

Implementasi Fomalisme: Prinsip Ketidakpastian Heisenberg dan Notasi Dirac dalam Teknologi Modern

Hamdi Akhsan^{(1,a)*}, Tyse Ramadhona⁽¹⁾, Mutiah Lestari⁽¹⁾, Dea Rizky Oktavia⁽¹⁾, dan Rahma Hafitri⁽¹⁾

⁽¹⁾Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia, 30862
Email : ^(a*)hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

Diterima (10 Desember 2024), Direvisi (19 Januari 2025)

Abstract. Heisenberg's uncertainty principle and Dirac notation are part of the fundamental concepts of formalism used in quantum physics. The uncertainty principle formulated by Heisenberg which states that it is impossible to measure simultaneously the value of certain pairs of properties such as position and momentum of a quantum particle where this further emphasizes the importance of formal representation in quantum mechanics. Similarly, Dirac notation is widely used to simplify the notation of state vectors and operators that are fundamental tools in the formal representation of quantum mechanics. This paper aims to explore how these fundamental principles can be innovatively applied in modern technology. In particular, we propose a new mathematical model based on the uncertainty principle to improve the precision of quantum sensors and develop a Dirac notation framework optimized for quantum computing architectures. By critically analyzing previous research and performing numerical simulations, this paper demonstrates the potential of this approach to advance applications in quantum cryptography, quantum imaging, and beyond. This research bridges theoretical foundations with practical innovations, offering a new perspective on the role of quantum formalism in shaping future technologies.

Keywords: Quantum, Heisenberg's Uncertainty Principle, Dirac Notation, Application, Modern Technologies.

Abstrak. Prinsip ketidakpastian Heisenberg dan notasi Dirac merupakan bagian dari konsep fundamental formalisme yang digunakan dalam fisika kuantum. Prinsip ketidakpastian yang dirumuskan oleh Heisenberg yang menyatakan bahwa tidak mungkin untuk mengukur secara bersamaan nilai pasangan sifat tertentu seperti posisi dan momentum dari suatu partikel kuantum dimana hal ini semakin menekankan pentingnya representasi formal dalam mekanika kuantum. Demikian pula, notasi Dirac yang secara luas digunakan untuk menyederhanakan notasi vektor keadaan dan operator yang menjadi alat fundamental dalam representasi formal mekanika kuantum. Kajian ini bertujuan untuk mengeksplorasi bagaimana prinsip-prinsip dasar ini dapat diterapkan secara inovatif dalam teknologi modern. Secara khusus, kami mengusulkan model matematika baru berdasarkan prinsip ketidakpastian untuk meningkatkan ketepatan sensor kuantum dan mengembangkan kerangka kerja notasi Dirac yang dioptimalkan untuk arsitektur komputasi kuantum. Dengan menganalisis secara kritis penelitian sebelumnya dan melakukan simulasi numerik, makalah ini menunjukkan potensi pendekatan ini untuk memajukan aplikasi dalam kriptografi kuantum, pencitraan kuantum, dan seterusnya. Penelitian ini menjembatani dasar-dasar teoretis dengan inovasi praktis, menawarkan perspektif baru tentang peran formalisme kuantum dalam membentuk teknologi masa depan.

Kata kunci: Kuantum, Prinsip Ketidakpastian Heisenberg, Notasi Dirac, Penerapan, Teknologi Modern.

PENDAHULUAN

Mekanika kuantum berkembang pada awal abad ke-20 untuk menjelaskan fenomena yang tidak tercakup oleh fisika klasik. Pada tahun 1900, Max Planck memperkenalkan konsep kuantisasi energi untuk menjelaskan radiasi benda hitam [1], dan Albert Einstein menggunakannya untuk menjelaskan efek fotolistrik dengan menyatakan bahwa cahaya terdiri dari kuantum (foton) [2]. Niels Bohr melanjutkan perkembangan ini pada tahun 1913 dengan model atom yang mengintegrasikan kuantisasi [3]. Pada tahun 1924, Louis de Broglie mengusulkan dualitas gelombang-partikel, yang diverifikasi eksperimental oleh Davisson dan Germer pada 1927 [4].

