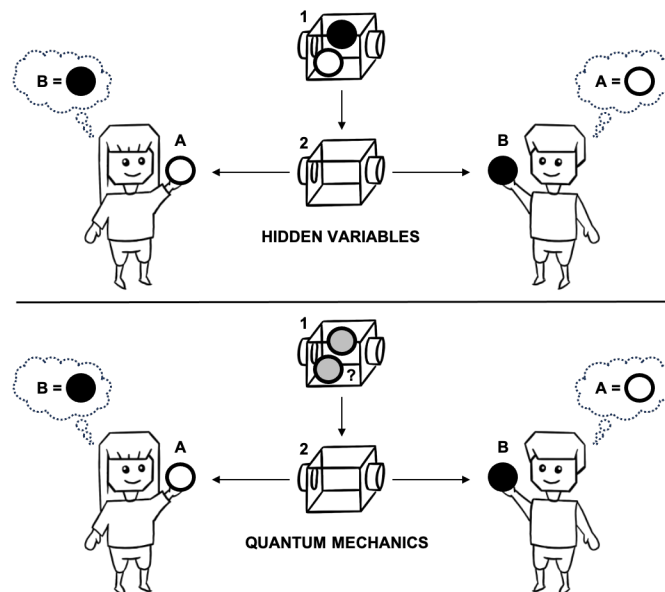


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada Tahun 2022, Alain Aspect, John Clauser, dan Anton Zeilinger dianugerahi Penghargaan Nobel Fisika atas kontribusi mereka dalam penelitian tentang *entanglement* [1]. *Entanglement* adalah fenomena pasangan foton yang tetap terhubung meskipun terpisah oleh jarak yang jauh. Dalam fenomena ini, saat salah satu pasangan foton diukur, informasi foton lainnya juga dapat diketahui, meskipun keduanya berada pada lokasi yang terpisah jauh. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan peralatan yang memancarkan dua foton yang saling terjerat sekaligus menuju filter, kemudian mengukur polarisasinya. Hal ini bertujuan untuk mengamati *violation of Bell's inequality*. *Bell's inequality* adalah sebuah cara untuk menguji hubungan foton yang saling terjerat yang dapat dijelaskan oleh fisika klasik menggunakan konsep *hidden variables*. Gambar 1.1 menunjukkan ilustrasi hasil pembuktian kebenaran mekanika kuantum dengan tidak ditemukannya *hidden variables* [2] yang menjadi pertanyaan banyak peneliti. Dengan penemuan



Gambar 1.1 Ilustrasi perbedaan *hidden variables* dan mekanika kuantum.

ini, peluang untuk mengembangkan sistem komputasi dan komunikasi kuantum menjadi terbuka lebar.

Perkembangan teknologi telepon nirkabel, telekomunikasi seluler, biasanya ditandai dengan *telecommunication generation* (G) umumnya mengacu pada perubahan sifat dasar layanan, teknologi transmisi, dan pita frekuensi baru [3]. Siklus G baru selalu muncul hampir setiap sepuluh tahun, diawali dengan *1st telecommunication generation* (1G) sebagai generasi pertama di Tahun 1979 menggunakan transmisi analog, yang terus mengalami perkembangan hingga mencapai generasi terbaru saat ini, yaitu *5th telecommunication generation* (5G). *International telecommunication union-radiocommunication sector* (ITU-R) berhasil menyusun rekomendasi *international mobile telecommunications-2030* (IMT-2030) untuk *6th telecommunication generation* (6G), yang diselesaikan pada pertemuan ke-44 di Jenewa pada tanggal 22 Juni 2022 dengan kuantum menjadi salah satu kandidat teknologi untuk digunakan dalam ekosistem 6G [4]. Beberapa aplikasi teknologi kuantum untuk 6G meliputi *quantum key distribution* (QKD), kriptografi kuantum, *quantum machine learning* (QML) dan satelit kuantum.

Komputasi kuantum dengan pesat memperoleh popularitas dalam beberapa tahun terakhir, karena perusahaan-perusahaan besar seperti Google, IBM, dan Intel telah mendorong penelitian dan pengembangan di bidang ini. Sebagai contoh, pada Tahun 2019, Google secara resmi mengumumkan pencapaian superkomputer kuantum mereka dengan menggunakan prosesor *53-qubit*, mengungguli superkomputer klasik untuk pertama kalinya dalam sebuah pengujian khusus [5]. Pada Tahun 2022, IBM meluncurkan prosesor kuantum *Osprey 433-qubit* barunya, prosesor kuantum terbesar yang pernah dibuat, dan mengklaim bahwa prosesor ini dapat melakukan berbagai hal di luar jangkauan komputer klasik mana pun [6].

