

ANALISIS PRESTASI DAN SKALABILITI ALGORITMA DEUTSCH DAN DEUTSCH-JOZSA MENGGUNAKAN PENGKOMPUTERAN QUANTUM AWAN IBM

MUHAMMAD QAYYUM BIN AHMAD ZABIDI

DR. BAHARI BIN IDRUS

*Fakulti Teknologi & Sains Maklumat, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi,
Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

ABSTRAK

Pengkomputeran quantum menawarkan pendekatan baharu dalam menyelesaikan masalah klasifikasi fungsi dengan menggunakan prinsip superposisi dan interferens quantum. Algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa merupakan antara algoritma asas yang menunjukkan kelebihan quantum dari segi pengurangan bilangan pertanyaan fungsi yang diperlukan berbanding pendekatan klasik. Kajian ini membangunkan dan melaksanakan kedua-dua algoritma tersebut menggunakan persekitaran pembangunan Qiskit dan platform IBM Quantum. Rangka kerja yang dibina merangkumi simulasi dan pelaksanaan pada perkakasan sebenar, dengan ujian dijalankan ke atas oracle malar dan seimbang. Analisis terhadap struktur litar, taburan kebarangkalian dan kepelbagaian hasil pengukuran digunakan untuk menilai keberkesanan pelaksanaan. Eksperimen dijalankan pada dua platform perkakasan quantum yang berbeza iaitu IBM Brisbane (Heron r1) dan IBM Sherbrooke (Eagle r3) dengan purata ketepatan melebihi 98%. Algoritma Deutsch mencapai pecutan $2\times$ manakala Deutsch-Jozsa mencapai pecutan $5\times$ berbanding pendekatan klasik. Kajian ini menyediakan asas untuk memahami keupayaan algoritma quantum asas serta kebolehlaksanaannya dalam persekitaran pengkomputeran quantum awan.

Kata kunci: Algoritma Deutsch, Algoritma Deutsch-Jozsa, pengkomputeran quantum, IBM Quantum, Qiskit

PENGENALAN

Pengkomputeran quantum merupakan satu cabang yang baharu dalam bidang ilmu komputer dan fizik di mana ia dibangunkan berasaskan prinsip mekanik quantum untuk memproses maklumat secara lebih efisien. Teknologi ini berbeza dengan komputer klasik yang

menggunakan bit sebagai unit asas manakala komputer quantum pula menggunakan qubit yang memiliki sebuah keunikan apabila berada dalam keadaan superposisi yang membawa dua nilai iaitu 0 dan 1 secara serentak.

Kebangkitan minat para ilmuwan terhadap komputeran quantum bermula sejak 1990-an apabila algoritma Shor diperkenalkan di mana ia berupaya untuk mempercepatkan kriptanalisis yang secara tidak langsung menyebabkan potensi komputer quantum untuk mengatasi had komputer klasik semakin diakui. Selain itu, keupayaan komputer quantum untuk menyelesaikan masalah kompleks seperti pengoptimuman dalam Travelling Salesman Problem (TSP) dan simulasi molekul menjadikannya sangat penting dalam pelbagai bidang.

Penyataan Masalah

Masalah penentuan sifat fungsi merupakan cabaran fundamental dalam sains komputer klasik di mana pengiraan perlu dilakukan untuk menentukan sama ada sesuatu fungsi adalah malar (constant) yang memberikan output yang sama untuk semua input, atau jenis seimbang (balanced) yang memberikan output yang berbeza untuk separuh daripada input.

Mengikut pendekatan pengkomputeran klasik, penentuan sifat sesuatu fungsi dengan n input memerlukan sehingga $2^{(n-1)} + 1$ panggilan fungsi dalam kes terburuk. Sebagai contohnya, untuk fungsi dengan 4 input, komputer klasik mungkin memerlukan sehingga 9 panggilan fungsi untuk menentukan sama ada fungsi tersebut malar atau seimbang. Hal ini menjadi semakin kompleks apabila bilangan input bertambah yang menyebabkan jumlah panggilan fungsi yang diperlukan meningkat secara eksponen.

Objektif Kajian

Kajian ini merangkumi objektif seperti berikut:

1. Mempelajari mengenai pemprosesan pengaturcaraan quantum
2. Memahami bagaimana pembinaan dan implementasi algoritma quantum
3. Implementasi Algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa untuk klasifikasi fungsi menggunakan pendekatan pengkomputeran quantum melalui Qiskit

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam kajian ini menggunakan model air terjun yang terdiri daripada tiga fasa utama: analisis, reka bentuk, dan implementasi ujian. Platform yang digunakan adalah Qiskit sebagai rangka kerja utama untuk implementasi eksperimen algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa.

Qiskit Terra

Qiskit Terra menyediakan alat fundamental untuk pembinaan litar quantum dan pengurusan transpilasi. Dalam kajian ini, Terra digunakan untuk membangunkan litar quantum bagi algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa dengan spesifikasi $n+1$ qubit iaitu 2-3 qubit input dan 1 qubit ancilla.

Qiskit Aer

Qiskit Aer digunakan untuk menjalankan simulasi quantum sebagai asas perbandingan dengan peranti sebenar. Simulasi ideal dilaksanakan menggunakan AerSimulator tanpa model gangguan untuk mendapatkan hasil teoretikal yang sempurna.

