

TINJAUAN PERKEMBANGAN KOMPUTASI KUANTUM PADA PLATFORM CLOUD: PELUANG, TANTANGAN, DAN ARAH MASA DEPAN

Heru Triana^{1*}, Arip Solehudin², Aditya Rizky Darmawan³

^{1,2,3}Program Studi Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Singaperbangsa Karawang; Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361; (0267) 641177

Keywords:

quantum computing, quantum cloud computing, cloud computing, systematic literature review

Correspondent Email:

2110631170022@student.ac.id

Abstrak. Komputasi kuantum berbasis cloud merupakan paradigma baru yang menggabungkan sumber daya kuantum dengan infrastruktur cloud klasik, memungkinkan akses luas tanpa kebutuhan investasi besar pada perangkat keras. Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) dengan pendekatan kualitatif deskriptif untuk mengidentifikasi dan mensintesis dua studi utama terkait integrasi dan perkembangan teknologi komputasi kuantum dalam lingkungan *cloud computing*. Analisis dilakukan melalui tiga tahap: analisis konten, perbandingan tematik, dan sintesis kritis dengan fokus pada arsitektur, kinerja, keamanan, serta arah masa depan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur hibrida kuantum-klasik berbasis kontainer dan orkestrasi terdistribusi menjadi komponen kunci dalam pengembangan *quantum cloud*. Model *Quantum-as-a-Service* (QaaS) berpotensi menurunkan hambatan adopsi, terutama pada aplikasi seperti simulasi material, optimisasi kombinatorial, dan kriptografi kuantum. Namun, tantangan signifikan masih ada pada keterbatasan perangkat keras, kompleksitas integrasi sistem, serta kekurangan sumber daya manusia. Arah pengembangan ke depan mencakup standarisasi lintas vendor, *co-design* algoritma dan perangkat keras, serta transisi menuju kriptografi pasca-kuantum. Studi ini memberikan pemahaman menyeluruh tentang potensi, kendala, dan arah riset lanjutan dalam *quantum cloud computing*.



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. Cloud-based quantum computing represents a transformative paradigm that integrates quantum resources with classical cloud infrastructures, enabling broad access without the need for costly hardware investments. This study employs a systematic literature review (SLR) using a descriptive qualitative approach to identify and synthesize findings from two major studies on the integration and development of quantum computing within cloud environments. The analysis follows three stages: content analysis, thematic comparison, and critical synthesis, focusing on architecture, performance, security, and future directions. The results indicate that hybrid quantum-classical architectures based on containerization and distributed orchestration serve as key components in quantum cloud development. The *Quantum-as-a-Service* (QaaS) model has the potential to lower adoption barriers, particularly in applications such as material simulation, combinatorial optimization, and quantum cryptography. However, significant challenges remain, including hardware limitations, system integration complexity, and a shortage of skilled human resources. Future directions involve cross-vendor standardization, algorithm-hardware co-design approaches, and the transition toward post-quantum cryptography frameworks. This study provides a comprehensive understanding of the

potential, technical challenges, and research needs in quantum cloud computing, which may shape the future of computation and broaden access to quantum applications across scientific and industrial domains.

1. PENDAHULUAN

Komputasi kuantum, yang berlandaskan prinsip-prinsip mekanika kuantum, menjanjikan revolusi kemampuan komputasi dengan memungkinkan penyelesaian masalah yang tak terjangkau oleh komputer klasik. Berbeda dari bit klasik, bit kuantum (qubit) dapat berada dalam keadaan superposisi, sehingga komputer kuantum dapat memproses informasi dalam jumlah besar secara paralel dan menangani tugas kompleks dalam kriptografi, optimisasi, pembelajaran mesin, dan simulasi ilmiah [1]–[4]. Namun, penerapan praktis komputer kuantum terkendala oleh biaya tinggi, sensitivitas terhadap faktor lingkungan, dan kebutuhan akan lingkungan terisolasi khusus, sehingga akses langsung menjadi menantang bagi sebagian besar pengguna dan organisasi [2], [4].

