

ABSTRAK

MAULANA MALIK FAJAR

NIM : 211720013

Simulasi Performa Baterai Kuantum *Qubit-Qutrit* Berbasis Model Rantai *Spin* Heisenberg

Baterai kuantum merupakan sistem penyimpanan energi yang memanfaatkan prinsip mekanika kuantum untuk meningkatkan efisiensi pengisian daya. Salah satu model yang banyak dikaji adalah baterai kuantum berbasis rantai *spin* Heisenberg dengan interaksi *qubit-qubit*. Pada penelitian ini, kami mengusulkan dan menganalisis model alternatif berbasis interaksi *qubit-qutrit* dalam sistem rantai *spin* Heisenberg untuk mengevaluasi performa penyimpanan dan transfer energi, serta mencari kemungkinan peningkatan performa baterai kuantum ini. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa untuk interaksi dasar dengan $N = 2$, model *qubit-qubit* memiliki keunggulan dalam semua aspek, termasuk efisiensi penyimpanan energi dan kecepatan transfer daya. Namun, untuk sistem kompleks dengan $N \geq 4$, model *qubit-qutrit* mulai menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan model *qubit-qubit*, terutama dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan dan stabilitas energi. Hal ini mengindikasikan bahwa model *qubit-qutrit* memiliki potensi lebih besar dalam implementasi skala besar. Dengan demikian, penelitian ini memberikan wawasan baru terhadap desain dan optimasi baterai kuantum berbasis sistem multi-level dalam rantai *spin* Heisenberg.

Kata Kunci: baterai kuantum, rantai *spin* Heisenberg, *qubit-qutrit*, interaksi multi-level, penyimpanan energi kuantum.

ABSTRACT

MAULANA MALIK FAJAR

NIM : 211720013

Performance Simulation of Qubit-Qutrit Quantum Battery Based on Heisenberg Spin Chain Model

Quantum batteries are energy storage systems that utilize the principles of quantum mechanics to improve charging efficiency. One of the most widely studied models is the quantum battery based on Heisenberg spin chains with qubit-qubit interactions. In this study, we propose and analyze an alternative model based on qubit-qutrit interactions in the Heisenberg spin chain system to evaluate the energy storage and transfer performance, and to explore the possibility of improving the performance of this quantum battery. Numerical simulations show that for small systems with $N = 2$, the qubit-qubit model outperforms the qubit-qutrit model in all aspects, including energy storage efficiency and power transfer speed. However, for systems with $N \geq 4$, the qubit-qutrit model begins to exhibit significant advantages over the qubit-qubit model, particularly in enhancing energy storage capacity and stability. This suggests that the qubit-qutrit model holds greater potential for large-scale implementations. Thus, this research provides new insights into the design and optimization of quantum batteries based on multi-level systems within the Heisenberg spin chain.

Keywords: quantum battery, Heisenberg spin chain, qubit-qutrit, multi-level interactions, quantum energy storage.

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Bersamaan dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains dan diajukan pada Program Studi Fisika Fakultas Sains Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten ini sepenuhnya asli merupakan hasil karya tulis ilmiah saya pribadi.

Adapun tulisan maupun pendapat orang lain yang terdapat dalam skripsi ini telah saya sebutkan kutipannya secara jelas dengan etika keilmuan yang berlaku di bidang penulisan karya ilmiah.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi skripsi ini merupakan hasil perbuatan plagiarisme atau mencontek karya tulis orang lain, saya bersedia untuk menerima sanksi berupa pencabutan gelar kesarjanaan yang saya terima ataupun sanksi akademik lain sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Serang, 2 Juli 2025



Maulana Malik Fajar

NIM: 211720013

Nomor : -
Lampiran : Satu (1) eks
Perihal : Pengajuan Munaqasyah
a.n. Maulana Malik Fajar
NIM. 211720013

Kepada Yth.
Dekan Fakultas
Sains
UIN SMH Banten
di-
Serang

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dipermaklumkan dengan hormat, bahwa setelah membaca dan menganalisa serta mengadakan koreksi seperlunya, kami berpendapat bahwa skripsi saudara Maulana Malik Fajar dengan NIM: 211720013 yang berjudul "Simulasi Performa Baterai Kuantum Qubit-Qutrit Berbasis Model Rantai Spin Heisenberg", telah dapat diajukan sebagai salah satu syarat untuk melengkapi ujian munaqasyah pada Fakultas Sains Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten.

Demikian atas segala perhatian Bapak kami ucapkan terima kasih.
Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Serang, 2 Juli 2025

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si
NIP. 199301022023212036

Pembimbing II



Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha
NIP. 198709202019021002

**Simulasi Performa Baterai Kuantum Qubit-Qutrit
Berbasis Model Rantai Spin Heisenberg**

Oleh:

Maulana Malik Fajar

NIM: 211720013

Menyetujui,

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si

NIP. 199301022023212036

Pembimbing II



Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha

NIP. 198709202019021002

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains



Dr. Asep Sefurrohman, M.Si.

NIP. 197808272003121003

Ketua Program Studi



Elsi Ariani, M.Si

NIP. 198901232018012001

PENGESAHAN

Skripsi atas nama Maulana Malik Fajar (NIM: 211720013) berjudul "Simulasi Performa Baterai Kuantum *Qubit-Qutrit* Berbasis Model Rantai *Spin* Heisenberg" telah diuji dan disahkan pada tanggal 15 April 2025 sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) di Fakultas Sains, Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten.