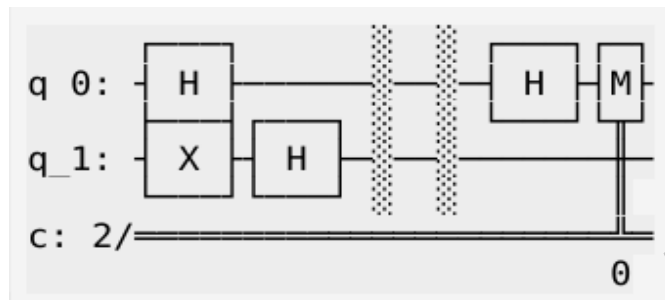
Qiskit IBM Runtime

Qiskit IBM Runtime merupakan komponen utama yang digunakan untuk menjalankan eksperimen pada peranti quantum sebenar keluaran IBM. Dalam kajian ini, eksperimen dilaksanakan pada dua backend utama. Backend pertama ialah IBM Brisbane (Heron r1) yang mempunyai 127 qubit dengan topologi heksagon berat. Backend kedua ialah IBM Sherbrooke (Eagle r3) yang turut memiliki 127 qubit tetapi dengan volum quantum bernilai 32. Kedua-dua backend ini membolehkan pelaksanaan algoritma quantum dengan keupayaan pengkomputeran yang tinggi dan sesuai untuk pelbagai jenis ujian serta simulasi.

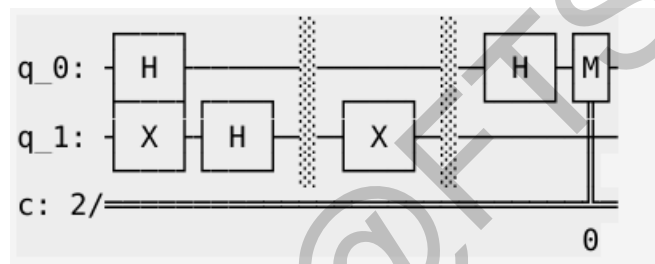
Teori Algoritma Deutsch

Algoritma Deutsch beroperasi menggunakan sistem dua qubit yang terdiri daripada qubit input dan qubit ancilla. Algoritma ini direka khusus untuk menentukan sama ada fungsi yang tidak diketahui adalah malar atau seimbang menggunakan hanya satu pertanyaan oracle, berbanding dengan keperluan dua pertanyaan dalam pendekatan klasik konvensional.

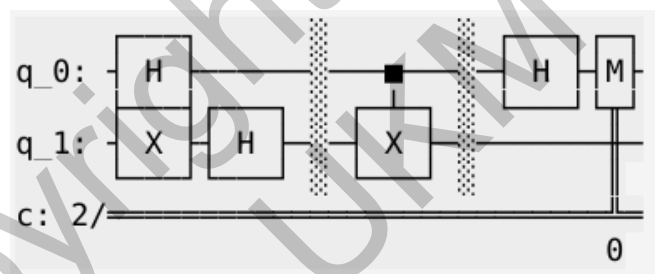
Struktur Litar Deutsch



Rajah 1.1: Hasil Pelaksanaan Algoritma Deutsch untuk Fungsi Malar dengan $f(0) = 0$, $f(1) = 0$



Rajah 1.2: Hasil Pelaksanaan Algoritma Deutsch untuk Fungsi Malar dengan $f(0) = 1$, $f(1) = 1$



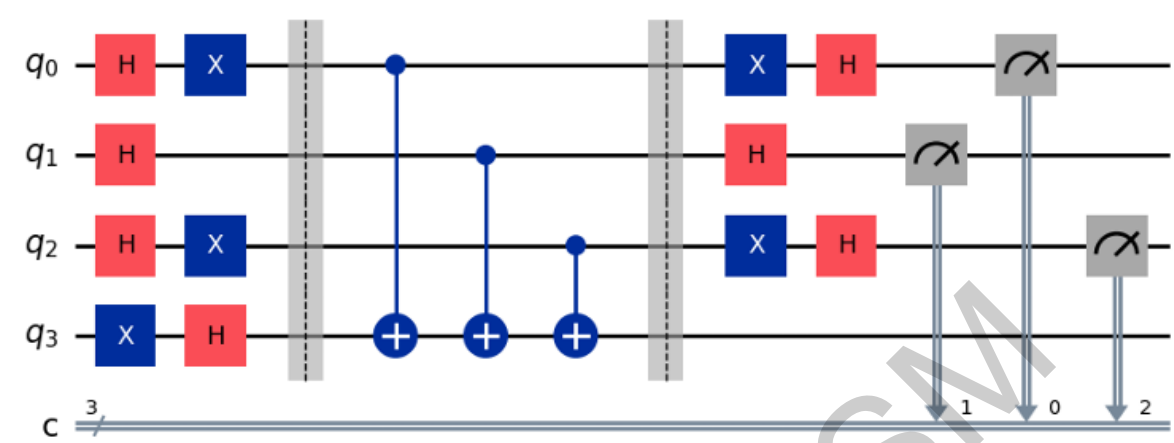
Rajah 1.3: Hasil Pelaksanaan Algoritma Deutsch untuk Fungsi Seimbang dengan $f(0) = 0$, $f(1) = 1$

Rajah 1.1 dan 1.2 menunjukkan pelaksanaan untuk fungsi malar dengan nilai output yang berbeza, namun kedua-duanya menghasilkan pengukuran $|0\rangle$ pada qubit input. Sebaliknya, Rajah 1.3 menunjukkan pelaksanaan untuk fungsi seimbang yang menghasilkan pengukuran $|1\rangle$.

Teori Algoritma Deutsch-Jozsa

Algoritma Deutsch-Jozsa merupakan generalisasi algoritma Deutsch untuk fungsi dengan input yang lebih besar. Algoritma ini menunjukkan kelebihan quantum yang eksponensial dalam menentukan sama ada fungsi n -bit adalah malar atau seimbang menggunakan hanya satu pertanyaan oracle.

Struktur Litar Deutsch-Jozsa



Rajah 1.4: Litar Lengkap Deutsch-Jozsa untuk n = 3

Rajah 1.4 menunjukkan implementasi Algoritma Deutsch-Jozsa dengan tiga qubit input (q_0 , q_1 , q_2) dan satu qubit ancilla (q_3). Litar dimulakan dengan gerbang X dan H ke atas qubit ancilla untuk menghasilkan keadaan $|-\rangle$, diikuti gerbang Hadamard ke atas semua qubit input bagi membentuk superposisi. Bahagian oracle (dalam garis putus-putus) melaksanakan fungsi seimbang berdasarkan pola b_str , yang menentukan kedudukan gerbang X dan CNOT antara input dan ancilla.

