Optimasi Kuantum: Analisis dan Pengembangan Algoritma

P2MI ITB

Andriyan B. Suksmono and Donny Danudirdjo

Lab Teknologi Kuantum, STEI, Institut Teknologi Bandung

Abstract

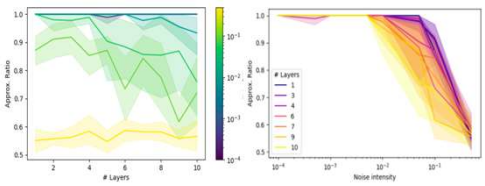
Sirkuit optimisasi variasional kuantum yang lebih dalam memiliki ekspresivitas tinggi, tetapi juga mengakumulasi lebih banyak derau. Alih-alih menyorot kedalaman mana yang paling sesuai untuk suatu perangkat, kami bertanya seberapa besar derau yang dapat ditoleransi oleh setiap kedalaman. Melalui simulasi QAOA berderau berbasis GPU untuk MaxCut (tiga keluarga graf, 6 hingga 18 simpul, kedalaman 1 hingga 10, tiga kanal derau), kami mencocokkan rasio aproksimasi dengan permukaan logistik diperumum dan mendefinisikan ambang derau efektif $r^*(p)$ sebagai batas kurva infleksinya. Ambang ini menurun terhadap kedalaman pada 35 dari 36 konfigurasi (median $\frac{r^*(10)}{r^*(1)} = 0{,}33$). Nilai terbaik dan terburuknya terhadap kedalaman membagi sumbu derau menjadi tiga wilayah operasi dengan strategi desain yang berbeda. Eksekusi satu instans pada ibm_marrakesh menunjukkan bahwa galat gerbang hasil kalibrasi lebih rendah daripada derau efektif perangkat. Meski demikian, model ambang tetap menjelaskan tren kedalaman dan mengindikasikan derau bertipe relaksasi.

Keyword: Optimisasi kombinatorika kuantum, algoritma variasional kuantum, derau kuantum.

Introduction

Trade-Off pada skema variasional kuantum. Tanpa derau, optimisasi kuantum variasional biasanya memiliki performa yang lebih baik ketika sumber daya (jumlah qubit dan gerbang kuantum) sirkuit ditingkatkan. Namun adanya derau menyangkal hubungan proporsional ini: sumber daya kuantum yang terlalu besar membuat sirkuit lebih rentan derau dan memberikan hasil yang lebih buruk; namun jika terlalu sedikit, sirkuit kurang ekspresif sehingga tidak memiliki daya yang cukup untuk menghasilkan optimisasi yang baik pula.

Celah dan kontribusi penelitian. Perspektif umum dalam literatur untuk menjawab masalah di atas: Bagaimana menentukan kuantitas sumber daya yang 'seimbang' untuk memaksimumkan hasil optimisasi dalam perangkat berderau? Kontribusi penelitian ini adalah membalik pertanyaan dasarnya: Diberikan suatu sumber daya kuantum tertentu, berapa ambang batas derau yang masih memungkinkan hasil optimisasi yang efektif?



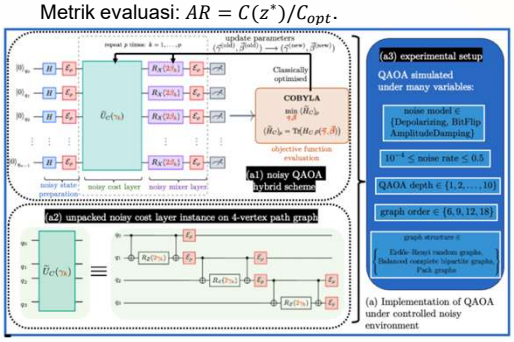
*Gambar 1. **Kiri: (perspektif umum)** menemukan layer yang memberikan aproksimasi terbaik untuk berbagai tingkat derau. **Kanan: (kontribusi penelitian ini)** menemukan ambang tingkat derau yang memungkinkan hasil aproksimasi yang efektif.*

Research Method

Simulasi kuantum sistematis. Dengan dukungan GPU, eksperimen simulasi QAOA berderau menggunakan pustaka CUDA-Q dilakukan untuk 28.800 konfigurasi dengan memvariasikan faktor sebagai berikut:

- **Graph instance:** {Erdos-Renyi random, complete bipartite, path} graphs x {6, 9, 12, 18} nodes
- **Laju derau:** 8 titik skala logaritmis dari 10^{-4} s.d. 0,5
- **Kanal derau:** depolarisasi, bit-flip, amplitude damping
- **Kedalaman sirkuit QAOA:** p = 1, ..., 10 lapis
- **Pengulangan independen:** 10 seed berbeda

Metrik evaluasi: $AR = C(z^*)/C_{opt}$.