Integrasi komputasi kuantum dengan platform cloud disebut komputasi kuantum berbasis cloud muncul sebagai paradigma transformasional untuk mendemokratisasi akses ke sumber daya kuantum. Layanan kuantum berbasis cloud memungkinkan pengguna memanfaatkan unit pemrosesan kuantum (QPU) secara jarak jauh, sering melalui model hibrida kuantum-klasik, tanpa harus memiliki atau memelihara perangkat keras kuantum secara fisik [1], [5]–[7]. Penyedia teknologi utama, termasuk IBM, Google, dan Rigetti, telah mengembangkan platform kuantum yang dapat diakses melalui cloud, menawarkan berbagai model pemrograman, perangkat pengembangan perangkat lunak, dan simulator untuk mendukung beragam kebutuhan pengguna [1], [4], [7].

Komputasi kuantum berbasis cloud tidak hanya menurunkan hambatan masuk bagi riset dan adopsi enterprise, tetapi juga mempercepat inovasi melalui pengembangan kolaboratif, prototyping cepat, dan eksperimen yang dapat diskalakan. Sifat hibrida aplikasi kuantum berbasis cloud yang menggabungkan pemrosesan klasik dan kuantum memungkinkan eksekusi beban kerja kompleks, seperti simulasi molekuler, pemodelan

finansial, dan pembelajaran mesin, yang berpotensi memperoleh percepatan kuantum [5], [8], [6], [7]. Selain itu, elastisitas dan model biaya pay-as-you-go pada komputasi cloud selaras dengan sifat beban kerja kuantum yang intensif sumber daya dan eksperimental [6], [4].

Terlepas dari potensinya, komputasi kuantum berbasis cloud menghadapi tantangan signifikan. Tantangan tersebut mencakup keterbatasan perangkat keras (seperti stabilitas qubit dan laju kesalahan), manajemen sumber daya, keamanan dan privasi, interoperabilitas, serta kebutuhan akan model pemrograman kuantum yang andal [1], [8]–[10], [2], [10]. Pengembangan kriptografi pasca-kuantum, kecerdasan buatan yang ditingkatkan kuantum, dan arsitektur hibrida yang dapat diskalakan merupakan area riset aktif yang ditujukan untuk mengatasi hambatan ini dan mewujudkan potensi penuh platform cloud kuantum [11], [1], [9], [10].

Singkatnya, konvergensi komputasi kuantum dan teknologi cloud merepresentasikan lompatan penting dalam ilmu komputasi, menawarkan peluang tak tertandingi bagi inovasi sekaligus menghadirkan tantangan teknis dan operasional yang unik. Evolusi berkelanjutan platform cloud kuantum berpotensi membentuk masa depan komputasi, memperluas akses, dan memupuk aplikasi baru di berbagai domain ilmiah dan industri [1], [5], [2], [3], [4].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Quantum Computing

Komputasi kuantum adalah paradigma komputasi yang memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika kuantum yang paling menonjol adalah superposisi, entanglement, dan interferensi kuantum untuk memproses informasi dengan cara yang fundamental berbeda dibandingkan komputasi klasik [12]. Definisi formal menekankan bahwa komputasi kuantum merupakan paradigma pada perpotongan ilmu komputer, matematika, dan fisika, menggunakan hukum mekanika

kuantum untuk mencapai efisiensi komputasi tinggi [13], [14].

Dasar komputasi kuantum dibangun pada manipulasi (quantum bit), yang berbeda dari bit klasik yang hanya ada dalam keadaan 0 atau 1, qubit dapat berada dalam superposisi dari kedua keadaan secara bersamaan. Sifat ini, bersama dengan entanglement (di mana qubit menjadi berkorelasi dengan cara yang tidak mungkin dicapai secara klasik) dan interferensi kuantum, memungkinkan komputer kuantum melakukan komputasi tertentu lebih efisien daripada komputer klasik [12], [13], [15].

