

Kajian Tentang Komputer Kuantum Sebagai Pengganti Komputer Konvensional Di Masa Depan

Herlambang Saputra*, Politeknik Negeri Sriwijaya

Abstrak—Peran teknologi dalam pengembangan teknologi informasi (IT, *information technology*), sudah tidak diragukan lagi. Teknologi komputer merupakan salah satu teknologi yang paling cepat mengalami perkembangan dan kemajuan. Komputer yang nantinya layak untuk benar-benar disebut sebagai Komputer Super ini adalah Komputer Kuantum. *Quantum Computer* atau komputer kuantum memanfaatkan fenomena ‘aneh’ yang disebut sebagai superposisi. Komputer kuantum tidak menggunakan Bits tetapi QUBITS (*Quantum Bits*) dan komputer digital melakukan perhitungan secara linier, sedangkan komputer kuantum melakukan semua perhitungan secara bersamaan (simultan). Pada komputer kuantum juga terdapat beberapa gate seperti yang terdapat pada komputer konvensional yang berfungsi dalam pengaturan *qubit*. Saat ini perkembangan teknologi sudah menghasilkan komputer kuantum sampai 7 qubit, tetapi menurut penelitian dan analisa yang ada, dalam beberapa tahun mendatang teknologi komputer kuantum bisa mencapai 100 qubit.

Kata Kunci—komputer quantum, qubit, gate

I. PENDAHULUAN

Peran teknologi dalam pengembangan teknologi informasi (IT, *information technology*), sudah tidak diragukan lagi.

Bertambahnya kecepatan komputer dari waktu ke waktu, meningkatnya kapasitas *hardisk* dan memori, semakin kecil dan bertambahnya fungsi telepon genggam, adalah contoh-contoh kongkrit produk teknologi di bidang IT.

Teknologi komputer merupakan salah satu teknologi yang paling cepat mengalami perkembangan dan kemajuan. Komputer-komputer yang ada saat ini sudah mencapai kemampuan yang sangat mengagumkan. Tetapi kedahsyatan komputer tercanggih yang ada saat ini pun masih belum bisa memuaskan keinginan manusia yang bermimpi untuk membuat sebuah superkomputer yang benar-benar memiliki kecepatan super. Komputer yang nantinya layak untuk benar-benar disebut sebagai Komputer Super ini adalah Komputer Kuantum.

Teori tentang komputer kuantum ini pertama kali dicetuskan oleh fisikawan dari Argonne National Laboratory sekitar 20 tahun lalu. Paul Benioff merupakan orang pertama yang

mengaplikasikan teori fisika kuantum pada dunia komputer di tahun 1981.

Komputer yang biasa kita gunakan sehari-hari merupakan komputer digital. Komputer digital sangat berbeda dengan komputer kuantum yang super itu. Komputer digital bekerja dengan bantuan *microprocessor* yang berbentuk chip kecil yang tersusun dari banyak transistor. *Microprocessor* biasanya lebih dikenal dengan istilah *Central Processing Unit (CPU)* dan merupakan ‘jantung’nya komputer. *Microprocessor* yang pertama adalah Intel 4004 yang diperkenalkan pada tahun 1971. Komputer pertama ini cuma bisa melakukan perhitungan penjumlahan dan pengurangan saja. Adapun permasalahannya adalah ketidakpuasan manusia terhadap kecepatan pada komputer konvensional yang ada sekarang.

Kajian ini ditulis dengan tujuan untuk mengkaji sejauh mana teori-teori yang berkembang tentang komputer kuantum yang berkembang akhir-akhir ini. Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk memperluas pengetahuan tentang teknologi komputer kuantum, khususnya bagi penulis dan pembaca.

II. DASAR TEORI

A. Komputer Konvensional

Pada memory komputer *digital* menggunakan sistem *binary* atau sistem angka basis 2 (0 dan 1) yang dikenal sebagai BIT (singkatan dari *Binary digIT*). Konversi dari angka desimal yang biasa kita gunakan (angka berbasis 10 yang memiliki nilai 0 sampai 9) adalah sebagai berikut:

0 = 0	5 = 101	10 = 1010
1 = 1	6 = 110	11 = 1011
2 = 10	7 = 111	12 = 1100
3 = 11	8 = 1000	13 = 1101
4 = 100	9 = 1001	

Untuk menghitung angka apa yang dilambangkan oleh 101001 caranya sebagai berikut :

$$(1 \times 32) + (0 \times 16) + (1 \times 8) + (0 \times 4) + (0 \times 2) + (1 \times 1) = 32 + 0 + 8 + 0 + 0 + 1 = 41.$$

Contoh perhitungan penjumlahan matematika menggunakan sistem *binary*:

*Herlambang Saputra adalah staf pengajar Jurusan Teknik Komputer Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Sumatera Selatan (e-mail: herlambang_s@telkom.net).

