

Membangun Komputer Kuantum dengan Foton: Algoritma Simulasi Sistem Kuantum Optik Linier

Building a Quantum Computer with Photons: Simulation Algorithm for Linear Optical Quantum Systems

Ramadian Ridho Illahi^{1*}, I Wayan Sudiarta¹, Marzuki¹, Arif Budianto¹, Dani Syirojulmunir¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, 83115, Indonesia

Email: *ramadian@unram.ac.id; wayan.sudiarta@unram.ac.id; marzuki.fis@unram.ac.id; abudianto@unram.ac.id; danishiro15@gmail.com

Abstrak – Evolusi keadaan kuantum pada foton di dalam sistem optik linier memiliki aplikasi yang beragam, mulai dari eksperimen kuantum optik mendasar hingga tingkat lanjut untuk pemrosesan informasi kuantum. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun algoritma simulasi yang berfokus pada pemodelan elemen optik sebagai salah satu cara untuk mempelajari perilaku keadaan kuantum pada foton. Implementasi perhitungan komputasi kuantum dengan optik linier telah dikembangkan sebagai bagian dari simulasi dalam penelitian ini. Konfigurasi jaringan kuantum dilakukan dengan memodelkan komponen optik, seperti pembagi sinar, pemindah fase, dan hubungan antar komponennya melalui sejumlah wakilan matriks. Hasil pengukuran dinyatakan dalam distribusi kebolehjadian, dengan mempertimbangkan efek elemen optik yang dilewati oleh foton. Simulasi ini mampu melakukan perhitungan untuk jaringan kuantum dasar dengan keadaan kuantum awal tertentu. Melalui simulasi ini, kita dapat mendefinisikan jaringan kuantum dan mengimplementasikan algoritma kuantum melalui cara yang intuitif dengan menggunakan instruksi sederhana.

Kata kunci: Foton; jaringan kuantum; kebolehjadian; optik linier; simulasi.

Abstract – The evolution of quantum states on photons in linear optical systems has diverse applications, ranging from fundamental to advanced quantum optics experiments for quantum information processing. This research aims to develop a simulation algorithm that focuses on modeling optical elements as a way to study the behavior of quantum states in photons. An implementation of quantum computation with linear optics has been developed as part of the simulation in this research. The configuration of the quantum network is done by modeling optical components, such as beam splitters, phase shifters, and the relationships between their components through matrix representations. The measurement results are expressed in terms of probability distributions, taking into account the effects of the optical elements through which the photons are transmitted. The simulation is capable of performing calculations for basic quantum networks with certain initial quantum states. Through this simulation, we can define quantum networks and intuitively implement quantum algorithms using simple instructions.

Keywords: photons; quantum networks; probability; linear optics; simulation.

1. Pendahuluan

Dalam bidang mekanika kuantum, para peneliti menggunakan dua metodologi utama untuk menjelaskan keadaan entitas yang sangat kecil seperti atom dan molekul, yaitu fungsi gelombang dan vektor keadaan atau matriks densitas [1]. Berbeda dengan fisika klasik, yang hanya membutuhkan informasi mengenai lokasi dan momentum partikel, representasi kuantum ini memiliki sifat yang lebih abstrak. Meskipun demikian, ada beberapa contoh dimana distribusi kebolehjadian, mirip dengan yang ada di fisika klasik, dapat digunakan, terutama dalam skenario yang melibatkan fluktuasi. Dalam domain luas bidang kuantum yang mencakup optik kuantum, informasi kuantum, dan mekanika kuantum, distribusi kebolehjadian muncul sebagai alat yang memiliki beragam perspektif untuk mengurai masalah yang rumit [2].

Transformasi cahaya (foton) dalam sistem optik linier memperlihatkan serangkaian fenomena kuantum yang menarik. Hal ini tidak hanya meningkatkan pemahaman kita tentang prinsip-prinsip dasar, tetapi juga dapat dijadikan sebagai ruang untuk mengembangkan keadaan kuantum yang kompleks yang berpotensi mentransformasi pemrosesan informasi, terutama pada proses komputasi.