2.2. Cloud Computing

Komputasi cloud secara luas didefinisikan sebagai model untuk memungkinkan akses jaringan yang nyaman, sesuai permintaan ke kumpulan sumber daya komputasi yang dapat dikonfigurasi seperti jaringan, server, penyimpanan, aplikasi, dan layanan yang dapat dengan cepat disediakan dan dilepaskan dengan upaya manajemen minimal atau interaksi penyedia layanan [16]. Definisi yang ditetapkan oleh National Institute of Standards and Technology (NIST) ini merupakan yang paling sering dikutip dan fundamental dalam bidang ini [16], [17], [18].

Menurut NIST dan literatur dasar, komputasi cloud dicirikan oleh lima fitur esensial: (1) Layanan mandiri sesuai permintaan: pengguna dapat menyediakan sumber daya komputasi secara otomatis, tanpa interaksi manusia dengan penyedia layanan; (2) Akses jaringan luas: layanan tersedia melalui jaringan dan diakses melalui mekanisme standar; (3) Pooling sumber daya: sumber daya penyedia dikumpulkan untuk melayani beberapa konsumen menggunakan model multi-tenant; (4) Elastisitas cepat: kemampuan dapat disediakan dan dilepaskan secara elastis, memperluas dengan cepat ke luar dan ke dalam; dan (5) Layanan terukur: penggunaan sumber daya dipantau, dikontrol, dan dilaporkan, memberikan transparansi untuk penyedia dan konsumen [16], [17], [19].

2.3. Quantum Cloud Computing

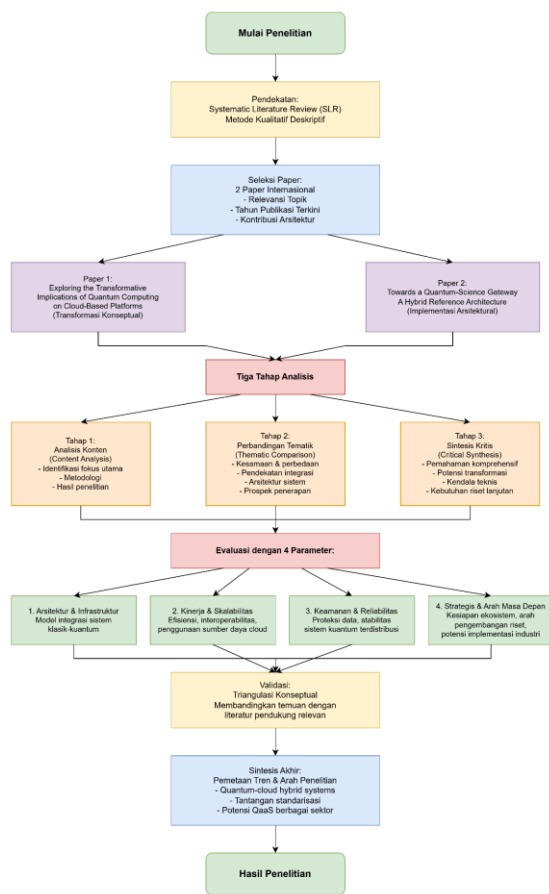
Komputasi kuantum berbasis cloud (Quantum Cloud Computing, QCC) didefinisikan sebagai integrasi sumber daya

komputasi kuantum dengan infrastruktur cloud klasik, memungkinkan akses jarak jauh, dapat diskalakan, dan demokratis ke perangkat keras kuantum dan simulator. Paradigma ini berkembang dengan cepat untuk mengatasi tantangan keterbatasan ketersediaan perangkat keras kuantum, model pemrograman yang kompleks, dan kebutuhan akan aksesibilitas luas [20], [21].

