaran operasi klasik diprediksi dapat diselesaikan hanya dalam beberapa ribu operasi kuantum (Svore, 2026). Namun, terdapat sebuah kontradiksi yang menjadi permasalahan inti: meskipun daya operasional qubit cenderung konstan, konsumsi energi total saat ini justru habis terserap oleh sistem pendukung, khususnya pada teknologi pendinginan (kriogenik). Hal ini menciptakan paradoks di mana potensi rendahnya jejak karbon komputer kuantum pada masalah optimasi skala besar masih terhambat oleh inefisiensi termal dan ketergantungan pada infrastruktur pendinginan yang ekstrem (Tilly, 2025).

Masih terdapat kesenjangan pengetahuan yang signifikan mengenai bagaimana mengoptimalkan desain arsitektur kuantum agar keunggulan teoretis dalam kecepatan algoritma tidak terhapuskan oleh besarnya energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan stabilitas qubit. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi teknik mitigasi panas, pengembangan material qubit suhu tinggi, atau algoritma hybrid yang mampu meminimalkan waktu aktif sistem pendingin (Psiquantum, 2025; Quantinuum, 2025). Dengan demikian, tantangan utamanya adalah mentransformasikan prediksi "potensi jejak karbon rendah" menjadi realitas teknologi yang benar-benar efisien secara energi di lingkungan industri.

Tantangan utama dalam mencapai efisiensi energi komputasi kuantum terletak pada kebutuhan daya sistem pendingin yang masif dibandingkan daya operasional qubit itu sendiri. Saat ini, komputer kuantum superkonduktor tipikal membutuhkan daya sekitar 25 kW, di mana sebagian besar energi tersebut habis untuk menjalankan *dilution refrigerator* guna mempertahankan suhu di bawah 10 milikelvin. Efisiensi energi pada tahap ini difokuskan pada pengurangan beban termal parasit yang masuk melalui ribuan kabel kontrol yang menghubungkan lingkungan suhu ruang dengan inti prosesor yang sangat dingin.

Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan **deskriptif-kualitatif yang dipadukan dengan analisis kuantitatif komparatif** untuk menilai efisiensi energi komputasi klasik (HPC) dan komputasi kuantum. Data dikumpulkan melalui studi literatur sistematis dari publikasi ilmiah dan laporan industri mutakhir, dengan fokus pada konsumsi energi per operasi, efisiensi algoritma, serta beban energi sistem pendinginan kriogenik. Analisis dilakukan secara integratif melalui sintesis kualitatif dan komparasi kuantitatif, didukung model konseptual untuk mengidentifikasi titik inefisiensi utama. Keabsahan temuan dijamin melalui triangulasi sumber, sehingga menghasilkan dasar analitis yang kuat bagi optimalisasi arsitektur komputasi kuantum yang berkelanjutan.

Hasil dan Pembahasan

Komparasi Teknik Efisiensi

a. Optimalisasi Sistem Kriogenik (Pendinginan).

Inovasi terbaru pada tahun 2025 dan 2026 memperkenalkan penggunaan kabel koaksial superkonduktor dan interkoneksi kepadatan tinggi yang dirancang untuk meminimalkan konduksi panas. Selain itu, transisi dari kontrol berbasis gelombang mikro konvensional ke kontrol optik melalui serat fiber mulai diadopsi secara industri. Penggunaan cahaya untuk mengirimkan sinyal kontrol ke dalam *cryostat* terbukti mampu mengurangi beban panas secara drastis dibandingkan kabel tembaga tradisional, sekaligus memecahkan masalah "kemacetan pengabelan" (*wiring bottleneck*) pada sistem dengan ribuan qubit. Paralel dengan material kabel, arsitektur sistem pendingin kini bergeser ke arah Modular Cryogenic Platforms.

Platform modular seperti yang diperkenalkan oleh Bluefors pada awal 2026 memungkinkan pusat data komputasi berperforma tinggi (HPC) untuk memperluas kapasitas qubit tanpa harus mendesain ulang sistem pendingin dari nol. Sistem ini menggunakan arsitektur yang memisahkan beban pendinginan untuk kabel kontrol dan unit pemrosesan kuantum (QPU), sehingga distribusi suhu menjadi lebih stabil dan konsumsi listrik untuk kompresor gas helium dapat ditekan secara lebih efisien.

