UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Simulasi Sirkuit Kuantum yang Efisien pada Komputer Klasik Menggunakan Pairwise-Qubit Subsystems dan LSTM
Santana Yuda Pradata, Muhammad Alfian Amrizal, B.Eng., M.I.S., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Simulasi Sirkuit Kuantum yang Efisien pada Komputer Klasik Menggunakan Pairwise-Qubit Subsystems dan LSTM

Oleh

Santana Yuda Pradata
22/497210/PA/21404

Dalam simulasi klasik, sirkuit kuantum berukuran besar secara umum diketahui sulit disimulasikan karena penskalaan eksponensial $O(2^n)$ pada kebutuhan komputasi dan memori terhadap jumlah qubit (n). Penelitian ini mengusulkan suatu kerangka baru untuk simulasi klasik sirkuit kuantum yang menggabungkan *pairwise-qubit subsystems* (PQS) dengan *deep learning*, yang selanjutnya disebut simulasi PQS, untuk mencapai evaluasi sirkuit yang skalabel dan sangat efisien. Dengan merepresentasikan keadaan kuantum sebagai barisan *reduced density matrix* dan memodelkan interaksi dua-qubit melalui operator *unitary* yang dapat dipelajari, representasi ini menghasilkan kompleksitas ruang kuadratik dan kompleksitas waktu linear untuk setiap gerbang elementer, yaitu memori $O(n^2)$ dan waktu $O(n)$ untuk setiap aplikasi operator *unitary*. Sebuah arsitektur khusus, yaitu multi-hidden *long short-term memory* (LSTM), dilatih untuk mempelajari dan memprediksi evolusi subsistem qubit berbelit dua-dua. Penerapan metode ini didemonstrasikan pada sirkuit pencarian periode Shor dalam kasus khusus ketika periodenya merupakan pangkat dua, yang pada sirkuit ideal menghasilkan luaran tunggal dan periodenya dapat diinferensikan dari probabilitas pengukuran qubit tunggal. Meskipun hanya dilatih pada sirkuit yang lebih kecil, model ini mampu melakukan generalisasi ke jumlah qubit yang lebih besar daripada yang digunakan saat pelatihan, dengan probabilitas keberhasilan hingga 35,48% pada sirkuit 18-qubit, sekaligus menawarkan keuntungan waktu eksekusi yang signifikan dibandingkan simulasi eksak (hingga 66 kali lebih cepat pada sirkuit 24-qubit). Karena *post-processing* klasik pada algoritma Shor berbiaya rendah, simulasi PQS dapat dibungkus dalam suatu loop toleran-kesalahan untuk instans sirkuit ini, sehingga menghasilkan waktu eksekusi harapan sebesar $O(n^4/(1-\varepsilon))$, dengan $1-\varepsilon$ menyatakan probabilitas bahwa simulasi PQS mengembalikan periode yang benar. Sebagai perbandingan, penelitian ini juga menyajikan proyeksi yang dinormalisasi terhadap FLOP/s. Waktu eksekusi terukur untuk *Quantum Fourier Transform* 36-qubit diproyeksikan menjadi $0{,}158$ s pada satu node Argonne Theta (dibandingkan nilai yang dilaporkan sebesar $78{,}98$ jam), dan Shor 40-qubit diproyeksikan menjadi $19{,}3$ s pada klaster 2.048 A100 (dibandingkan ~ 200 s). Selain itu, mode kegagalan dianalisis melalui distribusi probabilitas pengukuran qubit tunggal, dan ditemukan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Simulasi Sirkuit Kuantum yang Efisien pada Komputer Klasik Menggunakan Pairwise-Qubit Subsystems dan LSTM
Santana Yuda Pradata, Muhammad Alfian Amrizal, B.Eng., M.I.S., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

bahwa kesalahan terkonsentrasi pada qubit dengan indeks paling rendah, yang menunjukkan bahwa mitigasi terarah pada hanya beberapa qubit saja mungkin sudah memadai. Simulasi PQS menunjukkan arah yang menjanjikan untuk simulasi aproksimatif, fleksibel, dan skalabel bagi algoritma kuantum pada perangkat keras klasik.

Kata-kata kunci : simulasi klasik sirkuit kuantum, *pairwise-qubit subsystems*, *deep learning*, algoritma Shor.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Simulasi Sirkuit Kuantum yang Efisien pada Komputer Klasik Menggunakan Pairwise-Qubit Subsystems dan LSTM
Santana Yuda Pradata, Muhammad Alfian Amrizal, B.Eng., M.I.S., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Efficient Simulation of Quantum Circuits on Classical Computers Using Pairwise-Qubit Subsystems and LSTM

By

Santana Yuda Pradata
22/497210/PA/21404

Classically simulating large quantum circuits is well-known to be difficult due to its exponential scaling $O(2^n)$ in computations and memory with respect to the number of qubits (n). This research proposes a novel classical simulation framework for quantum circuits, combining pairwise-qubit subsystems (PQS) with deep learning, thus called PQS simulation, to achieve scalable and highly efficient circuit evaluation. By representing quantum states as sequences of reduced density matrices and modeling two-qubit interactions through learnable unitary operators, this representation yields quadratic space and linear time per elementary gate, i.e., $O(n^2)$ memory and $O(n)$ time per-gate update. A custom multi-hidden long short-term memory architecture is trained to learn and predict the evolution of pairwise entangled qubit subsystems. This research demonstrates the applicability of the method to Shor period-finding circuits in the special case where the period is a power-of-two, for which the ideal circuit yields a unique outcome and the period can be inferred from single-qubit measurement probabilities. Despite being trained on smaller circuits, the model generalizes to higher qubit counts than those required during training, achieving success probabilities up to 35.48% on the 18-qubit circuit, while simultaneously offering significant run-time advantages over exact simulation (up to 66 times faster on the 24-qubit circuit). Because Shor's classical post-processing is cheap, it is possible to wrap PQS simulation in an error-tolerant loop for these circuit instances, which results in an expected runtime of $O(n^4/(1-\varepsilon))$, where $1-\varepsilon$ is the probability that PQS simulation returns the correct period. For comparisons, this research further provides FLOP/s-normalized projections. Our measured 36-qubit Quantum Fourier Transform runtime projects to $0.158\,\mathrm{s}$ on a single Argonne Theta node (versus a reported $78.98\,\mathrm{h}$), and 40-qubit Shor projects to $19.3\,\mathrm{s}$ on a 2,048-A100 cluster (versus $\sim 200\,\mathrm{s}$). This research also analyzes failure modes via the distribution of single-qubit measurement probabilities and find errors concentrated in the lowest index qubit, suggesting that targeted mitigation on only a few qubits may suffice. The PQS simulation exhibits a promising direction for approximate, flexible, and scalable simulation of quantum algorithms on classical hardware.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Simulasi Sirkuit Kuantum yang Efisien pada Komputer Klasik Menggunakan Pairwise-Qubit Subsystems dan LSTM
Santana Yuda Pradata, Muhammad Alfian Amrizal, B.Eng., M.I.S., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Keyword : classical simulation of quantum circuits, pairwise-qubit subsystems, deep learning, Shor's algorithm.