QCC dikonseptualisasikan sebagai model di mana prosesor kuantum (QPUs) dibuat dapat diakses melalui platform cloud, memungkinkan pengguna untuk mengeksekusi algoritme kuantum tanpa memiliki atau memelihara perangkat keras kuantum. Model ini memperluas komputasi cloud tradisional dengan menggabungkan perangkat kuantum ke dalam pusat data yang dapat diakses melalui internet, sering melalui model utilitas pay-per-use atau "pay-per-shot" [22], [23], [24]. Pendekatan ini bertujuan untuk menurunkan hambatan masuk untuk eksperimen dan penelitian dengan menyediakan akses sesuai permintaan ke sumber daya kuantum [25], [23], [24].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode systematic literature review (SLR). Tujuan utama pendekatan ini adalah untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan dari dua studi utama yang membahas integrasi dan perkembangan teknologi komputasi kuantum dalam lingkungan komputasi awan (cloud computing). Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh terhadap arah perkembangan, peluang, serta tantangan yang muncul dari integrasi kedua teknologi tersebut. Untuk dapat melihat rangkaian review, dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Tahapan *review*

Sumber utama dalam penelitian ini adalah dua paper ilmiah internasional yang dipilih berdasarkan relevansi topik, tahun publikasi terkini, dan kontribusinya terhadap pengembangan arsitektur komputasi kuantum berbasis cloud. Paper pertama (Exploring the Transformative Implications of Quantum Computing on Cloud-Based Platforms)[11] difokuskan pada dampak transformatif dan implikasi teknologi kuantum dalam infrastruktur cloud. Sementara itu, paper kedua (Towards a Quantum-Science Gateway)[25] mengusulkan arsitektur referensi hibrida yang memungkinkan integrasi kemampuan komputasi kuantum dalam layanan cloud. Kedua paper tersebut dipilih karena mewakili dua sudut pandang penting: transformasi konseptual dan implementasi arsitektural.

Prosedur analisis dilakukan dalam tiga tahap utama. Pertama, dilakukan analisis konten (content analysis) untuk mengidentifikasi fokus utama, metodologi, dan

hasil dari masing-masing paper. Kedua, dilakukan perbandingan tematik (thematic comparison) untuk menemukan kesamaan dan perbedaan antara kedua studi, khususnya dalam hal pendekatan integrasi, arsitektur sistem, serta prospek penerapan cloud-based quantum computing. Ketiga, dilakukan sintesis kritis (critical synthesis) untuk menyusun pemahaman komprehensif mengenai arah masa depan teknologi ini, meliputi potensi transformasi, kendala teknis, dan kebutuhan riset lanjutan.

Evaluasi dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter utama yang disesuaikan dengan tujuan penelitian, yaitu:

- (1) Aspek Arsitektur dan Infrastruktur, mencakup model integrasi antara sistem klasik dan kuantum;
- (2) Aspek Kinerja dan Skalabilitas, meliputi efisiensi, interoperabilitas, dan penggunaan sumber daya cloud;
- (3) Aspek Keamanan dan Reliabilitas, berkaitan dengan tantangan proteksi data dan stabilitas sistem kuantum di lingkungan terdistribusi; dan
- (4) Aspek Strategis dan Arah Masa Depan, yang berfokus pada kesiapan ekosistem, arah pengembangan riset, serta potensi implementasi industri.

Hasil analisis dan perbandingan kemudian divalidasi melalui triangulasi konseptual, yakni dengan membandingkan hasil temuan dari kedua paper dengan literatur pendukung lain yang relevan dalam bidang quantum cloud computing. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa kesimpulan yang diambil tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki landasan teoretis yang kuat. Dari hasil sintesis akhir, diperoleh pemetaan mengenai tren dan arah penelitian masa depan, khususnya terkait pengembangan quantum-cloud hybrid systems, tantangan standarisasi, serta potensi penggunaan Quantum-as-a-Service (QaaS) pada berbagai sektor industri.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

klasik-kuantum dan meminimalkan penundaan eksekusi yang berasal dari infrastruktur cloud kuantum.