Dari sisi integrasi elektronik, penelitian melalui proyek seperti FIRETRACE (2025) terus mendorong penggunaan teknologi Cryogenic CMOS (cryo-CMOS). Dengan menempatkan sirkuit kontrol elektronik langsung di dalam lingkungan dingin (suhu sekitar 4 Kelvin), kebocoran panas dari luar dapat dikurangi secara signifikan. Langkah ini memindahkan proses pembangkitan sinyal yang dulunya berada di rak-rak besar suhu ruang ke dalam *cryostat*, yang tidak hanya menghemat energi tetapi juga mengurangi latensi sinyal yang krusial bagi koreksi kesalahan kuantum.

Secara strategis, optimalisasi kriogenik ini menjadi penentu apakah teknologi kuantum dapat bersaing dengan AI klasik dalam hal keberlanjutan lingkungan. Laporan dari *World Economic Forum* (2026) menekankan bahwa tanpa terobosan dalam efisiensi pendinginan, jejak karbon dari infrastruktur kuantum skala besar akan menjadi kendala adopsi massal. Oleh karena itu, sinergi antara material superkonduktor, kontrol optik, dan elektronik terintegrasi suhu rendah menjadi pilar utama dalam peta jalan komputasi kuantum hijau di masa depan.

b. Peningkatan Kesetiaan Gerbang (Gate Fidelity)

Peningkatan kesetiaan gerbang (*gate fidelity*) merupakan fondasi utama dalam transisi dari komputer kuantum eksperimental menuju komputer kuantum yang toleran terhadap kesalahan (*Fault-Tolerant Quantum Computing*). Dalam komputasi kuantum, "gerbang" adalah operasi logika dasar yang memanipulasi qubit; namun, karena sifat mekanika kuantum yang rapuh, operasi ini sering kali mengalami gangguan akibat interaksi lingkungan yang tidak diinginkan. Jika tingkat kesalahan gerbang tetap tinggi, akumulasi derau akan menghancurkan informasi kuantum sebelum perhitungan selesai, sehingga meningkatkan kesetiaan gerbang hingga melampaui ambang batas tertentu adalah syarat mutlak agar algoritma koreksi kesalahan dapat bekerja secara efektif.

Secara teknis, peningkatan kesetiaan ini dicapai melalui teknik yang dikenal sebagai Quantum Control. Para peneliti menggunakan algoritma optimasi untuk membentuk pulsa gelombang mikro atau laser dengan presisi ekstrem guna meminimalkan efek dekoherensi dan *crosstalk* antar qubit. Pada tahun 2025, integrasi *Machine Learning* di tingkat perangkat keras telah memungkinkan penyesuaian parameter pulsa secara otomatis dan *real-time*. Teknik ini memastikan bahwa setiap gerbang logika dieksekusi dalam waktu sesingkat mungkin dengan energi seminimal mungkin, sehingga membatasi jendela waktu di mana derau lingkungan dapat merusak status kuantum.

Tabel 1. Kompleksitas Efisiensi

Aspek	Superkomputer Klasik (HPC)	Komputer Kuantum (Prediksi Masa Depan)
Penskalaan Daya	Meningkat secara linear/eksponensial dengan kompleksitas masalah.	Cenderung konstan (daya habis di pendinginan, bukan di jumlah operasi).
Efisiensi Algoritma	Mebutuhkan miliaran operasi untuk simulasi kimia.	Dapat menyelesaikan simulasi kimia yang sama dalam beberapa ribu operasi.
Jejak Karbon	Sangat tinggi karena kebutuhan <i>server farm</i> yang masif.	Potensial jauh lebih rendah untuk masalah optimasi skala besar.

Sumber: Data diolah, 2026

Langkah krusial berikutnya dalam narasi peningkatan kesetiaan adalah penerapan Quantum Error Mitigation (QEM) yang lebih canggih. Berbeda dengan koreksi kesalahan penuh yang membutuhkan ribuan qubit tambahan, QEM bekerja dengan menjalankan sirkuit beberapa kali dengan variasi gangguan yang terkontrol, lalu menggunakan metode statistik untuk mengekstrapolasi hasil yang "bebas derau". Berdasarkan laporan teknis terbaru dari konsorsium industri kuantum pada awal 2026, penggunaan metode *Probabilistic Error Cancellation* (PEC) telah berhasil meningkatkan akurasi hasil pada prosesor kuantum skala menengah hingga mencapai level yang sebelumnya hanya bisa dicapai melalui simulasi komputer klasik yang sangat kuat.

