

TELEPORTASI KUANTUM SATU QUBIT DENGAN BENTUK KOMPAK EMPAT KEADAAN BELL SEBAGAI KANAL KUANTUM

Khazali Fahmi*^{1,2}

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan RI

²Laboratorium Fisika Teori dan Komputasi, Universitas Pertahanan RI

e-mail*¹: fahmikhazali1@gmail.com

Received 17 Februari 2024

Published 1 November 2024

<https://doi.org/10.33369/jkf.7.2.84-91>

ABSTRAK

Pada artikel ini, teleportasi kuantum satu qubit dengan empat keadaan Bell sebagai kanal kuantum telah dikaji secara eksplisit. Empat keadaan Bell yang digunakan dinyatakan dalam bentuk kompak. Hasil kajian menunjukkan bahwa teleportasi kuantum satu qubit dengan empat keadaan Bell dapat dilakukan untuk mengirim informasi kuantum dari pengirim (Alice) ke penerima (Bob) setelah hasil pengukuran oleh Alice dikirim melalui kanal klasik. Untuk hasil pengukuran $|00\rangle$, $|01\rangle$ dan $|10\rangle$ dari setiap keadaan Bell $|\phi_{00}\rangle$, $|\phi_{01}\rangle$, $|\phi_{10}\rangle$ pada persamaan 1, terdapat satu kemungkinan di mana Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter untuk merekonstruksi qubitnya dan sebaliknya Bob perlu melakukan transformasi uniter. Untuk keadaan Bell $|\phi_{11}\rangle$, Bob perlu melakukan transformasi uniter pada qubitnya dari setiap hasil pengukuran Alice.

Kata kunci—Keadaan Bell, qubit, teleportasi kuantum.

ABSTRACT

In this article, one-qubit quantum teleportation with four Bell states as quantum channel has been studied explicitly. Four Bell states used are expressed in compact form. The result of study shown that one-qubit teleportation quantum with four Bell states can be carried out to send quantum information from the sender (Alice) to the receiver (Bob) after Alice's measurement results are send via classical channel. For the measurement results are $|00\rangle$, $|01\rangle$ dan $|10\rangle$ from each Bell state $|\phi_{00}\rangle$, $|\phi_{01}\rangle$, $|\phi_{10}\rangle$ in equation 1, there is one possibility where Bob does not need to perform a unitary transformation to reconstruct his qubit and the rest Bob needs to perform a unitary transformation. For Bell state $|\phi_{11}\rangle$, Bob needs to perform a unitary transformation on his qubit from each of Alice's measurements.

Keywords—Bell state, qubit, quantum teleportation.

I. PENDAHULUAN

Pada tahun 1993, Bennet mengajukan suatu mekanisme untuk mengirim informasi kuantum dari pengirim pada suatu tempat ke penerima di tempat lain yang mungkin jaraknya sangat jauh dengan cara instan. Mereka menyebut mekanisme tersebut sebagai teleportasi kuantum (*quantum teleportation*) (1). Teleportasi kuantum tersebut dilakukan dengan menggunakan keadaan Bell sebagai kanal kuantum dan komunikasi klasik sebagai kanal klasik untuk menginformasikan hasil pengukuran pengirim kepada penerima. Teleportasi kuantum hanya mengirim informasi keadaan kuantum bukan mengirim obyek fisik seperti yang ada pada film fiksi ilmiah.

Untuk melakukan teleportasi kuantum, pertama-tama pengirim (biasanya disebut Alice) dan penerima (biasanya disebut Bob) membentuk sepasang partikel kuantum yang terbelit (*entanglement*) dan dalam keadaan Bell. Kemudian Alice melakukan pengukuran terhadap gabungan antara partikel yang ingin dikirim informasinya dan salah satu pasangan terbelit yang dimilikinya, dan mengirimkan hasilnya kepada Bob melalui kanal klasik. Setelah pengukuran, keadaan kuantum yang tidak diketahui milik Alice runtuh, tetapi informasi tentang pengukuran gabungan tersebut memungkinkan Bob untuk mengubah partikel terbelitnya menjadi replika

keadaan kuantum yang tidak diketahui tersebut melalui transformasi uniter (2).

