

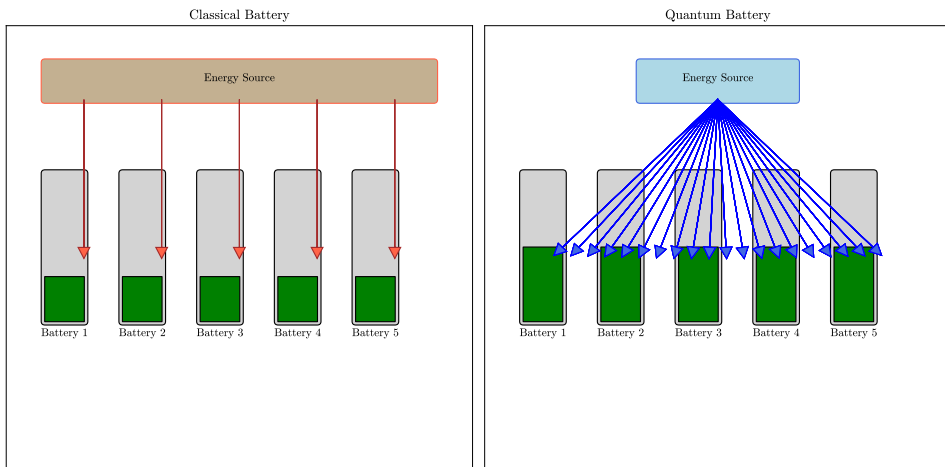
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pada masa lalu, revolusi teknologi didorong oleh perkembangan teori ilmiah baru, seperti revolusi industri pertama yang terkait dengan kemajuan dalam termodinamika (Carnot, 1824; Fermi, 1956). Misalnya, panas tidak dapat mengalir dari benda dingin ke benda panas, dan efisiensi mesin panas dalam sistem kuantum tidak dapat melampaui batas Carnot. Selain itu, *entanglement* tidak dapat digunakan untuk mengekstraksi lebih banyak energi dari reservoir energi (Hovhannisyan et al., 2013), sehingga tampaknya tidak ada tempat untuk keunggulan kuantum dalam termodinamika.

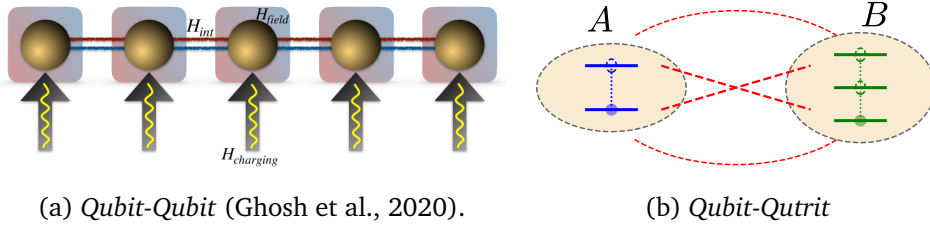
Hasil teoretis penting dalam termodinamika kuantum menunjukkan bahwa generasi *entanglement* berkaitan dengan ekstraksi kerja yang lebih cepat ketika energi disimpan dalam sistem kuantum banyak benda (Hovhannisyan et al., 2013). Temuan ini memicu minat dalam penggunaan sistem kuantum sebagai mesin panas (Kieu, 2004; Uzdin et al., 2016) dan perangkat penyimpanan energi, yang mengarah pada penelitian tentang baterai kuantum yang pertama kali diperkenalkan oleh Alicki and Fannes (2013) serta pencarian efek kuantum yang meningkatkan kinerjanya (Binder et al., 2015; Campaioli et al., 2017a).



Gambar 1.1: Skema pengisian baterai klasik vs kuantum (Andolina et al. (2019)).

Gambar (1.1) menunjukkan perbedaan antara baterai klasik dan kuantum. Baterai klasik menyimpan dan melepaskan energi melalui reaksi elektrokimia, sedangkan baterai kuantum memanfaatkan prinsip mekanika kuantum untuk efisiensi lebih tinggi (Julià-Farré et al., 2020), meskipun tetap rentan terhadap kehilangan energi (Liu, J. et al., 2019; Gherardini, S. et al., 2020). Pengisian baterai kuantum dapat menghasilkan superposisi koheren (Binder et al., 2015), yang dalam sistem multi-subsel dapat membentuk *entanglement* dan korelasi non-klasikal (Campaoli et al., 2017a), memungkinkan penskalaan daya secara super-ekstensif.

Penelitian baterai kuantum berbasis model Penelitian baterai kuantum berbasis model rantai *spin* Heisenberg berfokus pada interaksi antar-*qubit* yang memanfaatkan derajat kebebasan *spin* untuk menyimpan dan melepaskan energi, dengan potensi efisiensi dan kapasitas lebih tinggi dibandingkan baterai klasik.