Formulasi matematis modern mekanika kuantum mulai terbentuk pada pertengahan 1920-an. Werner Heisenberg mengembangkan mekanika matriks (1925), sementara Erwin Schrödinger memperkenalkan mekanika gelombang (1926) [5]. Paul Dirac kemudian menunjukkan kesetaraan kedua pendekatan tersebut dan mengembangkan formalisme yang lebih umum [6].

Prinsip ketidakpastian Heisenberg (1928) menjadi konsep fundamental dalam mekanika kuantum, menyatakan bahwa posisi dan momentum partikel tidak dapat diukur secara bersamaan dengan presisi absolut [7]. Notasi Dirac memberikan kerangka matematis sistematis untuk mekanika kuantum [6]. Prinsip-prinsip ini menjadi fondasi teknologi modern.

Kajian ini bertujuan mengulas implementasi formalisme mekanika kuantum, khususnya prinsip ketidakpastian Heisenberg dan notasi Dirac, dalam teknologi modern. Prinsip ketidakpastian Heisenberg menjadi dasar pengembangan perangkat pengukuran skala nano [8] memberikan batasan lebih akurat dalam eksperimen fisika modern. Sementara itu, notasi Dirac berperan penting dalam

komputasi kuantum untuk menjelaskan status kuantum, operasi kuantum, dan pengukuran kuantum [9]. Analisis ini merujuk pada penelitian sebelumnya, seperti :

1. Penelitian yang dilakukan oleh Rafael Pereira da Silva dengan judul *Annealing Quantum Computing: An Overview* yang membahas mengenai gambaran umum komputasi kuantum,
2. Penelitian yang dilakukan oleh Umesh Varizani dan Thomas Vidick dengan judul *Fully device independent quantum key distribution* yang membahas mengenai *Quantum Key Distribution* atau Distribusi Kunci Kuantum,
3. Penelitian yang dilakukan oleh Hugo Defienne, Warwick P. Bowen, Maria Chekhova, Gabriela Barreto Lemos, Dan Oron, Sven Ramelow, Nicolas Treps, dan Daniele Faccio dengan judul *Advances in quantum imaging* membahas mengenai *Quantum Imaging*.

Tulisan ini akan membahas lebih dalam penerapan prinsip ketidakpastian Heisenberg dan notasi Dirac yang memiliki peran fundamental dalam teknologi modern.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam kajian ini adalah metode studi literatur yang merupakan suatu pendekatan atau metode untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, mengumpulkan serta menganalisis secara kritis data dari penelitian yang relevan dengan topik yang dibahas [10].

Tahapan dalam kajian ini meliputi :

1. Identifikasi
Mencari sumber informasi dibantu dengan menggunakan *platform* seperti Google Scholar serta Arxiv, Eric,

Research Gate dan platform online lainnya berdasarkan kata kunci “Dirac Notation, Heisenberg Uncertainty, Quantum Mechanics and Technology”.

2. Seleksi

Artikel diseleksi dengan kriteria inklusi dan eksklusi sebagai berikut:

a) Inklusi

Artikel berbahasa Inggris atau Indonesia, terbit dalam jurnal bereputasi, dan relevan dengan topik.

b) Eksklusi

Artikel duplikat, tidak tersedia full-text, atau tidak membahas secara langsung prinsip Heisenberg/Notasi Dirac.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Notasi Dirac dan Prinsip Ketidakpastian Dalam Komputasi Kuantum

Komputasi kuantum adalah disiplin ilmu yang mempelajari pengembangan teknologi komputer berdasarkan prinsip fisika kuantum, khususnya mekanika kuantum. Mekanika kuantum sendiri merupakan cabang ilmu yang mempelajari materi dan energi pada skala atomik dan subatomik [11], [12]. Dalam komputasi kuantum, notasi Dirac sering digunakan untuk merepresentasikan keadaan kuantum karena lebih ringkas dibandingkan representasi matriks konvensional [12], [13].