4.3 Keamanan dan Kriptografi Pasca-Kuantum

Pembahasan mengenai kekuatan AES-256 terhadap serangan kuantum serta kebutuhan migrasi skema asimetris seperti RSA dan ECC menuju skema berbasis kisi dinilai akurat pada garis besarnya. Penulis juga menyoroti pentingnya penggunaan Quantum Random Number Generator (QRNG) dan standar transisi hibrida. Namun, kesiapan implementasi sangat bergantung pada standar yang ditetapkan oleh NIST, evaluasi performa dalam jaringan produksi, serta manajemen kunci lintas sistem lama. Aspek seperti latensi tambahan dan kompatibilitas harus diukur secara menyeluruh dari awal hingga akhir.

Selain isu kriptografi pasca-kuantum, studi *Quantum-Science Gateway* juga menyoroti reliabilitas lingkungan komputasi terdistribusi ketika mengintegrasikan akses ke QPU melalui arsitektur kontainer dan orkestrasi Kubernetes. Implementasi multi-container dengan pemisahan layanan gateway, JupyterLab, dan node komputasi klasik menuntut pengelolaan isolasi lingkungan yang ketat serta penanganan dependensi paket yang kompleks agar sistem tetap konsisten dan bebas konflik. Selain itu, arsitektur tersebut menampilkan kebutuhan akan dukungan multi-tenancy yang mampu menjaga stabilitas proses dan memastikan bahwa pekerjaan pengguna berbeda tidak saling mengganggu. Walaupun fokus utama penelitian bukan pada kriptografi, implikasi keamanan tetap muncul dalam konteks kontrol akses, konsistensi lingkungan eksekusi, serta mitigasi gangguan atau kegagalan service akibat dependensi dan koordinasi antar kontainer. Dengan demikian, selain kesiapan algoritma pasca-kuantum, adopsi infrastruktur hybrid quantum-cloud juga mensyaratkan ketahanan operasional, manajemen akses yang terstandarisasi, serta mekanisme pemulihan dan monitoring untuk meminimalkan gangguan performa dan risiko kegagalan sistem secara menyeluruh.

4.4 Kesiapan Organisasi dan Biaya

Naskah ini menyoroti tantangan yang dihadapi organisasi dalam hal sumber daya manusia, biaya infrastruktur kriogenik, dan rentang waktu implementasi yang panjang. Hal ini konsisten dengan pengalaman industri, di mana sebagian besar inisiatif saat ini masih berada pada tahap eksplorasi, pengembangan kompetensi, dan integrasi antarmuka. Penekanan pada arsitektur hibrida dan orkestrasi beban kerja menjadi poin kuat yang relevan secara praktis bagi perusahaan.

Selain tantangan kesiapan organisasi dan investasi jangka panjang, studi *Quantum-Science Gateway* memperlihatkan bahwa arah pengembangan platform kuantum di cloud juga dipengaruhi oleh kesiapan ekosistem perangkat lunak dan model layanan terstandarisasi. Implementasi gateway berbasis kontainer dan orkestrasi terdistribusi menegaskan bahwa perkembangan teknologi kuantum tidak hanya bergantung pada kapasitas qubit atau perangkat keras, tetapi juga pada kemampuan platform untuk menyediakan antarmuka lintas vendor, integrasi workflow, serta dukungan *multi-user* pada skala penelitian maupun industri. Temuan tersebut selaras dengan tren menuju *Quantum-as-a-Service (QaaS)*, integrasi antara superkomputasi klasik dan QPU, serta pengembangan standar interoperabilitas untuk perangkat lunak dan pipeline eksekusi. Dengan demikian, kesiapan masa depan tidak semata berbicara tentang biaya dan sumber daya manusia, tetapi juga mengenai kematangan ekosistem pengembangan, mekanisme orkestrasi hybrid yang stabil, serta keberlanjutan dukungan platform agar transisi dari tahap riset ke penerapan industri dapat dilakukan secara bertahap dan terukur.