Gambar 1.2: Diagram Model Rantai *Spin* Heisenberg

Salah satu studi penting oleh tim Universitas Genova menunjukkan bahwa pengisian dapat dilakukan tanpa medan eksternal (Grazi et al., 2024). Karena hanya memiliki dua tingkat energi, kapasitas penyimpanan energi dalam setiap *qubit* terbatas. Sebaliknya, *qutrit* dengan tiga tingkat energi dapat menyimpan lebih banyak energi per unit dan menawarkan transisi energi yang lebih kompleks, yang meningkatkan ketahanan terhadap gangguan eksternal, kombinasi *qubit* dan *qutrit* memberikan fleksibilitas lebih besar dalam manipulasi energi dan interaksi *spin*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana performa sistem *qubit-qutrit* dibandingkan *qubit-qubit* dalam baterai kuantum berbasis rantai *spin* Heisenberg, ditinjau dari kondisi di mana *qubit-qutrit* lebih unggul serta pengaruh jumlah partikel N terhadap efisiensi pengisian dan penyimpanan energi?
- Bagaimana efisiensi transfer energi dalam sistem *qubit-qutrit* jika dibandingkan dengan model sebelumnya (*qubit-qubit*), terutama dalam hal *ergotropy*, energi pasif, dan energi total?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a) Menganalisis dan membandingkan performa sistem *qubit-qutrit* dengan *qubit-qubit* dalam baterai kuantum berbasis rantai spin Heisenberg, menentukan kondisi optimal yang *qubit-qutrit* lebih unggul, serta menginvestigasi pengaruh jumlah partikel N terhadap efisiensi pengisian dan penyimpanan energi.
- b) Menentukan efisiensi transfer energi dalam sistem *qubit-qutrit* dibandingkan dengan model *qubit-qubit*, khususnya dalam aspek *ergotropy*, energi pasif, dan energi total.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik dari segi teoretis maupun praktis, sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Teoretis

- a) Memberikan kontribusi dalam pengembangan teori baterai kuantum dengan memperluas studi dari sistem *qubit-qubit* ke sistem *qubit-qutrit*.
- b) Memperdalam pemahaman mengenai dinamika transfer energi dalam sistem kuantum multipartit, dan efisiensinya.

1.4.2 Manfaat Praktis

- a) Memberikan alternatif model pengisian dan penyimpanan energi kuantum yang lebih efisien dengan memanfaatkan sistem *qubit-qutrit*.

- b) Berpotensi diaplikasikan dalam pengembangan teknologi baterai kuantum masa depan yang lebih efisien dibandingkan baterai klasik.

1.5 Batasan Masalah

1.5.1 Batasan pada Percobaan

- a) Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi numerik menggunakan perangkat lunak QuTiP (*Quantum Toolbox in Python*).
- b) Parameter utama dalam sistem adalah sebagai berikut:
- 1) Anisotropi interaksi spin: $\gamma = 0.5$.
 - 2) Medan magnet eksternal: $B = 1$.
 - 3) Frekuensi pengisian (*charging frequency*) untuk berbagai tingkat energi:
 - 3a) $\Delta_i = \omega_1^i - \omega_0^i = 0.6 - 0.2 = 0.4$ (transisi $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ pada *qubit*).
 - 3b) $\Delta_{j1} = \omega_1^j - \omega_0^j = 0.4 - 0.2 = 0.2$ (transisi $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ pada *qutrit*).
 - 3c) $\Delta_{j2} = \omega_2^j - \omega_1^j = 0.6 - 0.4 = 0.2$ (transisi $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ pada *qutrit*).
- c) Hasil simulasi bergantung pada validitas model teoretis yang digunakan dan mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi dunia nyata.

1.5.2 Batasan pada Jangkauan Sistem

- a) Sistem yang dikaji dalam penelitian ini adalah rantai *spin* dengan kondisi batas terbuka (*open boundary condition*).

b) Jumlah partikel dalam sistem dibatasi hingga:

- 1) Situs yang dipilih minimum $N \geq 2$, untuk $N > 5$ tidak digunakan karena biaya komputasi yang tinggi.
- 2) Interaksi antara partikel diberikan oleh parameter:
 - 2a) Kopling pertukaran: $J_i = 0.5$ untuk setiap i dan j .
 - 2b) Kopling interaksi longitudinal: $J_{z_i} = 0.2$ untuk setiap i dan j .

1.5.3 Batasan pada Metode Komputasi

- a) Simulasi dilakukan menggunakan metode Lindblad dalam QuTiP.
- b) Jumlah titik waktu dalam simulasi adalah $t_n = 1000$ dengan rentang waktu $t \in [10^{-5}, 20]$.
- c) Simulasi dilakukan dengan pendekatan numerik tanpa mempertimbangkan koreksi orde tinggi atau efek nonlinieritas yang kompleks.