Berbagai upaya telah dilakukan untuk membuktikan teleportasi kuantum secara eksperimen (3–5). Eksperimen pertama yang sukses membuktikan teleportasi kuantum dilakukan oleh Boumeester dkk dengan menggunakan foton terbelit (6). Selain itu, kajian teoritis terkait teleportasi kuantum juga terus berkembang. Salah satu aspek perkembangan teoritis teleportasi kuantum adalah variasi kanal kuantum dan bentuk keadaan kuantum partikel yang akan diteleportasikan (7–11).

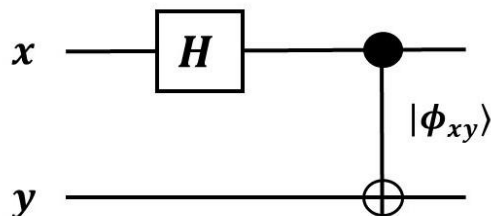
Pada awalnya, teleportasi kuantum menggunakan keadaan Bell sebagai kanal kuantum. Keadaan Bell sendiri terdiri dari empat keadaan kuantum yang terbelit. Namun, kajian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa belum ada literatur yang menguraikan mekanisme teleportasi kuantum menggunakan keempat keadaan Bell secara eksplisit. Untuk itu, artikel ini mengkaji teleportasi kuantum dengan keadaan Bell yang dinyatakan dalam bentuk kompak sebagai kanal kuantum.

Artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian I berisi latar belakang terkait penelitian. Bagian II review mekanisme teleportasi kuantum satu qubit dengan satu keadaan Bell sebagai kanal kuantum. Bagian III berisi skema teleportasi kuantum satu qubit dengan menggunakan empat keadaan Bell yang dinyatakan dalam bentuk kompak dan digunakan sebagai kanal kuantum. Bagian IV adalah kesimpulan dan saran.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan berdasarkan kajian teoretis. Oleh karena itu, bagian ini menguraikan mekanisme teleportasi kuantum satu qubit menggunakan salah satu keadaan Bell dan akan digunakan untuk perluasan kajian dengan keempat keadaan Bell.

Teleportasi kuantum satu qubit dapat dilakukan dengan menggunakan salah satu dari empat keadaan Bell sebagai kanal kuantum. Keadaan Bell sendiri merupakan keadaan kuantum dua qubit yang terbelit. Dalam teori komputasi kuantum, keadaan Bell dapat dibentuk dengan menggunakan keadaan dua qubit sebagai input dan melewatkannya secara berturut-turut pada gerbang kuantum Hadamard H dan *controlled-NOT* (CNOT) pada suatu sirkuit kuantum (12). Sirkuit kuantum tersebut adalah



Gambar 1. Sirkuit kuantum menghasilkan keadaan Bell

Pada gambar 1, x dan y masing-masing merupakan qubit pertama dan kedua yang digunakan sebagai *input* dan $|\phi_{xy}\rangle$ adalah keadaan Bell sebagai *output* dari sirkuit kuantum. Dalam representasi matriks, gerbang kuantum Hadamard dan CNOT dinyatakan sebagai

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$U_{CN} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Empat keadaan Bell tersebut adalah

$$\begin{aligned}
 |\phi_{00}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle); \\
 |\phi_{01}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle); \\
 |\phi_{10}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle); \\
 |\phi_{11}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Indeks 00, 01, 10 dan 11 pada persamaan 3 berkaitan dengan input untuk menghasilkan keadaan Bell (13).