Tidak seperti sistem klasik, tantangan terhadap rentan *error* dalam sistem kuantum tidak hanya terbatas pada sistem komunikasi, tetapi juga terjadi dalam sistem komputasi kuantum. Hal ini disebabkan oleh *quantum decoherence*, yang mengacu pada hilangnya koherensi dan *state* superposisi, karena interaksi dengan lingkungan sekitarnya, sehingga menyebabkan degradasi informasi kuantum. *Quantum error-correcting codes* (QECC) dapat mengatasi masalah tersebut dengan membuat *logical qubit* di atas beberapa *physical qubit* untuk mendapatkan redundansi. Beberapa penelitian QECC telah dikembangkan khususnya *stabilizer codes* seperti $[[7, 1, 3]]$ *punctured quantum Reed-Muller codes* [7], $[[5, 1, 3]]$ *quantum accumulate codes* [8], dan $[[12, 2, 4]]$ *high-rate quantum accumulate codes* [9].

Masalah utama dalam *stabilizer codes* yang dihadapi adalah setiap peningkatan jumlah informasi memerlukan *parity-check matrix* (PCM) kuantum berbeda-beda. Umumnya, PCM kuantum ini bisa didapatkan dari kode klasik seperti [7–9], sehingga upaya menemukan PCM ini membutuhkan pengetahuan mendalam atas *classical error-correcting codes* (CECC), meskipun tidak ada garansi bahwa kode kuantum yang baik akan selalu didapatkan. Salah satu pendekatan alternatif lainnya adalah *brute force*, tetapi kurang efisien, karena memerlukan banyak waktu akibat jumlah matriks yang meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya ukuran matriks.

Peningkatan jumlah informasi ini diperlukan apabila pengiriman informasi kuantum yang lebih besar dalam waktu bersamaan pada satu *block length* yang sama diharuskan. Selain itu, pengiriman informasi yang lebih besar dalam satu *block length* dapat memberikan peningkatan *throughput* data. Meskipun *coding rate* sama, kode kuantum dengan pengiriman jumlah informasi yang lebih besar memiliki kelebihan yang tidak ditawarkan ketika mengirim secara sedikit demi sedikit.

Tugas Akhir ini mengusulkan QECC yang memiliki jumlah informasi kuantum yang lebih besar daripada kuantum yang ada saat ini. Tugas akhir ini menggunakan *classical non-binary Hamming codes* pada GF(4), yaitu (5, 3) *Hamming codes* sebagai elemen *stabilizer generator* $[[5, 1, 3]]$ dari *quantum Hamming codes* dengan $K = 1$ untuk dijadikan sebagai basis dalam membuat usulan kode kuantum dengan jumlah informasi $K > 1$. Tugas Akhir ini kemudian melakukan peningkatan jumlah informasi menjadi $K = 2$ dengan $[[10, 2, 3]]$ *codes* dan $K = 4$ dengan $[[20, 4, 3]]$ *codes*, meskipun hanya dengan $[[5, 1, 3]]$ *quantum Hamming codes* sebagai basisnya.

Evaluasi kinerja usulan kode kuantum ini dilakukan dengan menghitung *quantum word error rate* (QWER) pada kanal *depolarizing* menggunakan simulasi komputer. Tugas Akhir ini berhasil membuat kode kuantum dengan $K = 2$ dan $K = 4$ yang dapat memiliki *symplectic inner product* (SIP) sama dengan nol untuk menjadwalkan seluruh *stabilizer* dan *logical operator* masing-masing *commute*. Usulan kode kuantum ini berhasil menghasilkan sindrom yang unik, sehingga dapat dikategorikan sebagai *non-degenerate codes*, karena mampu mendeteksi dan mengoreksi *single qubit error* dengan sempurna. Hasil Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan dan penelitian *stabilizer codes* khususnya sebagai alternatif kode kuantum dengan jumlah informasi kuantum yang besar.

1.2 Rumusan Masalah

Penggunaan *physical qubit* secara langsung sebagai *logical qubit* sulit dilakukan, karena adanya *quantum decoherence*. *Stabilizer codes* memberikan solusi untuk mengatasi hal tersebut dengan membangun *logical qubit* di atas beberapa *physical qubit* untuk mendapatkan redundansi. *Stabilizer codes* membutuhkan PCM kuantum sebagai dasar *stabilizer generator* dengan dua cara paling umum, yaitu: (i) PCM diturunkan dari pengkodean klasik dan (ii) PCM dari hasil *brute force*. Setiap peningkatan jumlah informasi dalam satu *block length* membutuhkan PCM kuantum berbeda-beda, sehingga kedua cara ini dinilai kurang praktis, karena membutuhkan banyak waktu untuk hanya menemukan PCM yang cocok untuk diadopsi ke QECC.