4.5 Peluang, Tantangan, dan Arah Masa Depan

Komputasi kuantum berbasis cloud membuka berbagai peluang transformasional yang dapat dimanfaatkan oleh berbagai sektor industri dan penelitian. Peluang-peluang tersebut meliputi:

- Beban kerja spesifik seperti simulasi material atau kimia, optimisasi kombinatorial, dan kriptografi

kuantum.

- Model layanan berbasis cloud seperti quantum-as-a-service yang memungkinkan eksperimen dengan biaya awal yang lebih rendah.
- Keamanan melalui migrasi bertahap ke kriptografi pasca-kuantum dan pemanfaatan QRNG.

Meskipun menawarkan potensi besar, adopsi komputasi kuantum berbasis cloud menghadapi berbagai tantangan teknis, operasional, dan strategis yang perlu diatasi. Tantangan-tantangan tersebut mencakup:

- Keterbatasan perangkat keras seperti fidelitas, jumlah kubit, koherensi, serta biaya mitigasi dan koreksi kesalahan.
- Integrasi sistem meliputi orkestrasi hibrida, observabilitas, dan pengelolaan data sensitif lintas domain.
- Tantangan sumber daya manusia dan tata kelola, termasuk kesenjangan keterampilan, biaya tinggi, dan kepatuhan terhadap standar yang terus berkembang.

Untuk mewujudkan potensi penuh komputasi kuantum berbasis cloud, diperlukan arah pengembangan strategis yang berkelanjutan. Arah masa depan yang perlu dikembangkan meliputi:

- Pengembangan standar dan tolok ukur lintas vendor untuk beban kerja yang representatif.
- Pendekatan co-design antara algoritma dan perangkat keras dengan mempertimbangkan kebisingan sistem.
- Kerangka transisi kriptografi yang mencakup pengujian lapangan, fleksibilitas algoritma (crypto agility), dan manajemen risiko.

Artikel ini memberikan gambaran luas dan berimbang mengenai potensi serta keterbatasan komputasi kuantum pada platform cloud. Kontribusi terkuatnya terletak pada upaya mengarusutamakan arsitektur hibrida serta menekankan urgensi keamanan pasca-kuantum bagi perusahaan. Untuk memperkuat validitas, naskah ini sebaiknya memperjelas metodologi tinjauan, membatasi klaim numerik hanya pada domain yang teruji, serta menambahkan perbandingan yang adil dengan model klasik sebagai baseline.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *systematic literature review* terhadap dua studi utama mengenai komputasi kuantum berbasis cloud, penelitian ini menghasilkan sejumlah kesimpulan penting. Integrasi komputasi kuantum dengan platform cloud melalui arsitektur hibrida kuantum-klasik telah berkembang menjadi paradigma utama yang memungkinkan akses demokratis terhadap sumber daya kuantum tanpa memerlukan investasi infrastruktur yang besar. Pendekatan berbasis kontainer dengan orkestrasi terdistribusi, seperti Docker dan Kubernetes, terbukti efektif dalam mengintegrasikan berbagai *software development kit* (SDK) kuantum—termasuk Qiskit, Cirq, Amazon Braket, dan D-Wave Ocean—ke dalam satu lingkungan terpadu. Komputasi kuantum berbasis cloud menawarkan peluang signifikan untuk beban kerja spesifik seperti simulasi material dan kimia, optimisasi kombinatorial, serta kriptografi kuantum, melalui model layanan *Quantum-as-a-Service* (QaaS) yang menurunkan hambatan adopsi. Namun demikian, sejumlah tantangan utama masih dihadapi, antara lain keterbatasan perangkat keras (fidelitas qubit, koherensi, dan jumlah qubit), kompleksitas integrasi sistem (orkestrasi hibrida dan observabilitas), serta kesenjangan sumber daya manusia dan tata kelola.