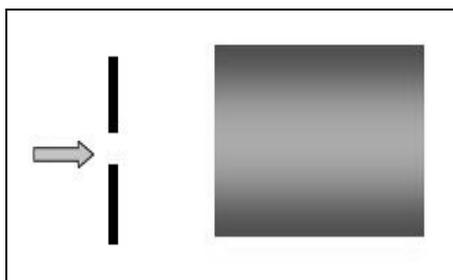
$$\begin{array}{r} 10 \\ 23 + \\ \hline 33 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1010 \\ 10111 + \\ \hline 100001 \end{array}$$

Sistem inilah yang selama ini kita gunakan saat kita mengolah informasi menggunakan komputer digital atau komputer konvensional yang ada saat ini.

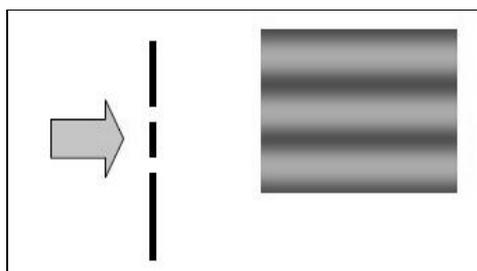
B. Fenomena Kuantum

Fisika kuantum berkembang secara luarbiasa pada abad ke-20. Perkembangan teknologi yang begitu luar biasa saat ini terjadi karena berkembang dari fisika kuantum tersebut.

Anggap seberkas elektron dilewatkan pada sebuah celah tunggal sempit. Elektron-elektron ini akan tersebar pada layar yang diletakkan dibelokkan celah sempit itu. Tiap tempat di layar itu dapat ditempati oleh elektron (Gambar 1). Jika celah tunggal itu kita ganti dengan celah ganda, elektron akan terdistribusi dalam bentuk pita-pita terang. Elektron tidak akan menempati daerah gelap (Gambar 2)



Gambar 1. Seberkas elektron yang dilewatkan pada celah tunggal sempit

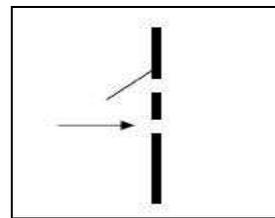


Gambar 2. Seberkas elektron yang dilewatkan pada celah ganda

Keanehan terjadi ketika hanya satu elektron bergerak mendekati salah satu celah pada celah ganda. Ketika kedua celah terbuka elektron tidak akan menempati bagian pita gelap pada layar. Tapi ketika elektron tepat tiba dicelah, lalu celah yang satunya ditutup tiba-tiba, elektron ternyata dapat menempati bagian pita gelap ini (Gambar 3). Ketika kita menutup celah yang satunya, gerakan kita tidak mengganggu gerakan elektron, tapi mengapa elektron sepertinya tahu bahwa kita menutup celah itu.

Dari peristiwa ini, para fisikawan menyimpulkan bahwa kita tidak bisa menyimpulkan sesuatu sampai suatu eksperimen

dilakukan. Dengan kata lain tidak ada kepastian sampai kita membuktikannya dengan eksperimen. Tidak ada yang pasti di alam ini. Segala sesuatu mempunyai kans. Bahkan untuk suatu hal yang mustahilpun masih ada kans.



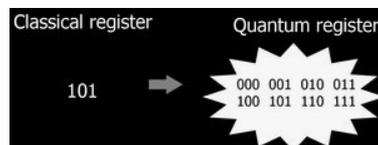
Gambar 3. Elektron dapat menempati bagian pita gelap