Teleportasi kuantum satu qubit dilakukan dengan mekanisme berikut. Misalkan terdapat dua orang yang mana salah satunya berperan sebagai pengirim (biasanya disebut Alice) dan yang lainnya berperan sebagai penerima (biasanya disebut Bob) serta masing-masing memiliki satu qubit. Alice dan Bob menginteraksikan qubit mereka sehingga membentuk salah satu keadaan Bell pada persamaan (3). Asumsikan keadaan Bell yang terbentuk tersebut adalah

$$|\phi_{00}\rangle \equiv |\phi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}).
 \tag{4}$$

Indeks *A* dan *B* masing-masing mengindikasikan bahwa qubit pertama milik Alice dan qubit kedua milik Bob. Selain itu, Alice juga memiliki qubit lain yang tidak diketahui oleh Bob. Qubit Alice ini memiliki keadaan kuantum

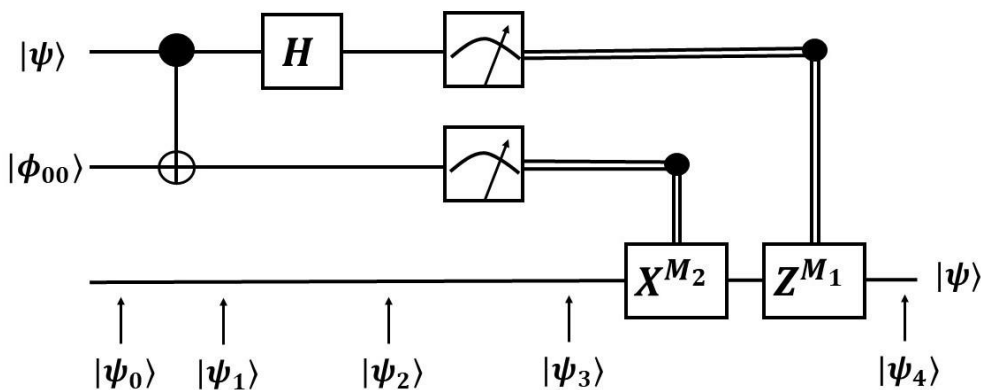
$$|\psi\rangle_a = \alpha|0\rangle_a + \beta|1\rangle_a,
 \tag{5}$$

dengan α dan β memenuhi kondisi $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Kemudian Alice dan Bob terpisah dengan jarak yang sangat jauh. Pada keadaan ini, Alice ingin mengirim informasi tentang qubit $|\psi\rangle_a$ kepada Bob tanpa harus pergi ke tempat Bob. Untuk mengirim informasi qubit $|\psi\rangle_a$, Alice menginteraksikan qubit $|\psi\rangle_a$ pada persamaan (5) dan keadaan Bell pada persamaan (4), diperoleh

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle_0 &= |\psi\rangle_a \otimes |\phi\rangle_{AB} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha|0\rangle_a(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}) + \beta|1\rangle_a(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB})].
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Perhatikan bahwa urutan qubit sesuai dengan urutan indeks. Qubit *a* dan *A* milik Alice dan indeks *B* milik Bob.

Setelah itu, Alice melewati keadaan kuantum $|\psi\rangle_0$ secara berturut-turut pada gerbang kuantum CNOT dan *H* pada sirkuit kuantum. Kemudian Alice melakukan pengukuran dan menginformasikan hasilnya kepada Bob melalui kanal klasik. Sirkuit kuantum ini dinyatakan pada gambar 2.



Gambar 2. Sirkuit kuantum teleportasi kuantum

Mengoperasikan U_{CN} pada qubit Alice pada persamaan (6) menghasilkan

$$|\psi\rangle_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha|0\rangle_a (|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}) + \beta|1\rangle_a (|10\rangle_{AB} + |01\rangle_{AB})] \quad (2)$$

Selanjutnya Alice mengoperasikan H pada qubit pertamanya pada persamaan (7) menghasilkan

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_2 &= \frac{1}{2} [\alpha(|0\rangle_a + |1\rangle_a)(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}) + \beta(|0\rangle_a - |1\rangle_a)(|10\rangle_{AB} + |01\rangle_{AB})] \\ &= \frac{1}{2} [|00\rangle_{aA}(\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B) + |01\rangle(\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B) + |10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) \\ &\quad + |11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Kemudian Alice melakukan pengukuran terhadap $|\psi\rangle_2$ pada persamaan 8. Jika hasil pengukuran Alice adalah $|00\rangle$, secara instan qubit Bob akan berada dalam keadaan

$$|\Psi\rangle_B = \alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B. \quad (4)$$