Selain aspek perangkat lunak, materialitas fisik qubit juga mengalami evolusi besar untuk mendukung kesetiaan gerbang yang lebih tinggi. Pengembangan material superkonduktor baru dan teknik fabrikasi yang mengurangi cacat pada tingkat atomik telah berhasil memperpanjang waktu koherensi qubit. Dengan waktu koherensi yang lebih lama, operasi gerbang dapat dilakukan berulang kali dengan tingkat kepercayaan yang jauh lebih tinggi. Studi pada tahun 2025 menunjukkan bahwa penggunaan substrat kristal murni dan pelindung magnetik berlapis mampu menekan tingkat kesalahan gerbang dua-qubit—salah satu operasi tersulit dalam komputasi kuantum—ke bawah angka kritis 0,1%.

Pencapaian kesetiaan gerbang yang tinggi secara langsung berdampak pada efisiensi energi dan ekonomi komputasi. Ketika gerbang kuantum menjadi lebih setia, jumlah pengulangan (*shots*) yang diperlukan untuk mendapatkan jawaban yang akurat berkurang drastis, yang berarti waktu penggunaan mesin dan konsumsi daya sistem pendingin menjadi lebih efisien. Peta jalan teknologi tahun 2026 menegaskan bahwa pencapaian "Ambital Fidelity" (kesetiaan di atas 99,99%) akan menjadi titik balik di mana komputasi kuantum tidak lagi hanya sekadar eksperimen laboratorium, melainkan alat produksi industri yang handal untuk memecahkan masalah optimasi dan kimia kuantum yang paling menantang.

c. Komputasi Hybrid (VQE dan QAOA).

Komputasi hybrid muncul sebagai solusi atas keterbatasan perangkat kuantum era NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*) yang memiliki jumlah qubit terbatas dan tingkat kesalahan yang masih signifikan. Strategi ini bekerja dengan membagi beban komputasi secara cerdas: unit pemrosesan klasik (CPU/GPU) menangani tugas-tugas logika berat dan optimasi parameter, sementara prosesor kuantum (QPU) hanya digunakan untuk mengevaluasi fungsi matematika kompleks yang secara eksponensial sulit bagi komputer biasa. Dengan cara ini, keunggulan kuantum tetap dapat dimanfaatkan tanpa harus menunggu terciptanya komputer kuantum yang sepenuhnya toleran terhadap kesalahan (*fault-tolerant*).

Variational Quantum Eigensolver (VQE) menjadi algoritma andalan dalam simulasi kimia kuantum dan ilmu material. VQE bekerja dengan mencari nilai energi terendah (ground state) dari suatu molekul, sebuah tugas yang sangat krusial untuk menemukan obat-obatan baru atau material baterai yang lebih efisien. Dalam skema ini, QPU mempersiapkan status kuantum molekul, dan hasilnya kemudian diukur serta dikirim kembali ke komputer klasik. Komputer klasik lantas menggunakan algoritma optimasi untuk menyesuaikan parameter sirkuit kuantum tersebut secara berulang (iteratif) hingga mencapai titik energi paling rendah yang akurat. Di sisi lain, *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA) dirancang untuk memecahkan masalah kombinatorial yang sangat kompleks, seperti optimasi rute logistik atau manajemen portofolio keuangan. QAOA bekerja dengan memetakan masalah optimasi ke dalam bentuk Hamiltonian kuantum.

Melalui serangkaian interaksi antara perangkat klasik dan kuantum, algoritma ini mencari solusi "pendekatan" yang cukup baik untuk masalah-masalah yang memiliki miliaran kemungkinan kombinasi. Efisiensi energi tercipta karena waktu operasional QPU yang sangat singkat hanya digunakan untuk mengeksplorasi ruang pencarian yang luas secara simultan melalui prinsip superposisi. Integrasi hybrid ini juga menjadi pilar dalam pengembangan kecerdasan buatan masa depan melalui *Quantum-Enhanced Machine Learning*. Dengan memanfaatkan VQE dan QAOA sebagai lapisan (layer) dalam jaringan saraf tiruan klasik, para peneliti dapat mempercepat pelatihan model AI pada dataset yang memiliki struktur data sangat kompleks.

Pada tahun 2025, laporan dari berbagai konsorsium teknologi menunjukkan bahwa pendekatan hybrid ini mampu mengurangi latensi pelatihan model optimasi hingga 30-40% dibandingkan menggunakan infrastruktur HPC (High-Performance Computing) murni, yang secara langsung berdampak pada pengurangan konsumsi daya total. Sebagai penutup, peta jalan menuju tahun 2026 dan seterusnya menempatkan komputasi hybrid sebagai standar industri dalam operasional pusat data kuantum global.