Perbandingan Kompleksiti

Jadual 1.2: Perbandingan Kompleksiti Algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa

Algoritma	Bit Input	Ruang Fungsi	Fungsi Mungkin	Kueri Oracle
Deutsch	1	$\{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$	4	2 classical, 1 quantum
Deutsch-Jozsa	3	$\{0,1\}^3 \rightarrow \{0,1\}$	256	5 classical, 1 quantum

Transpilasi Kod ke IBM Quantum

```
OPENQASM 2.0;
include "qelib1.inc";
qreg q[127];
creg c[2];
rz(pi/2) q[2];
sx q[2];
rz(pi/2) q[2];
rz(pi/2) q[47];
sx q[47];
rz(-pi/2) q[47];
barrier q[2],q[47];
barrier q[2],q[47];
rz(pi/2) q[2];
sx q[2];
rz(pi/2) q[2];
measure q[2] -> c[0];
```

Rajah 1.4: Kod QASM Brisbane bagi fungsi malar $f(x) = 0$

```
from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister, QuantumCircuit
from numpy import pi

qreg_q = QuantumRegister(127, 'q')
creg_c = ClassicalRegister(2, 'c')
circuit = QuantumCircuit(qreg_q, creg_c)

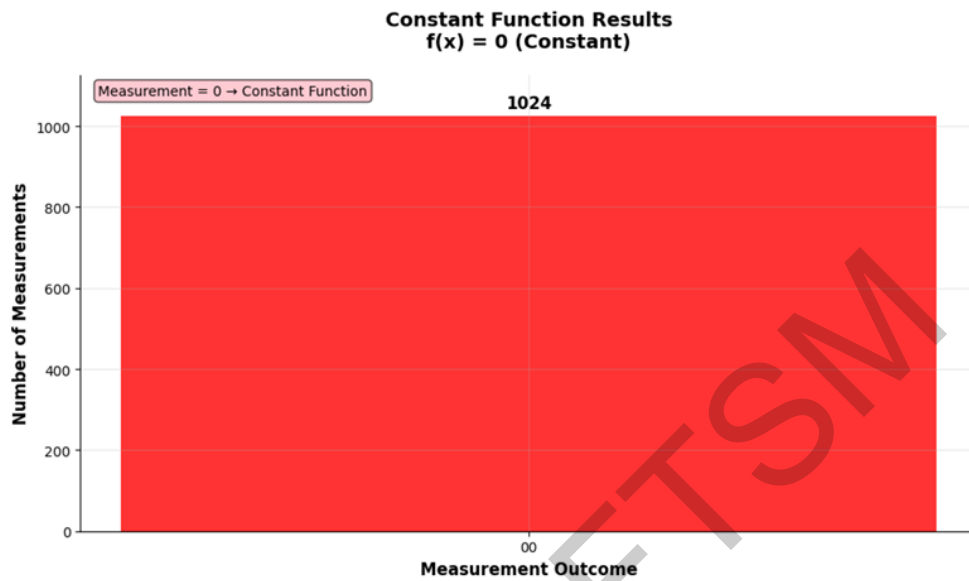
circuit.rz(pi / 2, qreg_q[2])
circuit.sx(qreg_q[2])
circuit.rz(pi / 2, qreg_q[2])
circuit.rz(pi / 2, qreg_q[47])
circuit.sx(qreg_q[47])
circuit.rz(-pi / 2, qreg_q[47])
circuit.barrier(qreg_q[2], qreg_q[47])
circuit.barrier(qreg_q[2], qreg_q[47])
circuit.rz(pi / 2, qreg_q[2])
circuit.sx(qreg_q[2])
circuit.rz(pi / 2, qreg_q[2])
circuit.measure(qreg_q[2], creg_c[0])
```

Rajah 1.5: Kod Qiskit Brisbane bagi fungsi malar $f(x) = 0$

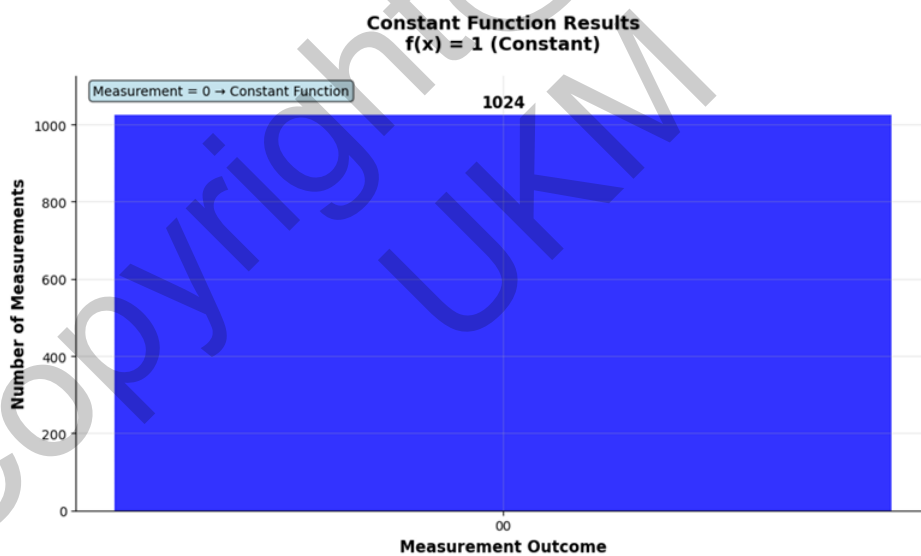
Qiskit ditranspile ke QASM sebelum dihantar ke backend sebenar. Gerbang seperti H dan X ditukar kepada rz, sx, barrier. Qubit logik seperti q[0], q[1] dipetakan kepada q[2], q[47] berdasarkan topologi perkakasan IBM.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