Komputasi kuantum adalah paradigma komputasi yang memanipulasi data dalam kerangka kuantum. Berbeda dengan model komputasi klasik, komputasi kuantum memanfaatkan sifat unik superposisi, *entanglement*, dan non-determinisme. Awal mula munculnya konsep ini tidak terlepas dari kontribusi Richard Feynman [3] pada awal tahun 1980-an. Algoritma komputasi kuantum yang terkenal seperti algoritma Shor [4] dan algoritma Grover [5] telah terbukti menunjukkan efisiensi yang lebih besar dalam masalah faktorisasi dan masalah pencarian dibandingkan dengan algoritma klasik.

Saat ini, upaya untuk mengembangkan komputer kuantum masih dalam tahap awal, dengan eksperimen komputasi kuantum yang terbatas pada ruang lingkup yang kecil. Terlepas dari keberadaan algoritma kuantum yang menawarkan solusi yang lebih efisien untuk masalah-masalah yang signifikan dibandingkan dengan komputer klasik, komputer kuantum yang ada saat ini belum dapat memanfaatkan potensi kelebihan komputasi kuantum secara signifikan. Bjoern Lekitsch et al. [6] memperkenalkan desain awal untuk komputer kuantum berskala besar, yang mengindikasikan potensi besar dalam kemajuan teknologi komputasi kuantum. Selain itu, pendekatan secara simulasi pun mulai banyak dikembangkan, seperti QuTIP [7] yang mensimulasikan sistem kuantum terbuka, Strawberry Fields [8] yang membangun dan mensimulasikan sirkuit optik linier, dan Walrus [9] yang dapat dikombinasikan dengan *machine learning* untuk merancang evolusi kuantum yang berbeda.

Pada artikel ini ditawarkan algoritma rutinitas dasar yang dapat menawarkan algoritma rutinitas dasar yang dapat digunakan sebagai batu loncatan untuk eksplorasi lebih lanjut. Rutinitas tersebut menggunakan kombinasi matriks uniter, metode analitik, dan optimasi numerik untuk mengeksplorasi aplikasi praktis dari representasi keadaan kuantum pada foton. Algoritma ini memetakan potensi dan keterbatasan optik linier untuk memanipulasi keadaan kuantum yang sesuai. Python adalah bahasa pilihan untuk algoritma kami, karena kesederhanaan dan kompatibilitas lintas *platform*. Hal ini membuka peluang bagi pengguna yang lebih luas dan memudahkan terjadinya kolaborasi. Selain itu, ekosistem ilmiah Python yang luas dapat terintegrasi dengan algoritma kami untuk membangun aplikasi ilmiah yang dibutuhkan.

2. Landasan Teori

Elemen dasar dari komputer kuantum dikenal sebagai qubit, yang dapat dianggap sebagai padanan kuantum dari bit klasik (0 dan 1). Representasi ruang keadaan dari sebuah qubit mencakup semua kemungkinan superposisi dari keadaan awal $|0\rangle$ dan $|1\rangle$

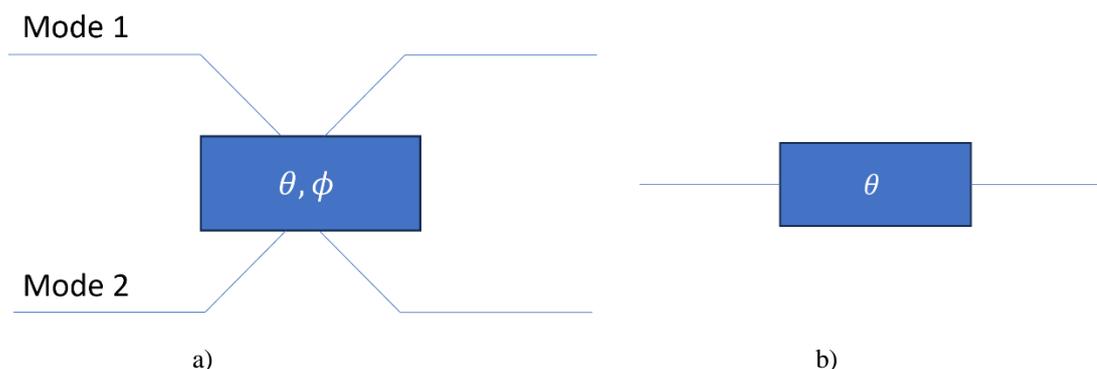
$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

dimana α dan β adalah bilangan kompleks dan $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ menciptakan basis ortonormal dari ruang Hilbert dan sering disebut dengan keadaan basis komputasi [10].