Keberhasilan VQE dan QAOA dalam memberikan nilai praktis telah mendorong pengembangan perangkat lunak yang lebih *user-friendly*, di mana pengembang AI tidak perlu memahami fisika kuantum secara mendalam untuk memanggil fungsi-fungsi kuantum dalam

kode mereka. Pendekatan ini memastikan bahwa transisi dari era klasik ke kuantum berlangsung secara mulus, efisien, dan yang paling penting, memberikan keuntungan ekonomis yang nyata bagi industri.

d. **Arsitektur Berbasis Fotonik dan Ion Terperangkap**

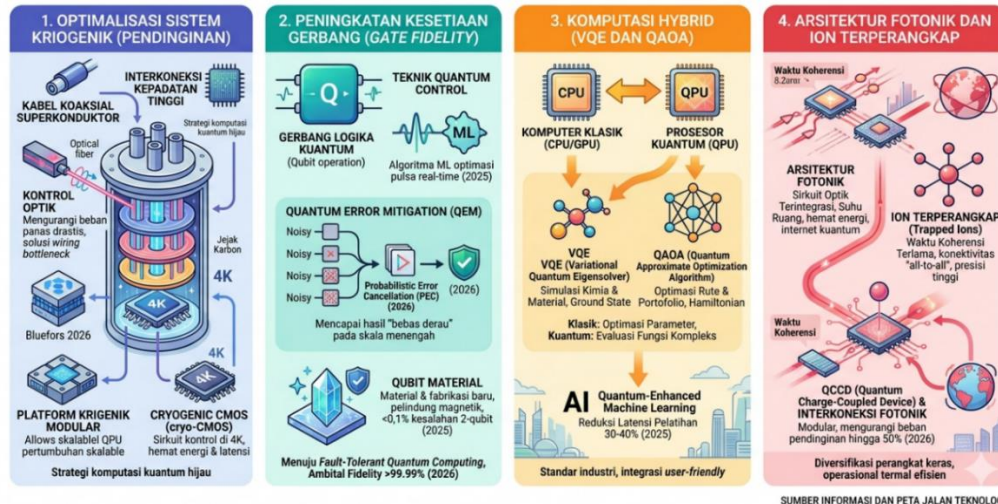
Arsitektur komputasi kuantum berbasis fotonik dan ion terperangkap (*trapped ions*) mewakili dua jalur paling menjanjikan dalam diversifikasi perangkat keras kuantum yang lebih efisien dan skalabel. Berbeda dengan sistem superkonduktor yang memerlukan suhu mendekati nol mutlak, kedua arsitektur ini menawarkan keunggulan unik dalam hal stabilitas dan kemudahan integrasi dengan infrastruktur telekomunikasi yang ada. Fotonik menggunakan partikel cahaya (foton) sebagai pembawa informasi, sementara ion terperangkap menggunakan atom bermuatan yang dikendalikan oleh medan elektromagnetik, menciptakan landasan bagi komputer kuantum yang mampu beroperasi dengan presisi tinggi.

Pendekatan fotonik menjadi sangat menarik dalam hal efisiensi energi karena qubit cahaya dapat merambat melalui serat optik pada suhu ruang dengan kehilangan energi yang sangat rendah. Dalam sistem ini, informasi diproses melalui sirkuit optik terintegrasi yang memanipulasi keadaan cahaya. Karena foton tidak saling berinteraksi secara alami dan tidak terpengaruh oleh gangguan elektromagnetik lingkungan sekitarnya, kebutuhan akan pelindung magnetik dan kriogenik skala besar dapat dikurangi drastis. Hal ini memungkinkan pengembangan komputer kuantum yang lebih kompak dan berpotensi untuk diintegrasikan langsung ke dalam jaringan internet kuantum masa depan.

Di sisi lain, arsitektur ion terperangkap menawarkan waktu koherensi yang paling lama di antara semua modalitas qubit saat ini. Dengan menggunakan laser presisi tinggi untuk memanipulasi status internal ion yang melayang dalam ruang hampa, sistem ini mencapai tingkat kesetiaan gerbang (*gate fidelity*) yang luar biasa. Keunggulan utama ion terperangkap adalah konektivitas "all-to-all", di mana setiap qubit dapat berinteraksi langsung dengan qubit lainnya dalam perangkat yang sama tanpa memerlukan pengabelan fisik yang rumit.