Serang, 2 Juli 2025

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si
NIP. 199301022023212036

Pembimbing II



Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha
NIP. 198709202019021002

Penguji I



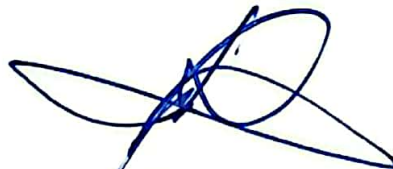
Subur Pramono, M.Si
NIP. 199006262020121002

Penguji II



Elsi Arian, M.Si
NIP. 198901232018012001

Ketua Penguji



Dr. Eko Wahyu Wibowo, M.Si
NIP. 197504142003121002

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas Akhir berjudul “Simulasi Performa Baterai Kuantum *Qubit-Qutrit* Berbasis Model Rantai *Spin* Heisenberg” disusun sebagai syarat meraih gelar S.Si. pada Program Studi Fisika, Fakultas Sains, UIN SMH Banten. Ucapan terima kasih penulis sampaikan atas dukungan berbagai pihak.

1. Allah SWT atas segala rahmat, kesehatan, dan kemudahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Prof. Dr. Wawan Wahyudin, M.Pd., Rektor UIN SMH Banten, atas kesempatan menempuh studi di kampus ini.
3. Dr. Asep Saefurrohman, M.Si., Dekan Fakultas Sains, atas dukungan selama studi.
4. Ibu Elsi Ariani, M.Si., Ketua Prodi Fisika, atas arahan dan nasihatnya.
5. Ibu Beta Nur Pratiwi, M.Si., dan Dr. Ahmad Ridwan T. Nugraha, dosen pembimbing, atas bimbingan dan masukan berharga.
6. Dr. Edi Suprayoga dan Kelompok Riset Teori Materi Kuantum BRIN, atas kesempatan riset dan dukungan pendanaan.

7. Seluruh dosen dan staf Fakultas Sains UIN SMH Banten atas ilmu dan bimbingan yang diberikan.
8. Kedua orang tua tercinta, Syamsul Hidayat dan Yulmima Yusnita, atas kasih sayang, doa, dan dukungan tiada henti.
9. Sahabat dan rekan seperjuangan atas semangat, bantuan, dan inspirasi selama studi.

Penulis menyadari tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik membangun sangat diharapkan. Semoga karya ini bermanfaat bagi semua pihak.

Serang, 2 Juli 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.4.1 Manfaat Teoretis	4
1.4.2 Manfaat Praktis	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.5.1 Batasan pada Percobaan.....	5
1.5.2 Batasan pada Jangkauan Sistem	5
1.5.3 Batasan pada Metode Komputasi	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Teori	7
2.1.1 Operator Densitas.....	7
2.1.2 Baterai Kuantum	10
2.1.3 Rantai <i>Spin</i> Heisenberg.....	12

2.2	Penelitian yang Relevan	14
2.3	Kerangka Berpikir	14
BAB III	METODE PENELITIAN	15
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2	Peralatan dan Perlengkapan	15
3.3	Pemodelan Baterai Kuantum	16
3.3.1	Model Baterai Kuantum <i>Qubit-Qutrit</i>	16
3.3.2	<i>Eigenvalues</i> dan <i>Eigenvectors</i>	18
3.3.3	Keadaan Awal dan Pasif	20
3.3.4	Efek Markovian	21
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1	Performa Baterai Kuantum <i>Qubit-Qutrit</i>	23
4.2	Efisiensi Penyimpanan Energi	30
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	32
5.1	Kesimpulan	32
5.2	Saran	32
	DAFTAR PUSTAKA	32
	LAMPIRAN A SOLUSI ANALITIK	37
A.1	Solusi Analitik: Hamiltonian Baterai Skenario Pertama	37
A.2	Solusi Analitik: Hamiltonian Baterai Skenario Kedua	40
	LAMPIRAN B Sintaks QuTiP	43

DAFTAR GAMBAR

1.1	Skema pengisian baterai klasik vs kuantum (Andolina et al. (2019)).	2
1.2	Diagram Model Rantai <i>Spin</i> Heisenberg.....	3
2.1	<i>Flowchart</i> untuk simulasi baterai kuantum <i>qubit-qutrit</i> berbasis model rantai <i>spin</i> Heisenberg	14
3.1	Skema pemodelan baterai kuantum berbasis rantai <i>spin</i> Heisenberg melalui interaksi situs <i>qubit-qutrit</i>	16
4.1	Dinamika Penyimpanan Energi dan Daya Pengisian, $N = 2$	25
4.2	Dinamika Penyimpanan Energi dan Daya Pengisian, $N = 3$	26
4.3	Dinamika Penyimpanan Energi dan Daya Pengisian, $N = 4$	27
4.4	Dinamika Penyimpanan Energi dan Daya Pengisian, $N = 5$	29
4.5	Dinamika Penyimpanan Energi dan Daya Pengisian N -Partikel	30
4.6	Efisiensi Penyimpanan Energi, untuk $N = 5$	31

DAFTAR TABEL

2.1 Kasus khusus dari Hamiltonian rantai <i>spin</i> Heisenberg .	13
3.1 Daftar alat yang digunakan	15
3.2 Daftar bahan yang digunakan.....	16
4.1 <i>Quantum object</i> untuk <i>qutrit-qubit</i>	23
4.2 <i>Quantum object</i> untuk <i>qubit-qubit</i>	24