Qubit pada sirkuit optik linier dicirikan oleh keadaan mode optik, dimana mode optik mengacu pada sistem fisik dengan ruang keadaan yang terdiri dari superposisi berbagai keadaan, dilambangkan dengan $|n\rangle$, yang menunjukkan jumlah foton yang ada dalam mode tersebut. Sebagai ilustrasi, $|1,0\rangle$ mewakili keadaan dimana satu mode berisi satu foton sementara yang lain tidak memiliki foton [11, 12, 13].

Pemrosesan informasi kuantum dilakukan dengan menerapkan gerbang kuantum, dalam hal ini komponen optik dan pengukuran pada qubit yang telah disiapkan. Gerbang-gerbang tersebut mengevolusi keadaan sesuai dengan hukum mekanika kuantum. Potensi dari proses informasi kuantum bergantung pada kemampuan untuk mengimplementasikan evolusi yang sesuai dengan gerbang yang tersedia. Jika semua evolusi uniter dapat didekati hingga fase global, maka rangkaian dari gerbang ini disebut sebagai gerbang universal. Komputasi kuantum standar bergantung pada set gerbang universal dimana setiap gerbang bekerja pada satu atau dua qubit. Urutan persiapan keadaan awal (*input*), gerbang kuantum, dan pengukuran disebut dengan jaringan kuantum atau sirkuit kuantum.

Jaringan optik memiliki kemiripan dengan jaringan kuantum, perbedaannya terletak pada komponen fundamentalnya yang berupa mode optik. Dalam lingkup naskah ini, komponen optik kuantum menunjukkan peralatan fisik yang terdiri dari komponen optik linier yang memfasilitasi definisi keadaan *input* dan *output* dari foton. Diantara komponen optik yang paling sederhana adalah pemindah fase (*phase shifter*) dan pembagi sinar (*beam splitter*).



Gambar 1. Ilustrasi a) pembagi sinar dimana mode 1 adalah mode teratas dan b) pemindah fase.

Komponen-komponen ini menghasilkan transformasi yang dapat diperoleh melalui optik linier yang dapat diwakilkan oleh matriks transformasi [14, 15] yang menghubungkan operator kreasi untuk foton pada *input* dan *output*. Sebagai contoh, dalam skenario sistem dasar yang terdiri dari dua mode *input* yang dibentuk oleh pembagi sinar yang ditentukan oleh dua sudut (θ dan ϕ), maka matriks uniter yang sesuai dengan pemindah fase dapat direpresentasikan sebagai

$$u(P_\theta) = e^{i\theta} \tag{2}$$

sedangkan matriks uniter yang terkait dengan pembagi sinar adalah

$$u(B_{\theta,\phi}) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -e^{i\phi}\sin(\theta) \\ e^{-i\phi}\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \tag{3}$$

Pengukuran dilakukan melalui pemanfaatan model foto detektor yang diasumsikan dapat diimplementasikan pada saat tertentu untuk menghitung foton pada mode tertentu.

3. Metode Penelitian

Algoritma yang dibuat memungkinkan konfigurasi jaringan kuantum dengan cara yang mudah digunakan melalui arahan yang sederhana. Rutinitas yang dapat digunakan memiliki kemampuan untuk memberikan keadaan *output* jaringan dan hasil pengukuran sembari memperhitungkan berbagai efek komponen optik. Hasil yang didapatkan dapat dinyatakan dalam bentuk distribusi kebolehjadian.

Penggambaran paket gelombang foton dapat dianggap sebagai entitas yang mampu untuk dihubungkan ke jaringan kuantum. Sebuah rangkaian foton pada *input* terdiri dari keadaan *input* tertentu yang mencirikan keadaan awalnya. Proses untuk mendefinisikan foton dijalankan menggunakan perintah

```
psi = add_photons(N)
```

dimana N adalah jumlah foton yang akan didefinisikan. Setelah foton berhasil didefinisikan, maka perintah

```
psi = BS(i, psi, theta = 45, phi = 0)
```

akan mengimplementasikan pembagi sinar ke qubit ke- i pada keadaan qubit ψ berdasarkan nilai parameter pembagi sinar yang ditentukan untuk θ dan ϕ . Secara bawaan, kedua nilai ini masing-masing ditetapkan ke 45 dan 0 derajat, untuk alasan yang akan dibahas di bagian hasil, jika tidak ditentukan secara spesifik oleh pengguna.