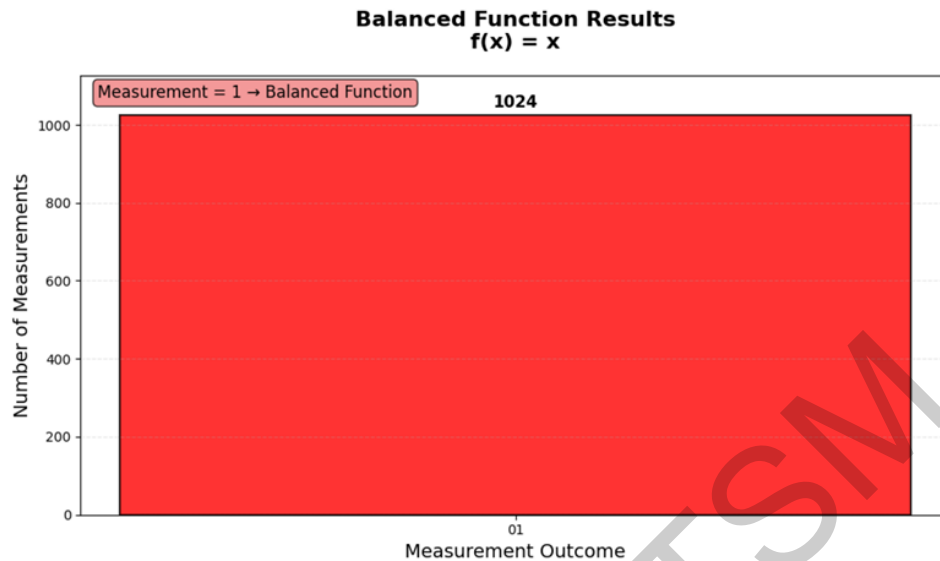
Keputusan Eksperimen Algoritma Deutsch



Rajah 1.6: Histogram keputusan simulasi untuk fungsi malar $f(x) = 0$



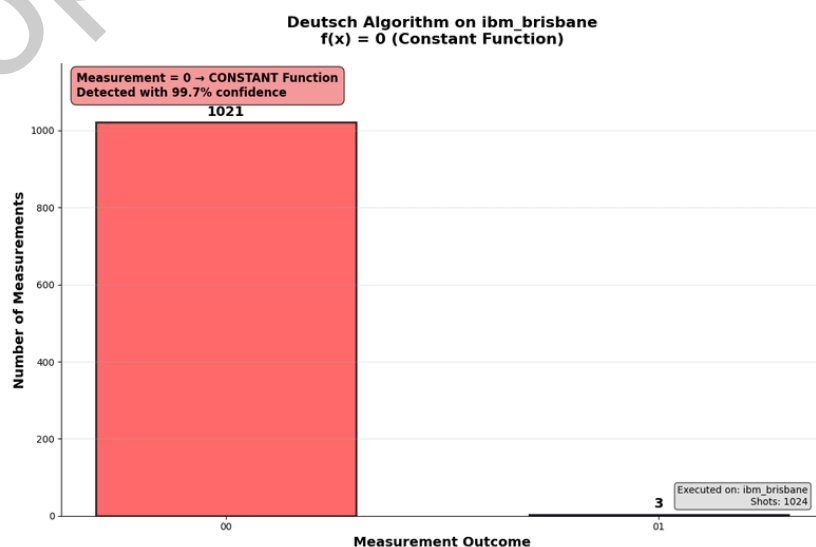
Rajah 1.7: Histogram keputusan simulasi untuk fungsi malar $f(x) = 1$



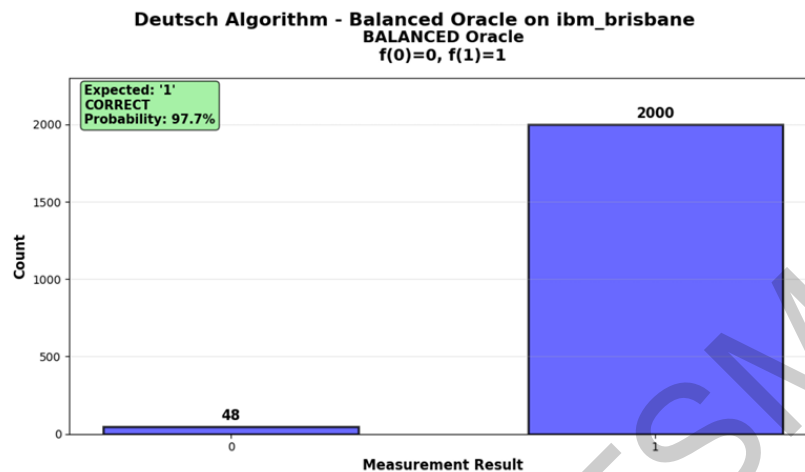
Rajah 1.8: Histogram keputusan simulasi untuk fungsi seimbang $f(x) = x$

Simulasi yang dijalankan menunjukkan keputusan yang sempurna bagi semua jenis fungsi yang diuji. Bagi fungsi malar $f(x)=0$ dan $f(x)=1$, sebanyak 100% pengukuran memberikan nilai '0' daripada 1024 tembakan yang dilakukan. Sementara itu, bagi fungsi seimbang $f(x)=x$, keputusan simulasi juga menunjukkan ketepatan penuh dengan 100% pengukuran menghasilkan nilai '1' daripada 1024 tembakan. Keputusan ini membuktikan bahawa simulasi berfungsi dengan tepat mengikut teori yang diharapkan.