Efisiensi ini mengurangi jumlah operasi gerbang yang diperlukan untuk menjalankan algoritma tertentu, yang secara otomatis menekan konsumsi energi total sistem. Integrasi kedua teknologi ini mulai terlihat pada tahun 2025 melalui konsep Quantum Charge-Coupled Device (QCCD) dan interkoneksi fotonik. Dengan menggunakan foton sebagai "kurir" untuk menghubungkan beberapa unit perangkat ion, para peneliti berhasil menciptakan arsitektur modular yang dapat dikembangkan ke skala yang lebih besar tanpa mengorbankan kualitas qubit.

Laporan industri pada awal 2026 menunjukkan bahwa penggabungan presisi ion dengan kecepatan transmisi foton merupakan kunci utama untuk membangun pusat data kuantum yang tidak hanya kuat secara komputasi, tetapi juga efisien secara termal, mengurangi beban pendinginan hingga 50% dibandingkan sistem superkonduktor murni. Sebagai kesimpulan, transisi menuju arsitektur fotonik dan ion terperangkap menandai pergeseran paradigma dalam desain perangkat keras kuantum dari sistem yang "berat energi" menjadi sistem yang lebih berkelanjutan. Kemampuan fotonik untuk beroperasi di jalur optik standar dan kemampuan ion untuk mempertahankan informasi dalam waktu lama memberikan fleksibilitas luar biasa bagi industri AI dan keamanan siber. Peta jalan teknologi 2026 menegaskan bahwa diversifikasi arsitektur ini akan mempercepat komersialisasi kuantum, memungkinkan aplikasi praktis di luar laboratorium penelitian dengan jejak karbon yang jauh lebih terkendali.



Gambar 1 Optimalisasi ekosistem komputasi kuantum
Sumber: data diolah, 2026

Kesimpulan

Meskipun saat ini komputer kuantum terlihat "boros" karena sistem pendinginnya, secara teoretis, untuk masalah-masalah seperti simulasi molekul, komputer kuantum ribuan kali lebih efisien secara energi dibandingkan jika kita mencoba memaksakan superkomputer klasik untuk menyelesaikan tugas yang sama. Hasil studi menunjukkan bahwa inovasi pada kabel koaksial superkonduktor dan kontrol optik dapat mengurangi beban panas secara drastis. Selain itu, penerapan algoritma hybrid seperti VQE dan QAOA serta peningkatan kesetiaan gerbang (*gate fidelity*) terbukti mampu menekan waktu operasional dan jumlah pengulangan komputasi, yang secara langsung meningkatkan efisiensi energi sistem. Studi ini menyimpulkan bahwa diversifikasi arsitektur berbasis fotonik dan ion terperangkap menawarkan jalur yang lebih berkelanjutan bagi integrasi teknologi kuantum dan AI di masa depan.

Referensi

- Bluefors. (2026). Modular Cryogenic Platform for Scalable Quantum Computing Infrastructure. Bluefors Technical White Paper
- Google Quantum AI. (2026). Scaling Logical Qubits: The Path to Below-Threshold Gate Error Rates. Nature. ISSN: 1476-4687
- IBM Quantum. (2025). Advancements in Error Mitigation: Achieving Practical Quantum Utility with PEC and ZNE. IBM Research Report..
- IonQ. (2026). Achieving High-Fidelity All-to-All Connectivity in Trapped-Ion Architectures. White Paper Series..
- McClean, J. R., et al. (2025). Autonomous Pulse Shaping for High-Fidelity Quantum Gates via Reinforcement Learning. Nature Communications. ISSN: 2041-1723
- PsiQuantum. (2025). Scalable Photonic Quantum Computing: Progress in Room-Temperature Optical Circuits. Technical Report.
- Quantinuum. (2025). The QCCD Architecture: Scaling to Millions of High-Fidelity Qubits. Quantinuum Roadmap 2025.
- Svore, M., et al. (2026). Sustainable Generative AI and Quantum Computing: Environmental Impact Assessment. Frontiers in Sustainability. ISSN: 2673-4524
- Tilly, J., et al. (2025). The State of Variational Quantum Algorithms in Industrial Applications. Nature Reviews Physics. ISSN: 2522-5820
- World Economic Forum. (2026). Scaling Quantum Computing for Maximum Energy Efficiency. Insight Report.