Dari sisi keunggulan, penelitian ini menonjol karena pendekatannya yang menggunakan *systematic literature review* untuk menghasilkan sintesis komprehensif dari dua perspektif penting, yakni transformasi konseptual dan implementasi arsitektural. Analisis multi-aspek yang mencakup dimensi arsitektur, kinerja, keamanan, dan strategi

memberikan pemahaman yang holistik terhadap perkembangan *quantum cloud computing*. Selain itu, validasi melalui triangulasi konseptual dengan literatur pendukung memperkuat landasan teoretis dari temuan penelitian ini.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Ruang lingkup yang hanya mencakup dua studi utama membuat generalisasi temuan perlu dilakukan dengan kehati-hatian. Analisis performa kuantitatif masih terbatas karena kondisi teknologi kuantum yang masih bersifat eksperimental. Selain itu, perbandingan dengan model klasik sebagai *baseline* dapat diperkuat lebih lanjut untuk memberikan konteks yang lebih jelas terhadap keunggulan relatif komputasi kuantum.

Ke depan, terdapat berbagai arah pengembangan yang dapat dilakukan. Salah satunya adalah pengembangan standar dan tolok ukur lintas vendor untuk beban kerja representatif dalam lingkungan *quantum cloud computing*. Penelitian lanjutan juga perlu diarahkan pada pendekatan *co-design* antara algoritma dan perangkat keras dengan mempertimbangkan karakteristik kebisingan sistem. Selain itu, pengembangan kerangka transisi kriptografi pasca-kuantum yang mencakup pengujian lapangan, *crypto agility*, dan manajemen risiko menjadi aspek penting untuk memastikan keamanan di era komputasi kuantum. Eksplorasi lebih lanjut terhadap model *Quantum-as-a-Service* di berbagai sektor industri dengan evaluasi performa dan biaya yang lebih komprehensif juga perlu dilakukan. Terakhir, penelitian tentang optimisasi orkestrasi hibrida diharapkan dapat meminimalkan latensi dan *overhead* dalam eksekusi beban kerja kuantum-klasik terdistribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Nguyen, P. Krishnan, D. Krishnaswamy, M. Usman, and R. Buyya, "Quantum Cloud Computing: A Review, Open Problems, and Future Directions," arXiv, abs/2404.11420, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2404.11420.
- [2] M. Golec, E. Hatay, M. Golec, M. Uyar, M. Golec, and S. Gill, "Quantum Cloud Computing: Trends and Challenges," Journal of Economy and Technology, 2024. doi: 10.1016/j.ject.2024.05.001. (Preprint: arXiv:2404.19612)
- [3] F. Leymann, J. Barzen, M. Falkenthal, D. Vietz, B. Weder, and K. Wild, "Quantum in the Cloud: Application Potentials and Research Opportunities," in Proc. 9th Int. Conf. on Cloud Computing and Services Science (CLOSER), 2020, pp. 9–24. doi: 10.5220/0009819800090024.
- [4] A. Zhahir et al., "Quantum Computing in The Cloud - A Systematic Literature Review," Int. J. of Electrical and Computer Engineering Systems, vol. 15, no. 2, 2024. doi: 10.32985/ijeces.15.2.7.
- [5] S. Somalraju, "The rise of quantum computing in cloud: A new frontier for cloud services," World Journal of Advanced Research and Reviews, 2025. doi: 10.30574/wjarr.2025.26.1.1108.
- [6] R. Kamat and P. Pawar, "Quantum Computing and its Implications for Cloud-Based Communication Services," International Journal of Research Publication and Reviews, 2024. doi: 10.55248/gengpi.5.0324.0738.
- [7] P. Karalekas, N. Tezak, E. Peterson, C. Ryan, M. Silva, and R. Smith, "A quantum-classical cloud platform optimized for variational hybrid algorithms," Quantum Science and Technology, vol. 5, 2020. doi: 10.1088/2058-9565/ab7559.
- [8] L. Sondinti, S. Kalisetty, T. Polineni, and N. Abhireddy, "Towards Quantum-Enhanced Cloud Platforms: Bridging Classical and Quantum Computing for Future Workloads," Journal for ReAttach Therapy and Developmental Diversities, 2023. doi: 10.53555/jrtdd.v6i10s(2).3347.
- [9] M. Yalla, "Quantum Cloud Computing for Next-Generation IT Infrastructures: Challenges, Opportunities, and Future Trends," World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, 2023. doi: 10.30574/wjaets.2023.10.2.0313.
- [10] S. Sarangi and S. Kanungo, "Quantum computing integration with multi-cloud architectures: enhancing computational efficiency and security in advanced cloud environments," World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, 2024. doi: 10.30574/wjaets.2024.12.2.0319.
- [11] S. A. Shukkoor, "Exploring the Transformative Implications of Quantum Computing on Cloud-Based Platforms," International Journal of Advanced Research in Science,