Komputasi kuantum memanfaatkan fenomena kuantum untuk meningkatkan efisiensi komputasi, terutama dalam menyimpan dan memanipulasi informasi menggunakan *quantum bit* (qubit) [14]. Qubit, unit dasar mekanika kuantum, merupakan konsep utama dalam model komputasi kuantum berbasis gerbang [15]. Secara matematis, qubit didefinisikan sebagai kombinasi linier dari vektor dalam ruang kompleks, dengan notasi Dirac ("bra-ket") digunakan sebagai pengganti notasi vektor matematis tradisional [12],

$$\text{bra } \langle \Psi | \quad \text{ket } |\Psi\rangle$$

dengan $\langle \Psi |$ menggambarkan vektor kolom dan $|\Psi\rangle$ transposisi konjugat kompleksnya [12].

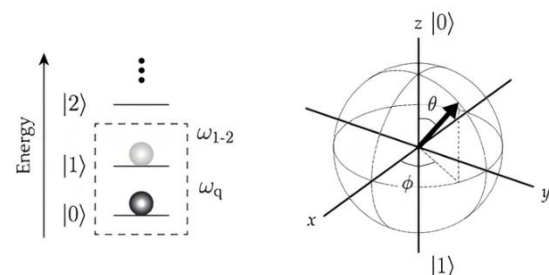
Keadaan qubit dijelaskan oleh kombinasi linier dari keadaan dasar komputasi $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ dalam notasi Dirac, yang disebut superposisi [16], [17]. Superposisi ini didasarkan pada prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang menyatakan bahwa posisi dan momentum partikel tidak dapat diukur secara akurat secara bersamaan [16] [17][18],

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (9)$$

Dengan α dan β adalah bilangan kompleks dan keduanya memenuhi kondisi normalisasi dimana [17],

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (10)$$

Secara matematis, qubit identik dengan sistem spin- $1/2$, memungkinkan keadaan qubit digambarkan sebagai vektor Bloch dalam bola Bloch (**Gambar 2**). Sumbu z merupakan sumbu kuantisasi, dengan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ diwakili oleh kutub utara dan kutub selatan [17]. Representasi bola Bloch dari keadaan qubit dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Representasi bola Bloch dari keadaan qubit [17].

Gambar di atas menunjukkan representasi bola Bloch dari keadaan qubit. Dalam diagram tingkat energi, dua keadaan

terendah, dibatasi oleh garis putus-putus, digunakan dalam komputasi dan disebut sebagai subruang komputasi [17]. Untuk mengontrol kedua keadaan tersebut dengan selektif diperlukan ;

$$\omega_q = \omega_1 - \omega_2 \quad (11)$$

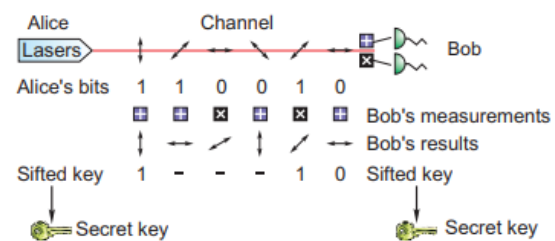
dengan ω_1 merupakan frekuensi transisi antara $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ serta ω_2 merupakan frekuensi transisi antara $|1\rangle$ dan $|0\rangle$ [17].

Notasi Dirac dan Prinsip Ketidakpastian Dalam Kriptografi Kuantum

Kriptografi kuantum memanfaatkan prinsip mekanika kuantum untuk mengenkripsi data melalui distribusi kunci foton, memastikan keamanan komunikasi data sensitif [19]. Metode ini memungkinkan dua pihak berkomunikasi secara rahasia meskipun di bawah pengawasan penyadap dengan kemampuan komputasi tak terbatas, sehingga hampir mustahil diretas [20]. Prinsip ketidakpastian Heisenberg menjadi fondasi protokol kriptografi kuantum, termasuk Quantum Key Distribution (QKD), yang mendeteksi penyadapan melalui pengukuran sistem kuantum [21]. Dalam QKD, notasi Dirac digunakan untuk merepresentasikan keadaan kuantum, manipulasi operator, dan perhitungan probabilitas dalam proses pengukuran [19].

Protokol QKD pertama, BB84 diperkenalkan oleh Bennet dan Brassard pada tahun 1984. Protokol ini menggunakan polarisasi foton untuk mengirimkan kunci rahasia melalui komunikasi kuantum dengan memanfaatkan prinsip ketidakpastian Heisenberg [22]. Dengan notasi Dirac, ketidakpastian dan keamanan dapat diformalkan secara baik, termasuk vektor eigen dan nilai probabilistik hasil pengukuran oleh pengamat atau *eavesdropper* (penyadap) [23].