1.3 Tujuan Penelitian dan Manfaat

Tugas Akhir ini mengusulkan QECC yang memiliki jumlah informasi lebih besar daripada kuantum yang telah ada saat ini. Tugas Akhir ini menggunakan PCM kode kuantum yang telah ada saat ini sebagai basis untuk membuat kode kuantum yang diusulkan yang memiliki peningkatan jumlah informasi sebanyak dua kali dari sebelumnya, yaitu $K = 2$ dan $K = 4$. Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan QECC, khususnya *stabilizer codes*.

1.4 Batasan Permasalahan

Ruang lingkup permasalahan yang diterapkan selama pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Tugas Akhir ini hanya mengusulkan kode kuantum dengan jumlah informasi sampai *block length* $N = 20$ dengan informasi kuantum $K = 4$.
2. *Stabilizer codes* yang digunakan sebagai basis teknik ini yaitu $[[5, 1, 3]]$ *quantum Hamming codes* atas $(5, 3)$ *Hamming codes*.
3. Tugas Akhir ini hanya melakukan ekstraksi sindrom untuk tanpa *qubit error* dan setiap *single qubit error*.
4. Tugas Akhir ini menganalisis dan mengevaluasi kinerja QWER pada kanal *depolarizing*.

5. Tugas Akhir ini hanya menganalisis dan mengevaluasi kinerja QWER sampai $K = 2$ karena keterbatasan spesifikasi perangkat keras.

1.5 Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini, metode penelitian yang dilakukan meliputi:

1. Studi literatur.

Tahap ini mengumpulkan berbagai referensi yang digunakan sebagai penunjang penelitian, seperti buku, jurnal, makalah konferensi yang berkaitan dengan QECC khususnya *stabilizer codes*. Juga beberapa referensi yang bersifat literatur maupun non-literatur yang berasal dari diskusi dengan pembimbing Tugas Akhir.

2. Perancangan $[[5, 1, 3]]$ *quantum Hamming codes* atas $(5, 3)$ *Hamming codes*.

Tahap ini melakukan perancangan $[[5, 1, 3]]$ *quantum Hamming codes* atas $(5, 3)$ *Hamming codes*. Hasil perancangan ini berupa PCM kuantum yang akan dijadikan sebagai basis untuk membentuk usulan kode kuantum menggunakan teknik peningkatan jumlah informasi kuantum.

3. Usulan kode kuantum dengan jumlah informasi kuantum lebih besar.

Tahap ini mengusulkan kode kuantum dengan jumlah informasi kuantum lebih besar dengan $[[5, 1, 3]]$ *quantum Hamming codes* yang digunakan sebagai basis. Hasil kode kuantum yang diusulkan ini ditingkatkan menjadi $K = 2$ dengan $[[10, 2, 3]]$ *codes* dan $K = 4$ dengan $[[20, 4, 3]]$ *codes* yang memiliki sindrom unik.

4. Evaluasi kinerja usulan kode kuantum

Tahap ini melakukan evaluasi kinerja QWER usulan kode kuantum pada kanal *depolarizing* menggunakan simulasi komputer.

5. Penarikan kesimpulan.

Tahap ini membuat kesimpulan berdasarkan hasil usulan kode kuantum yang memiliki jumlah informasi kuantum lebih besar dari basis yang telah dibuat.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. BAB II KONSEP DASAR

Bab ini menjelaskan tentang konsep dasar *Galois field* (GF), *Hamming codes*, informasi kuantum, kanal kuantum, QECC, *stabilizer codes*, dan *quantum bound* yang menjadi dasar penelitian ini.

2. BAB III MODEL SISTEM DAN PERANCANGAN

Bab ini menjelaskan tentang pemodelan blok sistem, kode kuantum menggunakan *non-binary hamming codes* klasik, dan usulan kode kuantum dengan peningkatan jumlah informasi kuantum yang menggunakan kode kuantum yang ada saat ini sebagai basis.

3. BAB IV ANALISIS EVALUASI KINERJA

Bab ini menganalisis kinerja usulan kode kuantum dalam dua aspek, yaitu: (i) ekstraksi sindrom yang menghasilkan sindrom yang unik untuk setiap *single qubit error* dan (ii) kinerja QWER pada kanal *depolarizing*.

4. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memaparkan kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya terkait tentang QECC khususnya *stabilizer codes*.