Jika pengguna ingin mengimplementasikan pemindah fase pada qubit ke- i , maka perintah

```
psi = PS(i, psi, theta = 180)
```

akan menerapkannya pada keadaan qubit ψ berdasarkan nilai parameter pemindah fase, θ . Setiap kali elemen optik baru ditambahkan, maka jaringan kuantum yang dibuat pun akan ikut diperbarui.

Mengingat bahwa kebolehjadian terjadinya suatu keadaan adalah kuadrat dari nilai mutlak amplitudo keadaan, maka

$$\text{out} = \text{prob}(\text{psi})$$

akan memberi kita kebolehjadian keadaan *output* yang sesuai dari psi.

4. Hasil Dan Pembahasan

Untuk percobaan awal, akan disimulasikan satu qubit yang memiliki keadaan $|0\rangle$ yang kemudian akan diteruskan pada sebuah pembagi sinar dengan parameter-parameternya adalah $\theta = 45$ dan $\phi = 0$. Secara eksak, kita dapat menghitung kebolehjadian keadaan luaran dengan mengingat bahwa vektor kolom yang terkait dengan $|0\rangle$ adalah

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

Selanjutnya vektor kolom yang mewakili $|0\rangle$ dikalikan dengan matriks yang mewakili pembagi sinar

$$\begin{pmatrix} \cos(\pi/4) & ie^{i(0)} \sin(\pi/4) \\ ie^{-i(0)} \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,70710678118 \\ 0,70710678118 i \end{pmatrix} \tag{5}$$

Jika diambil nilai kuadrat dari nilai mutlak amplitudo keadaan, maka kebolehjadiannya adalah 0,5 atau 50%.

Dengan menggunakan algoritma yang telah dibuat, kita cukup mendefinisikan keadaan awal dan parameter θ dan ϕ dari pembagi sinar sesuai dengan konfigurasi di atas. Hasil untuk simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebolehjadian keadaan *output* ketika terdapat satu qubit dengan keadaan awal $|0\rangle$, dan parameter pembagi sinar diatur ke $\theta = 45$ dan $\phi = 0$.

No	Keadaan	Kebolehjadian	
		Simulasi	Eksak
1	$ 0\rangle$	0,5000000000000001	0,5
2	$ 1\rangle$	0,4999999999999999	0,5

Terlihat bahwa hasil simulasi hampir sama dengan nilai yang sebenarnya. Hal ini menunjukkan bahwa jika kita mengatur nilai parameter-parameter pembagi sinar menjadi $\theta = 45$ dan $\phi = 0$, kita akan memperoleh superposisi keadaan yang merata. Pembagi sinar yang memiliki sifat seperti ini dikenal juga sebagai pembagi sinar 50:50.

Untuk contoh yang lainnya, mari kita atur dua buah qubit yang berada pada keadaan $|0,0\rangle$ dan atur parameter pembagi sinar sebagaimana sebelumnya. Hasil dari simulasi dengan konfigurasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 2. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan, terlihat bahwa keadaan *input* dan keadaan *output* yang bersesuaian memiliki peluang yang sama, yaitu sekitar 25%, untuk tiap keadaan tersebut dapat muncul. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pembagi sinar pada simulasi tersebut dapat membuat keadaan-keadaan tersebut mengalami superposisi.