Persamaan 9 merupakan keadaan qubit Alice yang diteleportasikan yaitu persamaan 5. Ketika Alice menginformasikan hasil pengukuran tersebut kepada Bob melalui kanal klasik, Bob tidak perlu melakukan tranformasi uniter untuk merekonstruksi keadaan qubit miliknya. Dengan demikian Alice telah berhasil melakukan teleportasi kuantum. Jika hasil pengukuran Alice adalah $|01\rangle$ dan menginformasikan hasil tersebut kepada Bob melalui kanal klasik, qubit Bob akan berada dalam keadaan $\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B$. Oleh karena itu, Bob perlu mengoperasikan operator uniter untuk merekonstruksi qubit miliknya sehingga keadaan qubit Bob menjadi qubit $|\Psi\rangle_B$ pada persamaan 9. Dengan demikian Alice berhasil meneleportasikan keadaan kuantum qubitnya kepada Bob. Hal yang sama juga berlaku untuk hasil pengukuran yang lainnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, teleportasi kuantum satu qubit untuk keempat keadaan Bell pada persamaan 3 akan dikaji secara eksplisit. Keadaan Bell pada persamaan 3 dapat dinyatakan dalam bentuk yang lebih kompak, yaitu

$$|\phi_{xy}\rangle = \frac{|0, y\rangle + (-1)^x |1, \bar{y}\rangle}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

dengan x dan y merupakan kombinasi 0 dan 1 serta \bar{y} merupakan kebalikan dari y , yaitu jika $y = 1$ maka $\bar{y} = 0$ dan jika $y = 0$ maka $\bar{y} = 1$.

Untuk melakukan teleportasi qubit pada persamaan 5, Alice menginteraksikan qubit miliknya dengan bentuk kompak keadaan Bell pada persamaan 10. Hasil interaksi tersebut adalah

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_0 &= |\psi\rangle_a \otimes |\phi_{xy}\rangle_{AB} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha|0\rangle_a (|0, y\rangle_{AB} + (-1)^x |1, \bar{y}\rangle_{AB}) + \beta|1\rangle_a (|0, y\rangle_{AB} + (-1)^x |1, \bar{y}\rangle_{AB})]. \end{aligned} \quad (6)$$

Indeks a dan A menyatakan qubit milik Alice dan indeks B menyatakan qubit milik Bob. Kemudian Alice melewati persamaan 11 secara berturut-turut melalui gerbang kuantum CNOT dan Hadamard pada sirkuit kuantum (gambar 2) dan melakukan pengukuran.

Ketika Alice mengoperasikan U_{CN} pada kedua qubit miliknya yang ada pada persamaan (11), diperoleh

$$|\psi\rangle_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha|0\rangle_a (|0, y\rangle_{AB} + (-1)^x |1, \bar{y}\rangle_{AB}) + \beta|1\rangle_a (|1, y\rangle_{AB} + (-1)^x |0, \bar{y}\rangle_{AB})]. \quad (7)$$

Selanjutnya, saat Alice mengoperasikan H pada qubit pertamanya di dalam persamaan (12), diperoleh

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle_2 &= \frac{1}{2} [\alpha(|0\rangle_a + |1\rangle_a)(|0, y\rangle_{AB} + (-1)^x |1, \bar{y}\rangle_{AB}) \\
 &\quad + \beta(|0\rangle_a - |1\rangle_a)(|1, y\rangle_{AB} + (-1)^x |0, \bar{y}\rangle_{AB})] \\
 &= \frac{1}{2} [|00\rangle_{aA}(\alpha|y\rangle_B + \beta(-1)^x |\bar{y}\rangle_B) + |01\rangle_{aA}(\alpha(-1)^x |\bar{y}\rangle_B + \beta|y\rangle_B) \\
 &\quad + |11\rangle_{aA}(\alpha(-1)^x |\bar{y}\rangle_B - \beta|y\rangle_B) + |10\rangle_{aA}(\alpha|y\rangle_B - \beta(-1)^x |\bar{y}\rangle_B)].
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Jika Alice melakukan pengukuran dan memperoleh hasil $|00\rangle$, qubit milik Bob akan berada dalam keadaan