Keputusan Perkakasan Sebenar IBM Brisbane Algoritma Deutsch



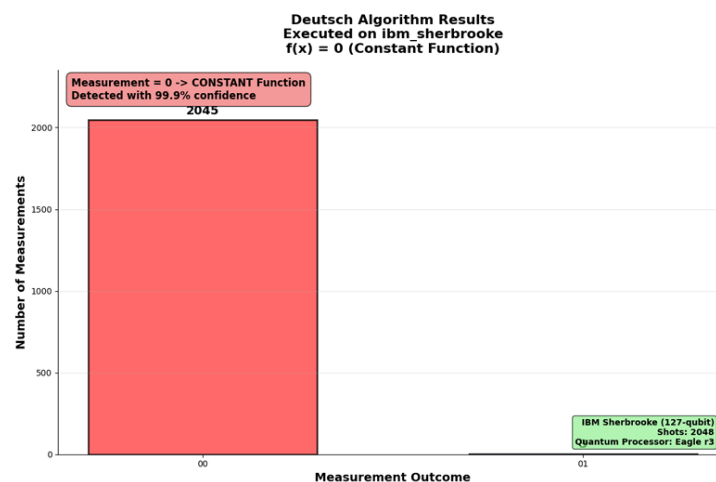
Rajah 1.9: Histogram hasil pengukuran Brisbane bagi fungsi malar $f(x) = 0$



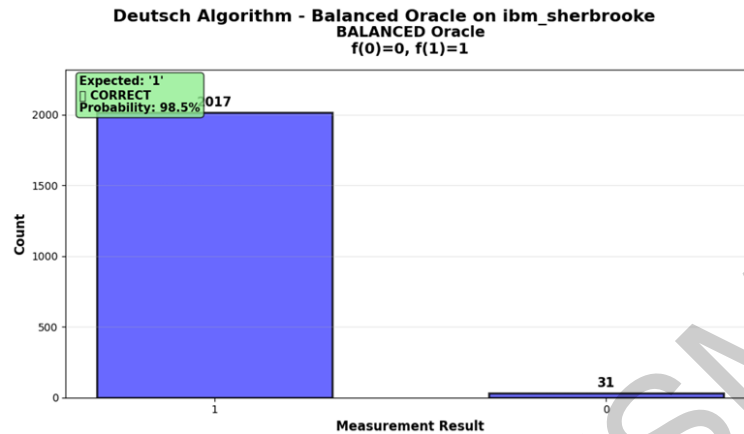
Rajah 1.10: Histogram hasil pengukuran Brisbane bagi fungsi seimbang $f(x) = x$

Bagi ujian menggunakan peranti quantum sebenar, keputusan menunjukkan tahap ketepatan yang tinggi untuk kedua-dua jenis fungsi. Bagi fungsi malar, ketepatan yang dicapai ialah $99.7\% \pm 0.5\%$, dengan 1021 daripada 1024 pengukuran adalah betul. Manakala bagi fungsi seimbang, ketepatan yang direkodkan ialah $97.7\% \pm 0.7\%$, dengan 2000 daripada 2048 pengukuran adalah betul. Keputusan ini membuktikan bahawa pelaksanaan algoritma masih mengekalkan prestasi yang hampir sempurna walaupun dijalankan pada peranti quantum sebenar yang terdedah kepada bunyi (noise) dan ralat pengukuran.

Keputusan Perkakasan Sebenar IBM Sherbrooke Algoritma Deutsch



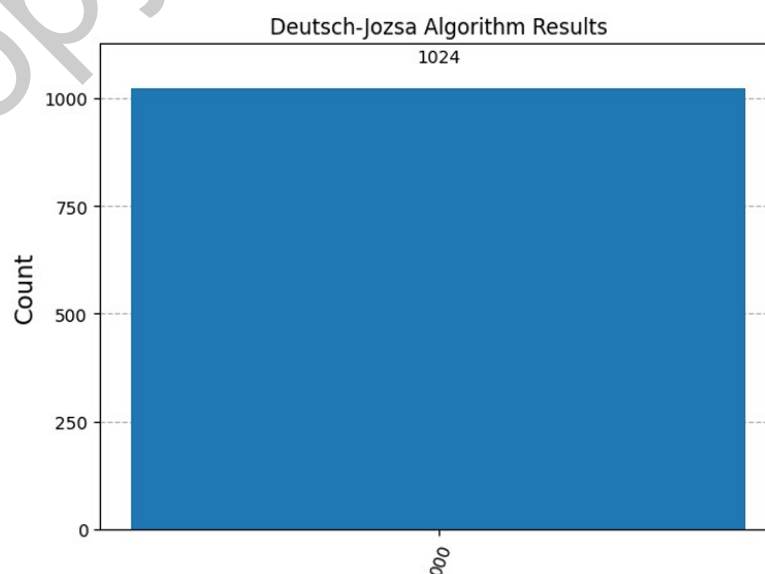
Rajah 1.11: Histogram hasil pengukuran Sherbrooke bagi fungsi malar $f(x) = 0$



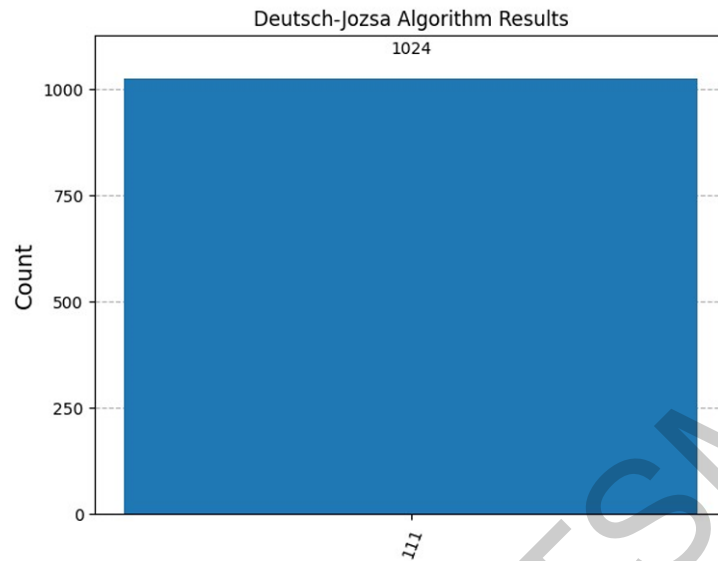
Rajah 1.12: Histogram hasil pengukuran Sherbrooke bagi fungsi seimbang $f(x) = x$

Bagi ujian yang dijalankan pada peranti quantum sebenar, keputusan menunjukkan prestasi yang sangat tinggi untuk kedua-dua jenis fungsi. Bagi fungsi malar, ketepatan yang dicapai ialah $99.9\% \pm 0.2\%$, dengan 2045 daripada 2048 pengukuran adalah betul. Sementara itu, bagi fungsi seimbang, ketepatan yang direkodkan ialah $98.5\% \pm 0.5\%$, dengan 2017 daripada 2048 pengukuran adalah betul. Hasil ini mengesahkan bahawa algoritma dapat dilaksanakan dengan tahap ketepatan yang hampir sempurna walaupun berhadapan dengan kesan bunyi (noise) dan ralat yang wujud pada peranti quantum sebenar.