III. KONSEP KOMPUTER KUANTUM

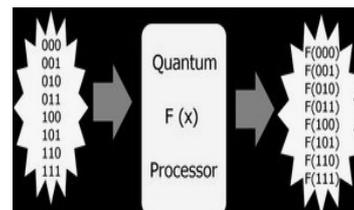
Quantum Computer atau komputer kuantum memanfaatkan fenomena ‘aneh’ yang disebut sebagai superposisi. Dalam mekanika kuantum, suatu partikel bisa berada dalam dua keadaan sekaligus. Inilah yang disebut keadaan superposisi. Dalam komputer kuantum, selain 0 dan 1 dikenal pula superposisi dari keduanya. Ini berarti keadaannya bisa berupa 0 dan 1, bukan hanya 0 atau 1 seperti di komputer digital biasa. Komputer kuantum tidak menggunakan Bits tetapi QUBITS (*Quantum Bits*). Karena kemampuannya untuk berada di bermacam keadaan (*multiple states*), komputer kuantum memiliki potensi untuk melaksanakan berbagai perhitungan secara simultan sehingga jauh lebih cepat dari komputer digital. Komputer kuantum menggunakan partikel yang bisa berada dalam dua keadaan sekaligus, misalnya atom-atom yang pada saat yang sama berada dalam keadaan tereksitasi dan tidak tereksitasi, atau foton (partikel cahaya) yang berada di dua tempat berbeda pada saat bersamaan.



Gambar 4. Perbedaan bits dan qubits



Gambar 5. Ilustrasi register quantum



Gambar 6. Ilustrasi quantum processor

Atom memiliki konfigurasi *spin*. Spin atom bisa ke atas (*up*), bisa pula ke bawah (*down*). Misalnya saat *spin* atom mengarah ke atas (*up*) kita beri lambang 1, sedangkan *spin down* adalah 0 (seperti dalam sistem binary di komputer digital). Atom-atom berada dalam keadaan superposisi (memiliki *spin up* dan *down* secara bersamaan) sampai kita melakukan pengukuran. Tindakan pengukuran memaksa atom untuk ‘memilih’ salah satu dari kedua kemungkinan itu. Ini berarti sesudah kita melakukan pengukuran, atom tidak lagi berada dalam keadaan superposisi. Atom yang sudah mengalami pengukuran memiliki *spin* yang tetap: *up* atau *down*.

Saat konsep ini diterapkan dalam komputer kuantum, keadaan superposisi terjadi pada saat proses perhitungan sedang berlangsung. Sistem perhitungan pada komputer kuantum ini berbeda dengan komputer digital. Komputer digital melakukan perhitungan secara linier, sedangkan komputer kuantum melakukan semua perhitungan secara bersamaan (karena ada *multiple states* semua perhitungan dapat berlangsung secara simultan di semua *state*). Ini berarti ada banyak kemungkinan hasil perhitungan. Untuk mengetahui jawabannya (hasil perhitungannya) kita harus melakukan pengukuran qubit. Tindakan pengukuran qubit ini menghentikan proses perhitungan dan memaksa sistem untuk ‘memilih’ salah satu dari semua kemungkinan jawaban yang ada. Dengan sistem paralelisme perhitungan ini, kita bisa membayangkan betapa cepatnya komputer kuantum. Komputer digital yang paling canggih saat ini (setara dengan komputer kuantum 40 qubit) memiliki kemampuan untuk mengolah semua data dalam buku telepon di seluruh dunia (untuk menemukan satu nomor telepon tertentu) dalam waktu satu bulan. Jika menggunakan komputer kuantum proses ini hanya memerlukan waktu 27 menit.

Ada satu fenomena ‘aneh’ lain dari mekanika kuantum yang juga dimanfaatkan dalam teknologi komputer kuantum: Entanglement. Jika dua atom mendapatkan gaya tertentu (*outside force*) kedua atom tersebut bisa masuk pada keadaan ‘entangled’. Atom-atom yang saling terhubung dalam entanglement ini akan tetap terhubung walaupun jaraknya berjauhan. Analoginya adalah atom-atom tersebut seperti sepasang manusia yang punya ‘telepati’. Jika yang satu dicubit, maka pasangannya (di mana pun ia berada) akan merasa sakit.

Perlakuan terhadap salah satu atom mempengaruhi keadaan atom pasangannya. Jika yang satu memiliki *spin up* (kita baru bisa mengetahuinya setelah melakukan pengukuran) maka kita langsung mengetahui bahwa pasangannya pasti memiliki *spin down* tanpa kita perlu mengukurnya kembali. Ini melambangkan sistem komunikasi yang super cepat. Komunikasi menggunakan komputer kuantum bisa mencapai kecepatan yang begitu luar biasa karena informasi dari satu tempat ke tempat lain dapat ditransfer secara instant. Begitu cepatnya sehingga terlihat seakan-akan mengalahkan kecepatan cahaya.