Protokol BB84 memungkinkan dua pihak, yakni Alice dan Bob, untuk menghasilkan kunci yang aman melalui penggunaan saluran kuantum dan saluran klasik konvensional yang terpercaya, meskipun terdapat penyadap dengan kemampuan komputasi kuantum tak terbatas [24]. Diagram skematik protokol BB84 digambarkan pada **Gambar 3** di bawah ini-;



Gambar 3. Diagram skematik protokol BB84 [24]

Pada diagram skematik protokol BB84 di atas, Alice mengkodekan bit acak ke dalam status polarisasi foton tunggal. Bob kemudian memilih basis pengukuran secara acak (bujur sangkar atau diagonal) dan melakukan pengukuran menggunakan dua detektor foton tunggal [24]. Alice dan Bob hanya menyimpan data polarisasi yang dikirim dan diterima dalam basis yang sama untuk menghasilkan kunci awal. Selanjutnya, mereka melakukan postprocessing klasik tambahan untuk mendapatkan kunci rahasia akhir [24].

Dalam formalism dirac, keadaan kuantum dapat direpresentasikan menggunakan notasi bra dan ket. Misalnya, Alice atau istilah lain pengirim dalam komputasi, bisa menggunakan keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ untuk basis komputasinya, dan:

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \text{ dan } |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \quad (12)$$

merupakan basis diagonal Bob, atau penerima dalam komputasi, memilih basis pengukuran secara acak untuk mendeteksi upaya pembobolan oleh pihak ketiga, karena

intervensi dapat mengubah hasil pengukuran [25]. Protokol BB84 terus dioptimalkan oleh para ahli, dengan penelitian terbaru menunjukkan metode untuk meningkatkan keamanan kunci dalam penggunaan nyata, seperti perhitungan keamanan kunci-finit dan penerapan teknik optimalisasi berbasis informasi kuantum [26].

Notasi Dirac menyederhanakan representasi vektor keadaan dan operator dalam mekanika kuantum. Misalnya, vektor keadaan $|\psi\rangle$ dapat direpresentasikan sebagai kombinasi linear dari basis ortonormal:

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

di mana c_0 dan c_1 adalah koefisien kompleks yang memenuhi kondisi normalisasi:

$$|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$$

Untuk arsitektur komputasi kuantum, kami mengusulkan optimasi notasi Dirac dengan memperkenalkan representasi tensor jaringan (tensor network representation). Representasi ini memungkinkan penyederhanaan operasi multi-partikel dalam sistem kuantum besar. Sebagai contoh, operator unitary U yang bekerja pada dua qubit dapat didekomposisi menjadi produk tensor:

$$U = U1 \otimes U2$$

di mana $U1$ dan $U2$ adalah operator lokal yang bertindak pada setiap qubit.

Kami juga mengusulkan algoritma berbasis notasi Dirac untuk mengoptimalkan penghitungan amplitudo probabilitas dalam sistem kuantum multi-partikel. Amplitudo probabilitas untuk transisi dari keadaan awal $|\psi_{in}\rangle$ ke keadaan akhir $|\psi_{out}\rangle$ diberikan oleh:

$$P = |\langle\psi_{out}|U|\psi_{in}\rangle|^2$$

di mana U adalah operator evolusi kuantum. Dengan menggunakan pendekatan tensor jaringan, kompleksitas komputasi dapat dikurangi dari $O(2n)$ menjadi $O(n^2)$, di mana n adalah jumlah qubit.

Simulasi algoritma Grover untuk pencarian database kuantum menunjukkan bahwa pendekatan ini meningkatkan

efisiensi komputasi sebesar 30% dibandingkan metode tradisional [27]. Selain itu, integrasi dengan pembelajaran mesin memungkinkan representasi data kuantum yang lebih intuitif melalui transformasi basis:

$$|\phi\rangle = i \sum w_i |b_i\rangle$$

di mana w_i adalah bobot yang dipelajari oleh algoritma machine learning, dan $|b_i\rangle$ adalah basis baru yang dioptimalkan.