Keputusan Eksperimen Algoritma Deutsch-Jozsa

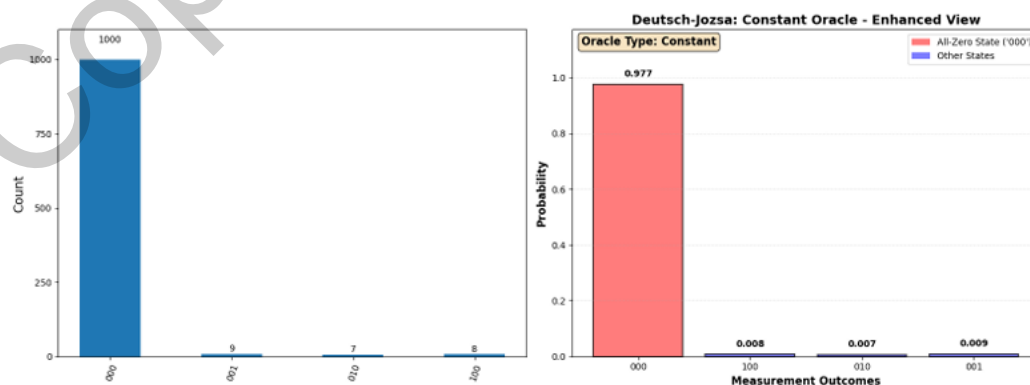


Rajah 1.13: Histogram simulasi algoritma Deutsch-Jozsa dengan oracle malar $f(x) = 0$

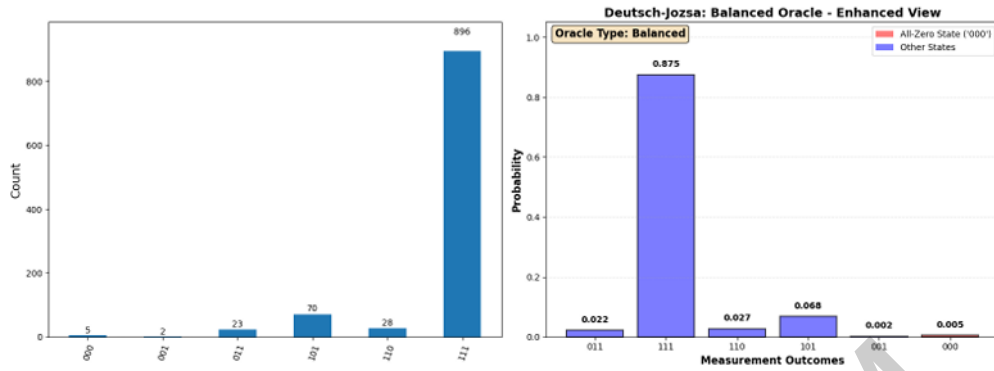


Rajah 1.14: Histogram simulasi algoritma Deutsch-Jozsa dengan oracle seimbang $f(x) = x$. Berdasarkan keputusan yang ditunjukkan dalam kedua-dua rajah, simulasi yang dijalankan memberikan ketepatan sempurna bagi setiap jenis fungsi yang diuji. Bagi fungsi malar $f(x)=0$, sebanyak 100% pengukuran menghasilkan nilai 000 daripada 1024 tembakan yang dilakukan. Manakala bagi fungsi seimbang $f(x)=x$, simulasi juga mencapai ketepatan penuh dengan 100% pengukuran memberikan nilai 111 daripada 1024 tembakan. Keputusan ini membuktikan bahawa pelaksanaan algoritma dalam simulasi adalah selaras sepenuhnya dengan teori yang diharapkan.

Keputusan Perkakasan Sebenar IBM Brisbane Algoritma Deutsch-Jozsa



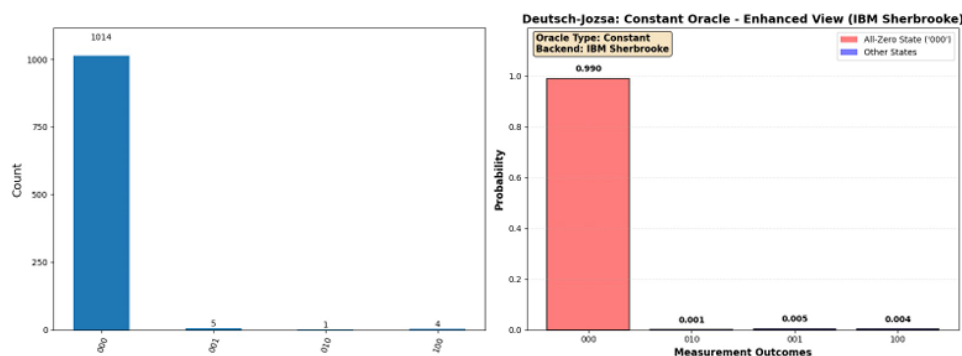
Rajah 1.15: Histogram kiraan dan kebarangkalian Brisbane bagi fungsi malar $f(x) = 0$