IV. QUBIT

Perhatikan dua contoh binary berikut ini: 011 dan 111. Binary pertama adalah 3 dan binary ke dua adalah 7. Secara umum, tiga digit angka tersebut ditulis dengan $2^3 = 8$ dalam konfigurasi yang berbeda yang mewakili integer 0 sampai 7. Namun, tiga digit angka yang tersimpan tersebut hanya mampu menyimpan satu angka pada suatu keadaan waktu.

Qubit pada sistem quantum yang ditulis Boolean dengan angka 0 dan 1 diwakili oleh suatu ketetapan kuantum normal dan orthogonal mutual yang dinyatakan dengan $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Kedua bentuk tersebut membentuk sebuah basis komputasional dan yang lain ditulis sebagai superposisi yaitu $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ dimana α dan β dalam hal itu adalah $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Qubit adalah tipikal sistem mikroskopik, misalnya: atom, *nuclear spin* dan polarisasi photon. Kumpulan dari qubit n dinamakan sebuah register quantum yang berukuran n .

Kita asumsikan bahwa informasi disimpan dalam bentuk *binary register*. Sebagai contoh angka 6 diwakili oleh $|1\rangle \otimes |1\rangle \otimes |0\rangle$. Pada bentuk notasi yang rapi, $|a\rangle$ merupakan produk tensor $|a_{n-1}\rangle \otimes |a_{n-2}\rangle \dots |a_1\rangle \otimes |a_0\rangle$ dimana $a_i \in \{0,1\}$ dan mewakili sebuah register kuantum yang dengan nilai $a = 2^0 a_0 + 2^1 a_1 + \dots + 2^{n-1} a_{n-1}$. Ada 2^n macam keadaan, yang mewakili semua binary dari panjang n atau angka dari 0 sampai $2^n - 1$, dan kesemuanya membentuk basis komputasional yang baik. Pada contoh berikut $a_i \in \{0,1\}^n$ (a adalah binary *string* dengan dengan panjang n) menyatakan bahwa $|a\rangle$ termasuk ke dalam basis komputasional.

Sehingga quantum register angka 3 bisa menyimpan angka 3 atau 7 tersendiri, $|0\rangle \otimes |1\rangle \otimes |1\rangle \equiv |011\rangle \equiv |3\rangle$, dan $|1\rangle \otimes |1\rangle \otimes |1\rangle \equiv |111\rangle \equiv |7\rangle$. Namun, bisa juga menyimpan keduanya sekaligus. Bagaimana kalau kita ambil qubit pertama, dan daripada menempatkannya ke dalam $|0\rangle$ ataupun $|1\rangle$, kita siapkan superposisi $1/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)$, kemudian didapatkan:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \otimes |1\rangle \otimes |1\rangle &\equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|011\rangle + |111\rangle), \\ &\equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|3\rangle + |7\rangle). \end{aligned}$$

Pada kenyataannya, kita bisa menyiapkan register ini ke dalam superposisi dengan semua delapan angka -- sangatlah cukup untuk meletakkan setiap qubit ke dalam superposisi $1/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)$ sehingga,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle),$$

Yang juga bisa ditulis ke dalam binary berikut: (konstanta normalisasi $2^{-3/2}$ diabaikan),

$$|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle.$$

Atau dalam notasi desimal seperti :

$$|0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + |3\rangle + |4\rangle + |5\rangle + |6\rangle + |7\rangle,$$

Atau secara sederhana seperti:

$$\sum_{x=0}^7 |x\rangle.$$

V. GATE PADA KOMPUTER KUANTUM

Pengolahan di atas, dan manipulasi qubit lainnya harus dilakukan oleh operasi gabungan (*unitary operations*). *Gate* logika kuantum merupakan alat yang melakukan operasi gabungan yang benar pada qubit yang terpilih dan pada waktu yang juga tepat. Jaringan kuantum adalah sebuah alat yang terdiri dari *gate* logika kuantum yang langkah komputasionalnya disinkronisasikan dengan waktu. Output dari sejumlah *gate* dihubungkan oleh sejumlah kabel mengarah ke input lainnya. Ukuran jaringan adalah jumlah *gate* didalamnya.

A. Hadamard Gate

Gate kuantum yang paling umum adalah *Gate Hadamard*, yaitu *gate* qubit tunggal *H* melakukan transformasi gabungan yang dikenal dengan istilah Transformasi Hadamard, dan didefinisikan oleh:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad |x\rangle \rightarrow \boxed{H} \rightarrow (-1)^x |x\rangle + |1-x\rangle$$

Matriks di atas ditulis dalam basis komputasional $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ serta diagram di bagian kanan menampilkan gambaran skematik dari *gate H* berdasarkan qubit dalam $|x\rangle$, dengan $x=0,1$.