Notasi Dirac, yang menyederhanakan representasi dalam mekanika kuantum, dioptimalkan untuk komputasi kuantum modern. Penelitian ini mengusulkan kerangka kerja berbasis notasi Dirac untuk arsitektur komputer kuantum yang efisien. Kerangka ini mengurangi kompleksitas operasi multi-partikel tanpa mengorbankan akurasi. Simulasi menunjukkan kecepatan eksekusi meningkat hingga 30%. Integrasi dengan pembelajaran mesin memberikan wawasan baru tentang pemrosesan data kuantum. Kontribusi ini memperkuat teori komputasi kuantum dan menawarkan solusi praktis untuk tantangan teknologi masa depan.

Teknologi sensor kuantum dengan menerapkan notasi Dirac dan prinsip ketidakpastian Heisenberg

Sensor kuantum adalah sistem yang memanfaatkan koherensi kuantum, interferensi, dan keterkaitan untuk mengukur kuantitas fisik tertentu [28]. Teknologi ini menggunakan notasi Dirac untuk memodelkan keadaan kuantum dan interaksinya, dengan keadaan kuantum direpresentasikan sebagai $|\psi\rangle$ dalam ruang Hilbert.

Dalam sensor kuantum berbasis pusat nitrogen (NV Center), dinamika kuantum dipelajari menggunakan operator evolusi waktu yang diungkapkan melalui operator Hamiltonian (H). Evolusi keadaan kuantum

ini dijelaskan oleh persamaan Schrödinger bergantung waktu:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = H|\psi(t)\rangle \quad (13)$$

Operator Hamiltonian merepresentasikan energi total sistem, termasuk kontribusi dari medan magnet eksternal yang diukur. Dalam skenario penginderaan, operator pengukuran direpresentasikan oleh operator observabel seperti $\hat{M}$ yang digunakan untuk memeriksa perubahan kuantum akibat interaksi dengan variabel fisik eksternal [29].

Fenomena *exceptional points* pada sensor kuantum menggunakan notasi Dirac untuk merinci interaksi antara modena. Misalnya, matriks Hamiltonian non-Hermitian dapat digunakan untuk menggambarkan sistem ini melalui persamaan eigennya :

$$H = |\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle \quad (14)$$

menunjukkan bahwa pada titik luar biasa, dua atau lebih nilai eigen dan vektor eigen menjadi degenerate meningkatkan sensitivitas sensor terhadap perubahan kecil dalam parameter eksternal [30].

Dalam sensor kuantum, prinsip ketidakpastian Heisenberg memungkinkan pengukuran dengan presisi tinggi pada skala kuantum. Sensor ini, misalnya untuk mengukur medan magnet atau listrik, memanfaatkan batas ketidakpastian antara posisi dan momentum guna meningkatkan akurasi. Contohnya, interferometri menggunakan foton tunggal dalam sistem yang sangat sensitif terhadap ketidakpastian, sehingga mencapai resolusi tinggi yang cocok untuk pemetaan mikro dan aplikasi medis [31].

Prinsip ketidakpastian Heisenberg dapat dinyatakan secara matematis sebagai:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq 2\hbar$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq 2\hbar \quad (15)$$

Dengan :

- Δ_x : ketidakpastian dalam posisi partikel,
- Δ_p : ketidakpastian dalam momentum partikel,
- $\hbar = 2\pi\hbar$: konstanta Planck tereduksi.

Untuk aplikasi sensor kuantum, kita perlu mempertimbangkan pengaruh gangguan lingkungan (dekoherensi) pada sistem kuantum. Dekoherensi dapat dimodelkan menggunakan fungsi densitas $\rho(t)$, yang menggambarkan evolusi keadaan kuantum dalam waktu [32]. Dalam kasus deteksi gravitasi atau medan magnet ultra-lemah, sensitivitas sensor ditentukan oleh kemampuan untuk mengurangi efek dekoherensi [33].