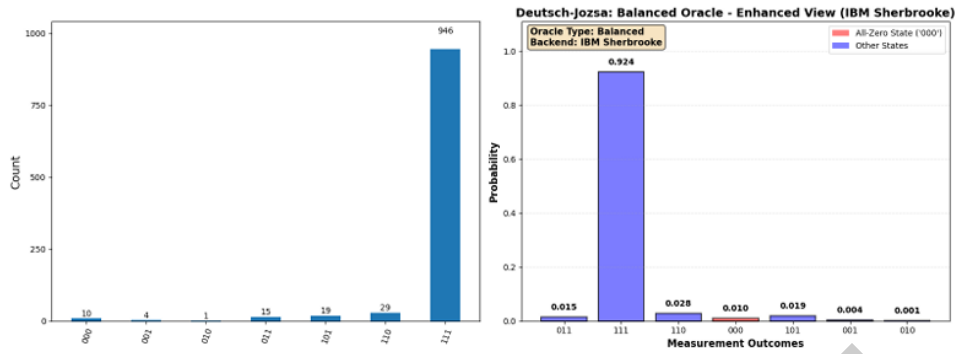
Rajah 1.16: Histogram kiraan dan kebarangkalian Brisbane bagi fungsi seimbang $f(x) = x$

Bagi ujian menggunakan peranti quantum sebenar, keputusan menunjukkan prestasi yang selaras dengan jangkaan teori bagi kedua-dua jenis fungsi. Bagi fungsi malar, eksperimen menghasilkan keadaan dominan $|000\rangle|000\rangle|000\rangle$ pada kadar 97.7% (1001 daripada 1024 pengukuran), manakala keadaan lain seperti $|001\rangle|001\rangle|001\rangle$, $|010\rangle|010\rangle|010\rangle$ dan $|100\rangle|100\rangle|100\rangle$ hanya muncul pada kadar $\sim 2.3\%$ yang mewakili artifak hingar quantum, dengan tiada keadaan multi-bit kompleks dikesan, sekali gus mengesahkan klasifikasi fungsi malar dengan keyakinan tinggi. Bagi fungsi seimbang, penindasan keadaan $|000\rangle|000\rangle|000\rangle$ yang hanya 0.5% (5 daripada 1024 pengukuran) menunjukkan gangguan musnah yang berjaya, sementara keadaan dominan $|111\rangle|111\rangle|111\rangle$ muncul pada kadar 87.5% (896 daripada 1024 pengukuran), diikuti beberapa keadaan bukan sifar lain seperti $|001\rangle|001\rangle|001\rangle$, $|011\rangle|011\rangle|011\rangle$, $|101\rangle|101\rangle|101\rangle$ dan $|110\rangle|110\rangle|110\rangle$ yang menandakan penyebaran amplitud akibat hingar. Keputusan ini membuktikan bahawa algoritma berjaya mengklasifikasikan kedua-dua fungsi dengan tahap keyakinan yang tinggi walaupun pelaksanaan dilakukan pada peranti quantum sebenar yang terdedah kepada bunyi dan ralat pengukuran.

Keputusan Perkakasan Sebenar IBM Sherbrooke Algoritma Deutsch-Jozsa



Rajah 1.17: Histogram kiraan dan kebarangkalian Sherbrooke bagi fungsi malar $f(x) = 0$



Rajah 1.18: Histogram kiraan dan kebarangkalian Sherbrooke bagi fungsi seimbang $f(x) = x$

Bagi ujian menggunakan peranti quantum sebenar IBM Sherbrooke, keputusan menunjukkan prestasi yang lebih baik berbanding IBM Brisbane dari segi pengurangan hingar dan ketepatan pengukuran. Bagi fungsi malar, keadaan dominan $|000\rangle|000\rangle|000\rangle$ dicapai pada kadar 99.0% (1014 daripada 1024 pengukuran), dengan taburan ralat hanya 1.0% berbanding 2.3% pada Brisbane, menunjukkan peningkatan ketepatan gangguan membina dan taburan kebarangkalian yang lebih tertumpu hasil daripada kalibrasi perkakasan yang lebih baik. Bagi fungsi seimbang, penindasan keadaan $|000\rangle|000\rangle|000\rangle$ pada 1.0% (10 daripada 1024 pengukuran) mengesahkan gangguan musnah yang kuat, manakala taburan pengukuran memperlihatkan 7 daripada 8 keadaan 3-qubit yang mungkin, dengan gangguan quantum pelbagai dan puncak amplitud utama pada $|001\rangle|001\rangle|001\rangle$, $|010\rangle|010\rangle|010\rangle$, $|011\rangle|011\rangle|011\rangle$, $|101\rangle|101\rangle|101\rangle$, $|110\rangle|110\rangle|110\rangle$ dan $|111\rangle|111\rangle|111\rangle$. Keputusan ini membuktikan bahawa pelaksanaan algoritma pada platform seni bina Eagle r3 bukan sahaja mengekalkan klasifikasi fungsi dengan tahap keyakinan tinggi (99.0%) tetapi juga memperlihatkan koheren quantum serta ketepatan gerbang yang lebih unggul.

Analisis Taburan Kebarangkalian

Jadual 1.3: Kepelbagaian Keadaan Output Mengikut Jenis Oracle dan Platform

Platform	Jenis Oracle	Keadaan Berbeza Diperhatikan	Maksimum Teori	Nisbah Kepelbagaian
Brisbane	Malar	4 keadaan	1 ideal, 8 maksimum	$4/8 = 50\%$
Brisbane	Seimbang	6 keadaan	7-8 dijangka	$6/8 = 75\%$
Sherbrooke	Malar	4 keadaan	1 ideal, 8 maksimum	$4/8 = 50\%$
Sherbrooke	Seimbang	7 keadaan	7-8 dijangka	$7/8 = 87.5\%$