$$|\Psi\rangle_B = \alpha|y\rangle_B + \beta(-1)^x |\bar{y}\rangle_B. \tag{9}$$

Bergantung terhadap empat keadaan Bell, maka kemungkinan qubit Bob dari hasil pengukuran ini adalah

Tabel 1. Berbagai kemungkinan keadaan qubit Bob berdasarkan keadaan Bell yang digunakan ketika hasil pengukuran Alice adalah $|00\rangle$

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Qubit Bob $ \Psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{00}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{01}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{10}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{11}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Untuk hasil pengukuran $|01\rangle$, qubit milik Bob berada dalam keadaan

$$|\Psi\rangle_B = \alpha(-1)^x |\bar{y}\rangle_B + \beta|y\rangle_B. \tag{10}$$

Dengan demikian kemungkinan qubit Bob berdasarkan empat keadaan Bell adalah

Tabel 2. Berbagai kemungkinan keadaan qubit Bob berdasarkan keadaan Bell yang digunakan ketika hasil pengukuran Alice adalah $|01\rangle$

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Qubit Bob $ \Psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{00}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{01}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{10}\rangle$	$-\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{11}\rangle$	$-\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Jika hasil pengukuran yang dilakukan Alice adalah keadaan $|10\rangle$, qubit Bob akan berada dalam keadaan kuantum

$$|\Psi\rangle_B = \alpha|y\rangle_B - \beta(-1)^x |\bar{y}\rangle_B. \tag{11}$$

Kemungkinan qubit Bob berdasarkan empat keadaan Bell adalah

Tabel 3. Berbagai kemungkinan keadaan qubit Bob berdasarkan keadaan Bell yang digunakan ketika hasil pengukuran Alice adalah $|10\rangle$

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Qubit Bob $ \Psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{00}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{01}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{10}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{11}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Terakhir jika hasil pengukuran Alice adalah $|11\rangle$, qubit Bob memiliki keadaan quantum

$$|\Psi\rangle_B = \alpha(-1)^x |\bar{y}\rangle_B - \beta|y\rangle_B. \quad (12)$$

Berdasarkan penggunaan keadaan Bell sebagai kanal kuantum dalam proses teleportasi, kemungkinan qubit Bob adalah

Tabel 4. Berbagai kemungkinan keadaan qubit Bob berdasarkan keadaan Bell yang digunakan ketika hasil pengukuran Alice adalah $|11\rangle$

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Qubit Bob $ \Psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{00}\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{01}\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{10}\rangle$	$-\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{11}\rangle$	$-\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Tabel 1, 2, 3 dan 4 memberi informasi bagaimana keadaan qubit Bob berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Alice terhadap kanal kuantum yang digunakan yaitu keadaan Bell. Beberapa hasil pengukuran Alice mengharuskan Bob melakukan transformasi uniter untuk merekonstruksi qubitnya. Hasil pada tabel 1, 2, 3 dan 4 juga dapat disusun kembali berdasarkan penggunaan keadaan Bell, yaitu sebagai berikut.

Tabel 5. Berbagai kemungkinan keadaan qubit Bob berdasarkan pengukuran Alice dan keadaan Bell yang digunakan