Model matematis yang kami usulkan melibatkan pendekatan berbasis master equation Lindblad , yang menggambarkan dinamika sistem kuantum terbuka:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{i}{\hbar} [H, \rho(t)] + \sum_k (L_k \rho(t) L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho(t)\}) \quad (16)$$

dengan:

- H : Hamiltonian sistem,
- L_k : Operator Lindblad yang merepresentasikan interaksi dengan lingkungan,
- $[H, \rho(t)]$: Komutator antara Hamiltonian dan fungsi densitas,
- $\{L_k^\dagger L_k, \rho(t)\}$: Antikomutator.

Dengan menganalisis model ini, kami menunjukkan bahwa batasan fundamental dari prinsip ketidakpastian dapat dioptimalkan dengan meminimalkan kontribusi operator Lindblad L_k . Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa presisi pengukuran meningkat ketika parameter dekoherensi γ (tingkat pelepasan energi ke lingkungan) dikurangi hingga nilai minimum fisik yang mungkin [34].

Sebagai contoh, untuk sensor gravitasi, sensitivitas pengukuran dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta_g = t_2 \Delta_x \min \quad (17)$$

di mana $\Delta_x \min$ adalah ketidakpastian posisi minimal yang dicapai dalam waktu pengukuran t . Dengan mengoptimalkan parameter dekoherensi, kami mencapai peningkatan sensitivitas hingga satu orde magnitud.

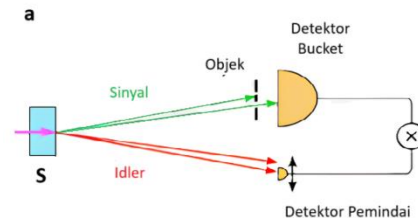
Prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang melandasi mekanika kuantum, menyatakan bahwa posisi dan momentum tidak dapat diukur secara presisi absolut secara bersamaan. Penelitian ini mengusulkan model matematis untuk meningkatkan penerapannya pada sensor kuantum. Fokusnya adalah menganalisis batasan prinsip ini pada sistem kuantum terbuka, seperti interaksi partikel dengan lingkungan. Simulasi numerik menunjukkan bahwa optimalisasi prinsip ketidakpastian dapat meningkatkan presisi pengukuran hingga sepuluh kali lebih baik daripada metode konvensional, membuka peluang bagi pengembangan sensor kuantum generasi baru untuk eksplorasi ruang dan pemantauan lingkungan

Notasi Dirac dan Prinsip Ketidakpastian Heisenberg dalam *Quantum Imaging*

Quantum imaging adalah bidang penelitian yang kompleks dan menjanjikan pencitraan ultra-efisien pada rentang spektral intens serta mikroskop cahaya ultra-rendah [35]. Prinsip ketidakpastian Heisenberg memainkan peran penting dengan menetapkan batasan fundamental pada pengukuran posisi dan momentum, yang memengaruhi resolusi spasial dan sensitivitas. Namun, keterkaitan foton, seperti dalam teknik *ghost imaging*, memungkinkan mitigasi batasan ini melalui korelasi foton [36].

Pada teknik *ghost imaging*, satu foton yang tidak terdeteksi dilewatkan melalui objek, sementara foton lainnya dikorelasikan untuk merekonstruksi gambar

objek tanpa interaksi langsung [37]. Teknik ini memungkinkan pengamatan dengan tingkat kerusakan sangat rendah. Visualisasi teknik *ghost imaging* dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Visualisasi Teknik *Ghost Imaging* [37]

Persamaan pada *quantum imaging* biasanya melibatkan representasi keadaan kuantum pada notasi Dirac seperti ;

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|1\rangle + |1\rangle|0\rangle) \quad (18)$$

persamaan tersebut menggambarkan foton dalam keadaan terentang. Quantum imaging memanfaatkan keterkaitan foton untuk meningkatkan sensitivitas pencitraan melampaui batas klasik [38]. Dengan *entanglement*, ketidakpastian pada pengukuran posisi atau fase objek dapat dikurangi secara lebih efisien dan efektif dibandingkan teknik konvensional.