Prestasi Keseluruhan

Jadual 1.4: Prestasi Eksperimen Mengikut Platform dan Jenis Oracle

Platform	Algoritma	Oracle Malar	Oracle Seimbang	Purata Ketepatan (%)	Pecuta Quantum	Kadar Ralat
AerSimulator	Deutsch	100.0	100.0	100.0	2×	0.0
AerSimulator	Deutsch-Jozsa	100.0	100.0	100.0	5×	0.0
IBM Brisbane	Deutsch	99.7	97.7	98.7	2×	0.3 – 2.3
IBM Brisbane	Deutsch-Jozsa	98.1	99.4	98.8	5×	0.6 – 1.9
IBM Sherbrooke	Deutsch	99.9	98.5	99.2	2×	0.1 – 1.5
IBM Sherbrooke	Deutsch-Jozsa	98.5	99.9	99.2	5×	0.1 – 1.5

Analisis Pertumbuhan Kelebihan Quantum

Jadual 1.5: Pertumbuhan Kelebihan Quantum Mengikut Bilangan Qubit

Qubit (n)	Pertanyaan Klasik	Pertanyaan Quantum	Faktor Pecutan
1	2	1	2×
2	3	1	3×
3	5	1	5×
4	9	1	9×
5	17	1	17×
n	$2^{n-1} + 1$	1	$(2^{n-1} + 1) \times$

Perbandingan Prestasi Antara Platform

Jadual 1.6: Perbandingan Ketepatan Mengikut Platform dan Jenis Oracle

Algoritma	Jenis Oracle	IBM Brisbane (% Error)	IBM Sherbrooke (% Error)	Penambahbaikan Sherbrooke
Deutsch (2-qubit)	Malar	99.7 (0.3%)	99.9 (0.1%)	67% lebih baik
Deutsch (2-qubit)	Seimbang	97.7 (2.3%)	98.5 (1.5%)	35% lebih baik
Deutsch(Purata)	Malar+Seimbang	98.7 (1.3%)	99.2 (0.8%)	38% lebih baik
Deutsch-Jozsa (3-qubit)	Gabungan	98.8 (1.9%)	99.2 (1.5%)	21% lebih baik

KESIMPULAN

Kajian ini telah berjaya melaksanakan dan mengesahkan keupayaan algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa dalam menyelesaikan masalah klasifikasi fungsi melalui pendekatan pengkomputeran quantum. Dengan menggunakan platform Qiskit dan peranti sebenar IBM Quantum (Brisbane dan Sherbrooke), kedua-dua algoritma telah menunjukkan prestasi tinggi dengan kadar ketepatan melebihi 98%.

Dapatan utama kajian ini menunjukkan bahawa kelebihan quantum dapat dibuktikan dengan jelas, di mana algoritma Deutsch mencapai pecutan sebanyak $2\times$ manakala algoritma Deutsch-Jozsa mencapai pecutan sehingga $5\times$ berbanding pendekatan klasik. Dari segi prestasi perkakasan sebenar, keputusan eksperimen menunjukkan hierarki ketepatan iaitu AerSimulator (100%) diikuti oleh IBM Sherbrooke (99.2%) dan IBM Brisbane (98.8%). Selain itu, analisis skalabiliti mendapati bahawa pertumbuhan eksponen dalam kelebihan quantum berdasarkan bilangan qubit memberikan potensi besar untuk aplikasi yang lebih kompleks pada masa hadapan. Kedua-dua platform quantum sebenar juga menunjukkan tahap kebolehpercayaan yang tinggi dengan konsistensi dalam mengklasifikasikan fungsi, sekali gus mengukuhkan keyakinan terhadap keberkesanan pendekatan quantum dalam penyelesaian masalah berskala besar. Implikasi dan Cadangan

Kajian ini membuktikan bahawa algoritma quantum asas dapat dilaksanakan dengan jayanya dalam persekitaran perkakasan quantum sebenar. Bagi memperluaskan potensi penyelidikan, beberapa arah kajian lanjutan disarankan, termasuk peningkatan skala implementasi kepada bilangan qubit yang lebih tinggi (4–8 qubit), integrasi teknik pembetulan ralat quantum seperti kod stabilizer bagi meningkatkan ketepatan, serta pengembangan aplikasi kepada masalah dunia sebenar seperti pencarian dalam pangkalan data. Secara keseluruhannya, projek ini telah meletakkan asas kukuh untuk penerokaan lanjut dalam era pengkomputeran quantum, dengan potensi aplikasi yang bukan sahaja relevan dalam bidang akademik, tetapi juga melangkaui kepada sektor industri dan penyelidikan teknologi masa hadapan.

PENGHARGAAN

Pertama sekali, saya ingin mengucapkan setinggi-tinggi kesyukuran ke hadrat Allah SWT kerana dengan limpah kurnia dan izin-Nya, saya dapat menyiapkan kajian ini dengan jayanya. Terima kasih khas ditujukan kepada penyelia saya, Dr. Bahari Bin Idrus, atas bimbingan, dorongan, dan nasihat yang amat bernilai sepanjang proses penyelidikan ini.

Saya juga ingin merakamkan penghargaan kepada Fakulti Teknologi dan Sains Maklumat, Universiti Kebangsaan Malaysia atas kemudahan dan sokongan yang telah disediakan. Ucapan terima kasih juga kepada IBM Quantum Network atas akses kepada platform pengkomputeran quantum yang membolehkan kajian ini dilaksanakan.

RUJUKAN

- Arodz, H. (2020). Quantum computing for computer scientists. Cambridge University Press.
- Barends, R., et al. (2014). Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. *Nature*, 508(7497), 500–503.
- Cross, A., Bishop, L. S., Sheldon, S., Nation, P. D., & Gambetta, J. M. (2018). Open quantum assembly language. *arXiv preprint arXiv:1707.03429*.
- IBM Quantum Blog. (2024). AI-enhanced transpiler for optimized circuits. <https://www.ibm.com/blogs/research/2024/03/quantum-transpiler-ai/>
- IBM Quantum Team. (2021). System architecture and Qubit topology. *IBM Quantum Documentation*.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press.
- Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information*, 2(1), 1–8.
- Portugal, R. (2022). *Quantum walks and search algorithms*. Springer.
- Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.