Untuk menunjukkan efek dari pemindah fase pada keadaan kuantum qubit, maka akan disusun konfigurasi jaringan kuantum yang terdiri dari dua buah pembagi sinar dan sebuah pemindah fase yang ditempatkan diantara keduanya. Pembagi sinar yang pertama diperlukan untuk menempatkan qubit kedalam keadaan superposisi, sedangkan pembagi sinar yang kedua diperlukan untuk mengekstrak qubit dari keadaan superposisi. Hasil simulasi untuk satu qubit yang memiliki keadaan $|0\rangle$ dengan parameter pemindah fase $\theta = 180$ ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Kebolehjadian keadaan *output* ketika terdapat dua qubit dengan keadaan awal $|0,0\rangle$, dan parameter pembagi sinar diatur ke $\theta = 45$ dan $\phi = 0$

No	Keadaan	Kebolehjadian	
		Simulasi	Eksak
1	$ 0,0\rangle$	0,2500000000000001	0,25
2	$ 0,1\rangle$	0,25	0,25
3	$ 1,0\rangle$	0,25	0,25
4	$ 1,1\rangle$	0,2499999999999999	0,25

Tabel 3. Kebolehjadian keadaan *output* ketika terdapat satu qubit dengan keadaan awal $|0\rangle$, dan parameter pemindah fase diatur ke $\theta = 180$

No	Keadaan	Kebolehjadian	
		Simulasi	Eksak
1	$ 0\rangle$	0	0
2	$ 1\rangle$	1	1

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa pemindah fase pada dasarnya mengubah keadaan qubit dari $|0\rangle$ ke $|1\rangle$ atau pun sebaliknya.

5. Kesimpulan

Pada artikel ini, kita telah melihat bagaimana pengimplementasian algoritma simulasi komputasi kuantum dengan menggunakan optik linier sebagai salah satu cara untuk mempelajari perilaku keadaan kuantum pada foton, diantaranya adalah inisialisasi keadaan, penerapan komponen optik, dan pengukuran dalam basis komputasi. Pengaturan jaringan kuantum dilakukan melalui pemodelan elemen optik dan hubungan di antara mereka. Dengan pemahaman yang baik tentang dasar-dasar kuantum optik, kita sudah dapat mengimplementasikan algoritma yang sudah dibuat untuk berbagai konfigurasi komputasi kuantum optik.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini mendapatkan pendanaan DIPA BLU Universitas Mataram dengan Nomor Kontrak 1443/UN18.L1/PP/2023.

Pustaka

- [1] V. N. Chernega, O. V. Man'ko and V. I. Man'ko, "Qubit state vector in probability representation of quantum mechanics," in *AIP Publishing*, 2021.
- [2] E. G. Sudarshan, "Search for purity and entanglement," *Journal of Russian Laser Research*, vol. 24, pp. 195-203, 2003.
- [3] R. Feynman, "Simulating physics with computers," *Int J Theor Phys*, vol. 21, p. 467–488, 1982.
- [4] P. W. Shor, "Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer," *SIAM review*, vol. 41, no. 2, pp. 303-332, 1999.
- [5] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," in *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1996.
- [6] B. Lekitsch, S. Weidt, A. G. Fowler, K. Mølmer, S. J. Devitt, C. Wunderlich and W. K. Hensinger, "Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer," *Science Advances*, vol. 3, no. 2, 2017.

- [7] J. R. Johansson, P. D. Nation and F. Nori, "QuTiP: An open-source Python framework for the dynamics of open quantum systems," *Computer physics communications*, vol. 183, no. 8, pp. 1760-1772, 2012.
- [8] N. Killoran, J. Izaac, N. Quesada, V. Bergholm, M. Amy and C. Weedbrook, "Strawberry fields: A software platform for photonic quantum computing," *Quantum*, vol. 3, p. 129, 2019.
- [9] B. Gupt, J. Izaac and N. Quesada, "The Walrus: a library for the calculation of hafnians, Hermite polynomials and Gaussian boson sampling," *Journal of Open Source Software*, vol. 4, no. 44, p. 1705, 2019.
- [10] M. A. & C. I. L. Nielsen, *Quantum computation and quantum information*, Cambridge university press, 2010.
- [11] D. F. Walls and G. J. Milburn, *Quantum Information*, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] D. Stauffer, *Annual reviews of computational physics*, World Scientific, 1995.
- [13] D. P. DiVincenzo, "The physical implementation of quantum computation," *Fortschritte der Physik: Progress of Physics*, vol. 48, pp. 771-783, 2000.
- [14] E. Knill, R. Laflamme and G. J. Milburn, "A scheme for efficient quantum computation with linear optics," *nature*, vol. 4, pp. 46-52, 2001.
- [15] G. Casati, D. L. Shepelyansky and P. Zoller, *Quantum computers, algorithms and chaos*, IOS press, 2016.