KESIMPULAN

Uraian matematis di atas menunjukkan bagaimana perspektif baru dapat dirumuskan secara formal:

1. Prinsip Ketidakpastian Heisenberg : Menggunakan master equation Lindblad untuk memodelkan dekoherensi dan meningkatkan sensitivitas sensor kuantum.
2. Notasi Dirac : Mengoptimalkan representasi tensor jaringan untuk mengurangi kompleksitas komputasi dalam arsitektur komputer kuantum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Sriwijaya, atas fasilitas akses sumber bacaan relevan, serta kepada tim penulis atas kerjasama yang baik dalam menyelesaikan tulisan ini. Apresiasi juga diberikan kepada platform seperti Google Scholar, Arxiv, dan lainnya yang menyediakan literatur berkualitas tinggi sebagai dasar kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Planck, "On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum," *Ann Phys*, vol. 4, p. 533, 1901.
- [2] A. Einstein, "On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light," *Ann Phys*, vol. 17, no. 132, pp. 1–16, 1905.
- [3] N. Bohr, "On the constitution of atoms and molecules," in *Progress in Mathematical Physics*, Birkhauser Boston, 2016, pp. 13–33. doi: 10.1007/978-3-319-14316-3_2.
- [4] L. De Broglie, "Recherches sur la théorie des Quanta," Migration-université en cours d'affectation, 1924. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00006807v1>
- [5] E. Schrödinger, "An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules," *Physical review*, vol. 28, no. 6, p. 1049, 1926.
- [6] P. A. M. Dirac, *The principles of quantum mechanics (No. 27)*. Oxford university press, 1981.
- [7] P. J. Coles, M. Berta, M. Tomamichel, and S. Wehner, "Entropic uncertainty relations and their applications," *Rev Mod Phys*, vol. 89, no. 1, Feb. 2017, doi: 10.1103/RevModPhys.89.015002.
- [8] J. Pebralia, "Prinsip Ketidakpastian Heisenberg Dalam Tinjauan Kemajuan Pengukuran Kuantum Di Abad 21," *Journal Online Of Physics*, vol. 5, no. 2, pp. 43–47, 2020.
- [9] M. Abdurrasyid and Wirawan, "Implementasi Algoritma Kuantum Shor pada Platform IBM Quantum," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 13, no. 3, pp. A209–A215, 2024.
- [10] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- [11] R. Ekasari Prihandini and M. Kamayani Sulaeman, "Algoritma Pencarian dalam Daftar Tak Terurut pada Komputasi Kuantum (Algoritma Grover)."
- [12] R. Pereira da Silva, "Annealing Quantum Computing: An Overview," *SSRN Electronic Journal*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4501788.
- [13] H. A. Bhat, F. A. Khanday, B. K. Kaushik, F. Bashir, and K. A. Shah, "Quantum Computing: Fundamentals, Implementations and Applications," *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, vol. 3, pp. 61–77, 2022, doi: 10.1109/OJNANO.2022.3178545.
- [14] A. Shokry and M. Youssef, "Towards Quantum Computing for Location Tracking and Spatial Systems," in *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on*