- Communication and Technology, 2025. doi: 10.48175/ijarset-24445.
- [12] A. Fahmy, "Quantum computing," *Reports on Progress in Physics*, vol. 61, 1997. DOI: 10.1088/0034-4885/61/2/002.
- [13] R. Juárez-Ramírez et al., "The Foundations of Quantum Computing and Their Relation to Software Engineering," *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2024. DOI: 10.15514/ispras-2024-36(1)-6.
- [14] Z. Li, "Analysis of the Principles of Quantum Computing and State-of-the-Art Applications," *Theoretical and Natural Science*, 2024. DOI: 10.54254/2753-8818/41/2024ch0155.
- [15] A. Lopatnikova, M. Tran, and S. Sisson, "An introduction to quantum computing for statisticians and data scientists," *Foundations of Data Science*, 2021. DOI: 10.3934/fods.2024013
- [16] P. Mell and T. Grance, "The NIST Definition of Cloud Computing," *NIST Special Publication 800-145*, 2011. DOI: 10.6028/nist.sp.800-145.
- [17] P. Gupta and N. Sehgal, "Cloud Computing Concepts," *Introduction to Machine Learning in the Cloud with Python*, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-71270-9\ 4.
- [18] N. Caithness, M. Drescher, and D. Wallom, "Can functional characteristics usefully define the cloud computing landscape and is the current reference model correct?" *Journal of Cloud Computing*, vol. 6, pp. 1--13, 2017. DOI: 10.1186/s13677-017-0084-1.
- [19] K. Hon, C. Millard, and J. Singh, "Cloud Technologies and Services," *Cloud Computing Law*, 2021. DOI: 10.1093/oso/9780198716662.003.0001
- [20] H. Nguyen, P. Krishnan, D. Krishnaswamy, M. Usman, and R. Buyya, "Quantum Cloud Computing: A Review, Open Problems, and Future Directions," *arXiv:2404.11420*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.11420.
- [21] M. Golec et al., "Quantum Cloud Computing: Trends and Challenges," *Journal of Economy and Technology*, 2024. DOI: 10.1016/j.ject.2024.05.001. (Preprint: arXiv:2404.19612)
- [22] P. Karalekas et al., "A quantum-classical cloud platform optimized for variational hybrid algorithms," *Quantum Science and Technology*, vol. 5, 2020. DOI: 10.1088/2058-9565/ab7559.
- [23] H. Nguyen, M. Usman, and R. Buyya, "QFaaS: A Serverless Function-as-a-Service Framework for Quantum Computing," *arXiv:2205.14845*, 2022. DOI: 10.1016/j.future.2024.01.018.
- [24] A. Ahmad, A. Altamimi, and J. Aqib, "A Reference Architecture for Quantum Computing as a Service," *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci.*, vol. 36, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.04578.
- [25] A. Marosi, A. Farkas, T. Máray, and R. Lovas, "Toward a Quantum-Science Gateway: A Hybrid Reference Architecture Facilitating Quantum Computing Capabilities for Cloud Utilization," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 143913-143924, 2023. DOI: 10.1109/access.2023.3342749.