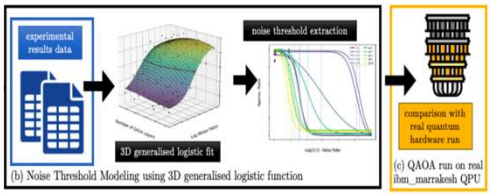
Gambar 2. Skema besar desain eksperimen simulasi QAOA berderau

Model ambang derau. Hasil AR eksperimen dilakukan curve-fitting terhadap fungsi logistik diperumum terhadap variabel kuadratik layer QAOA (p) dan tingkat derau logaritmik (s):

$$f(\mathbf{x}) = y_0 + \frac{L}{1+\exp(-b-\mathbf{x}\cdot\boldsymbol{\theta})}, \quad \mathbf{x} = (p', s', p'^2, s'^2, p's'), \quad s = -\log_{10} r$$

Nilai ambang derau $r^*(p)$ ditetapkan sebagai titik infleksi permukaan, yaitu kurva yang memenuhi persamaan $\mathrm{b} + \mathbf{x}.\boldsymbol{\theta} = 0$ di mana nilai r^* dihitung unruk setiap nilai p.

Asesmen pada perangkat kuantum. Hasil pemodelan dibandingkan dengan komputasi dengan QPU ibm_marrakesh dengan pustaka qiskit pada instance ER graph dengan 18 titik.

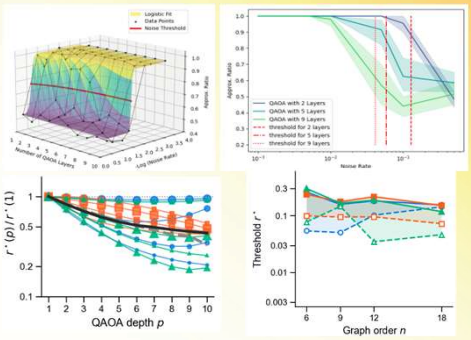


Gambar 3. Desain pemodelan dan evaluasi pasca-eksperimen

Discussion & Result

Penurunan AR bersifat tiba-tiba seiring laju derau meningkat. Hal ini berlaku untuk semua instance dan kanal derau. Permukaan logistik menangkap fenomena ini dengan cukup tepat. Ambang derau hasil pemodelan menunjukkan lokasi titik keruntuhan mendadak nilai AR.

Penurunan nilai ambang proporsional terhadap kedalaman dan kepadatan sirkuit. Sumber daya kuantum yang lebih besar akan menuntut nilai ambang yang lebih kecil untuk menjamin optimisasi berjalan efektif.



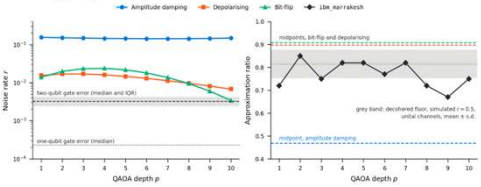
Gambar 4. Hasil pemodelan ambang derau menggunakan permukaan logistik diperumum.

Tiga wilayah operasi dengan strategi spesifik.

1. **Derau rendah:** gunakan strategi mirip simulasi tanpa derau
2. **Derau menengah:** penting untuk menentukan jumlah layer optimal
3. **Derau tinggi:** utamakan strategi mitigasi error



Komputasi pada QPU ibm_marrakesh. Laju perangkat (0.0032) berada di bawah semua ambang $r^*(p)$ namun AR yang dihasilkan berada di titik tengah kedua kanal unital. Model pada kanal amplitude damping menjelaskan AR hardware secara keseluruhan, sementara model pada kanal unital menjelaskan tren perubahan AR terhadap peningkatan layer. Pengujian ini bersifat ilustratif dan tidak menyeluruh mengingat tingginya biaya komputasi pada QPU.



Gambar 5. Hasil evaluasi pada QPU IBM.

Conclusion

- Penelitian ini membalik perspektif umum dalam menyikapi masalah trade-off antara derau dan sumber daya kuantum.
- Eksperimen simulasi QAOA berderau dilakukan secara sistematis untuk mengekstrak ambang derau efektif.
- Ambang derau menurun seiring sumber daya kuantum meningkat, memberikan 3 wilayah tingkat derau dengan strategi desain berbeda.

Riset lanjutan. Pemodelan ambang derau dapat dilakukan secara lebih spesifik terhadap perangkat tertentu untuk meningkatkan akurasi dan keandalan pemanfaatan model ambang dalam strategi desain QAOA yang realistis.

Published Outputs

1. Tjandra, Y., Sugiarto, H. S., Setiadi, C. V., Tan, J. G., & Suksmono, A. B. (2026). Effective Noise Thresholds for Reliable Quantum Approximation Optimisation Algorithm under Noisy Environment. *arXiv preprint arXiv:2610.36597*.
2. Wakaura, H., Mulyawan, R., & Suksmono, A. B. (2026). Variational quantum Kolmogorov–Arnold network: H. Wakaura et al. *Quantum Information Processing, 25(9), 288*.