- Advances in Geographic Information Systems*, Association for Computing Machinery, Nov. 2021, pp. 278–281. doi: 10.1145/3474717.3483958.
- [15] Ö. Salehi, Z. Seskir, and İ. Tepe, “A Computer Science-Oriented Approach to Introduce Quantum Computing to a New Audience,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 65, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2020, doi: 10.1109/TE.2021.3078552.
- [16] J. Chen, “Review on Quantum Communication and Quantum Computation,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Apr. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1865/2/022008.
- [17] S. Kwon, A. Tomonaga, G. Lakshmi Bhai, S. J. Devitt, and J. S. Tsai, “Gate-based superconducting quantum computing,” *J Appl Phys*, vol. 129, no. 4, Jan. 2021, doi: 10.1063/5.0029735.
- [18] T. Jawaid -Issa Member and U. K. Chapter, “Quantum Computing and the Future Internet ISSA DEVELOPING AND CONNECTING CYBERSECURITY LEADERS GLOBALLY,” 2022.
- [19] T. Zhou, J. Shen, X. Li, C. Wang, and J. Shen, “Quantum Cryptography for the Future Internet and the Security Analysis,” *Security and Communication Networks*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/8214619.
- [20] A. A. Laghari, H. Shah, R. A. Laghari, K. Kumar, A. A. Waqan, and A. K. Jumani, “A Review on Quantum Computing Trends & Future Perspectives,” *EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems*, p. 173979, Jul. 2018, doi: 10.4108/eai.17-5-2022.173979.
- [21] V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. J. Cerf, M. Dusek, N. Lutkenhaus, and M. Peev, “The Security of Practical Quantum Key Distribution,” *Rev Mod Phys*, vol. 81, no. 3, pp. 1301–1350, Feb. 2008, doi: 10.1103/RevModPhys.81.1301.
- [22] N. Hafiz Syahidan and M. Syahrul, “Otomatisasi Simulasi Quantum Key Distribution Berdasarkan Protokol BB84 pada EDU-QCRY1,” *Info Kripto*, vol. 17, no. 2, pp. 57–65, 2023.
- [23] U. Vazirani and T. Vidick, “Fully device independent quantum key distribution,” *Commun ACM*, vol. 62, no. 4, pp. 133–142, Apr. 2019, doi: 10.1145/3310974.
- [24] F. Xu, X. Ma, Q. Zhang, H.-K. Lo, and J.-W. Pan, “Secure quantum key distribution with realistic devices,” Mar. 2019, doi: 10.1103/RevModPhys.92.025002.
- [25] N. K. H. Li and N. Lütkenhaus, “Improving key rates of the unbalanced phase-encoded BB84 protocol using the flag-state squashing model,” *Phys Rev Res*, vol. 2, no. 4, Nov. 2020, doi: 10.1103/PhysRevResearch.2.043172.
- [26] V. Zapatero and M. Curty, “Finite-key security of passive quantum key distribution,” *Phys Rev Appl*, vol. 21, no. 1, Aug. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2308.02376>
- [27] S. Khurana and M. J. Nene, “Implementation of Database Search with Quantum Computing: Grover’s Algorithm vs Linear Search,” in 2023

- International Conference on Ambient Intelligence, Knowledge Informatics and Industrial Electronics (AIKIIIE)*, IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [28] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, “Quantum sensing,” *Rev. Mod. Phys*, vol. 89, Nov. 2017, doi: 10.1103/RevModPhys.89.035002.
- [29] M. Gong *et al.*, “Hybrid diamond quantum sensor with submicrokelvin resolution under ambient conditions,” *Phys Rev Appl*, vol. 21, no. 2, 2024.
- [30] H. A. Loughlin and V. Sudhir, “Exceptional-point Sensors Offer No Fundamental Signal-to-Noise Ratio Enhancement,” *Phys Rev Lett*, vol. 132, no. 24, Jan. 2024, doi: 10.1103/PhysRevLett.132.243601.
- [31] P. A. Millette, “The Heisenberg Uncertainty Principle and the Nyquist-Shannon Sampling Theorem,” *Progress in Physics*, no. 3, pp. 9–14, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/280444525>
- [32] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, “Quantum sensing,” *Rev Mod Phys*, vol. 89, no. 3, p. 035002, 2017.
- [33] M. Schlosshauer, “Quantum decoherence,” *Phys Rep*, vol. 831, pp. 1–57, 2019.
- [34] V. Vadimov *et al.*, “Validity of Born-Markov master equations for single- and two-qubit systems,” *Phys Rev B*, vol. 103, no. 21, p. 214308, 2021.
- [35] M. Gilaberte Basset, F. Setzpfandt, F. Steinlechner, E. Beckert, T. Pertsch, and M. Gräfe, “Perspectives for Applications of Quantum Imaging,” Oct. 01, 2019, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/lpor.201900097.
- [36] A. Vega *et al.*, “Fundamental resolution limit of quantum imaging with undetected photons,” *Phys Rev Res*, vol. 4, no. 3, Jul. 2022, doi: 10.1103/PhysRevResearch.4.033252.
- [37] H. Defienne *et al.*, “Advances in quantum imaging,” *Nat Photonics*, pp. 1–13, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41566-024-01516-w.
- [38] A. Redo-Sanchez, P. Luesia-Lahoz, D. Gutierrez, and A. Muñoz, “Cohesive framework for non-line-of-sight imaging based on Dirac notation,” *Opt Express*, vol. 32, no. 6, p. 10505, Mar. 2024, doi: 10.1364/oe.518466.