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Hasil Pengukuran Alice	Qubit Bob $ \psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{00}\rangle$	$ 00\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
	$ 01\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 10\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 11\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{01}\rangle$	$ 00\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 01\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
	$ 10\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Keadaan Bell $ \phi_{xy}\rangle$	Hasil Pengukuran Alice	Qubit Bob $ \psi\rangle_B$	Keterangan
$ \phi_{10}\rangle$	$ 11\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 00\rangle$	$\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 01\rangle$	$-\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 10\rangle$	$\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob tidak perlu melakukan transformasi uniter
	$ 11\rangle$	$-\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
$ \phi_{11}\rangle$	$ 00\rangle$	$\alpha 1\rangle_B - \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 01\rangle$	$-\alpha 0\rangle_B + \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 10\rangle$	$\alpha 1\rangle_B + \beta 0\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter
	$ 11\rangle$	$-\alpha 0\rangle_B - \beta 1\rangle_B$	Bob perlu melakukan transformasi uniter

Tabel 5 memberikan informasi keadaan qubit Bob setelah Alice melakukan pengukuran. Setiap keadaan Bell yang digunakan sebagai kanal kuantum, terdapat qubit yang mengharuskan Bob melakukan transformasi uniter untuk merekonstruksi kembali qubitnya.

IV. SIMPULAN DAN SARAN

Hasil perhitungan yaitu tabel 5 menunjukkan secara eksplisit bahwa keempat keadaan Bell dapat digunakan sebagai kanal kuantum untuk melakukan teleportasi kuantum satu qubit. Untuk setiap keadaan bell $|\psi_{00}\rangle$, $|\psi_{01}\rangle$ dan $|\psi_{10}\rangle$ terdapat satu dari empat hasil pengukuran Alice yang mana Bob (penerima) tidak perlu melakukan transformasi uniter untuk merekonstruksi kembali keadaan kuantum satu qubit yang dikirim oleh Alice. Sementara itu untuk keadaan bell $|\psi_{11}\rangle$, Bob perlu merekonstruksi qubit miliknya melalui transformasi uniter terhadap keempat hasil pengukuran yang dilakukan oleh Alice.

Kajian dalam penelitian ini masih terbatas pada keadaan satu qubit. Kedepannya, penelitian ini dapat dilanjutkan untuk keadaan qubit yang lebih banyak dalam melakukan teleportasi kuantum satu qubit.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bennett CH, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters WK. Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. 1992.
2. Feng XL, Gong SQ, Wang ZY, Xu), Z&% ZZ? Teleportation of an Unknown Quantum State via Partly Entangled States *. Vol. 17. 2000.
3. Boschi D, Branca S, De Martini F, Hardy L, Popescu S. Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. Vol. 80, PHYSICAL REVIEW LETTERS. 1998.
4. Reina JH, Johnson NF. Quantum teleportation in a solid-state system. Phys Rev A. 2001 Jan;63(1):012303–012301.

5. Ren JG, Xu P, Yong HL, Zhang L, Liao SK, Yin J, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation. *Nature*. 2017 Sep 7;549(7670):70–3.
6. Bouwmeester D, Pan JW, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A. Experimental quantum teleportation. Vol. 390, *Nature* © Macmillan Publishers Ltd. 1997.
7. Liu Y, Chun-mei Y, Guang-can G. Teleportation of a two-particle entangled state. *Chinese Physics*. 2001 Nov;10(11):1001–3.
8. Purwanto A, Yuwana L, Artawan IN, Hatmoko BD, Rahmawati R, Alqodri AF. Teleportasi Kuantum Terkontrol Keadaan Dua-Qubit Sembarang. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 2019 Jan 15;15(1):34.
9. Gorbachev VN, Trubilko AI. Quantum teleportation of EPR pair by three-particle entanglement. 1999.
10. Purwanto A, Sukanto H, Yuwana L. Formal Conditions on Quantum Teleportation. *Indian J Sci Technol* [Internet]. 2018 May 1;11(18):1–6. Available from: <https://indjst.org/articles/formal-conditions-on-quantum-teleportation>
11. Mang F, Xi-Wen Z, Xi-Ming E F, Min Y, Lei S. Teleportation of Two Quantum States via the Quantum Computation *. Vol. 17. 2000.
12. Nielsen MA, Chuang IL. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press; 2012.
13. Fox M. *Quantum Mechanics: Theory and Experiment*, by Mark Beck. Vol. 54. 2013. 77–77 p.