B. Fase Shift Gate

Gate qubit tunggal lainnya – *shift gate* ϕ diartikan sebagai $|0\rangle \mapsto |0\rangle$ dan $|1\rangle \mapsto e^{i\phi}$, atau, dalam notasi matriks,

$$\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix} \quad |x\rangle \rightarrow \text{---} \bullet \text{---} e^{ix\phi} |x\rangle$$

Gate Hadamard dan *gate shift* bisa digabungkan untuk membangun jaringan berikutnya (dengan ukuran 4) yang menghasilkan keadaan nyata yang paling umum dari qubit tunggal (sampai ke fase global), konsekuensinya, *gate* Hadamard dan *gate shift* sudah cukup untuk membangun operasi gabungan apapun pada qubit tunggal.

C. C-Note Gate

Supaya bisa melibatkan dua (atau lebih qubit) kita harus memperpanjang daftar *gate* kuantum menjadi *gate* dua qubit. *Gate* dua qubit yang paling terkenal adalah NOT kontrol (C-NOT), juga dikenal sebagai XOR atau *gate* pengukuran. *Gate* tersebut meloncat ke target kedua jika qubit kontrol pertama

adalah $|1\rangle$ dan tidak bisa melakukan apa-apa jika qubit kontrolnya adalah $|0\rangle$. *Gate* tersebut diwakili oleh matriks gabungan.

D. Control-U Gate

Secara umum, dua jenis qubit *gate control* secara keseluruhan membentuk *control U*, untuk sejumlah transformasi gabungan qubit tunggal *U*. *Control U gate* mengaplikasikan identitas transformasi ke qubit yang lebih rendah ketika qubit control berada dalam keadaan $|1\rangle$. Peta *gate* $|0\rangle|y\rangle$ ke $|0\rangle|y\rangle$.

Gate Hadamard, semua *shift gate*, dan C-NOT, membentuk sebuah set *universal gate*, yaitu jika C-NOT dan Hadamard dan semua *shift gate* lainnya tersedia lalu operasi gabungan *gate n* apapun bisa disimulasikan dengan $O(4^n)$ seperti *gate* BBC95.

Sebuah komputer kuantum bisa dilihat sebagai jaringan kuantum (atau keluarga jaringan kuantum) dan komputasi kuantum didefinisikan sebagai sebuah evolusi gabungan jaringan yang mengambil keadaan awal “input” kedalam keadaan akhir “output”. Kita telah memilih model jaringan komputasi, daripada mesin Turing, karena lebih sederhana, lebih mudah dijalankan dan lebih relevan ketika mengarah pada implementasi fisik dari komputasi kuantum.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa sistem pada komputer konvensional (komputer digital) sangat berbeda. Untuk komputer konvensional menggunakan bit 0 dan 1. Untuk komputer kuantum menggunakan qubit 0, 1 dan superposisi 0 dan 1.

Kecepatan komputer quantum lebih cepat dari pada komputer konvensional (komputer digital) karena melakukan proses secara simultan tidak secara linear seperti komputer konvensional.

Saat ini perkembangan teknologi sudah menghasilkan komputer kuantum sampai 7 qubit, tetapi menurut penelitian dan analisa yang ada, dalam beberapa tahun mendatang teknologi komputer kuantum bisa mencapai 100 qubit. Kita bisa membayangkan betapa cepatnya komputer masa depan nanti. Semua perhitungan yang biasanya butuh waktu berbulan-bulan, bertahun-tahun, bahkan berabad-abad pada akhirnya bisa dilaksanakan hanya dalam hitungan menit.

REFERENSI

[1] Beiser, Arthur. 1982. *Concepts of Modern Physics, 3rd Edition*. McGraw-Hill, Inc
 [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_gate (tersedia online)
 [3] http://www.quantiki.org/wiki/index.php/Basic_concepts_in_quantum_computation (tersedia online)
 [4] http://www.quantiki.org/wiki/index.php/What_is_Quantum_Computation.htm (tersedia online)
 [5] www.yohanessurya.com/download/penulis/Bermimpi_07.pdf (tersedia online)
 [6] www.yohanessurya.com/download/penulis/mestakung_02.pdf (tersedia online)