



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



KEILMUAN MASA DEPAN

KOMPUTASI KUANTUM DAN METAVERSE

Penulis

Hermawan Kresno Dipojono, Freddy Permana Zen, Donny Dwiputra,
Hadyan Luthfan Prihadi, I Gst. Ag. Anom Trenggana D., Seramika Ariwahjoedi,
Andriyan Bayu Suksmono, Yusep Rosmansyah,
Emir Mauludi Husni, Asyraf Atthariq Putra Gary

Editor

Bambang Riyanto Trilaksono, Delik Hudalah,
Edy Tri Baskoro, Mindriany Syafila



Keilmuan Masa Depan

Komputasi Kuantum dan Metaverse

Keilmuan Masa Depan

Komputasi Kuantum dan Metaverse

Penulis:

Hermawan Kresno Dipojono

Freddy Permana Zen

Donny Dwiputra

Hadyan Luthfan Prihadi

I Gst. Ag. Anom Trenggana D.

Seramika Ariwahjoedi

Andriyan Bayu Suksmono

Yusep Rosmansyah

Emir Mauludi Husni

Asyraf Atthariq Putra Gary

Editor:

Bambang Riyanto Trilaksono

Delik Hudalah

Edy Tri Baskoro

Mindriany Syafila

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

Keilmuan Masa Depan: Komputasi Kuantum dan Metaverse

Penulis

Hermawan Kresno Dipojono
Freddy Permana Zen
Donny Dwiputra
Hadyan Luthfan Prihadi
I Gst. Ag. Anom Trenggana D.
Seramika Ariwahjoedi
Andriyan Bayu Suksmono
Yusep Rosmansyah
Emir Mauludi Husni
Asyraf Atthariq Putra Gary

Editor

Bambang Riyanto Trilaksono
Delik Hudalah
Edy Tri Baskoro
Mindriany Syafila

Editor Bahasa

Rina Lestari

Desainer (Kover dan Isi)

Ripky

Cetakan I

2023

ISBN

978-623-297-370-1

e-ISBN

978-623-297-371-8 (PDF)

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

SAMBUTAN

Buku ini merupakan salah satu hasil rekomendasi yang diperoleh dari penyelenggaraan Seri Webinar **FGB ITB Future Science and Technology Talk**. Topik tentang Sains dan Teknologi Kuantum untuk Masa Depan dibahas pada webinar tersebut, yang diselenggarakan oleh Forum Guru Besar ITB, pada tanggal 24 Juni 2022 yang lalu. Pembicara pada saat itu adalah Prof. Hermawan K. Dipojono dari FTI ITB, Prof. Freddy Permana Zen dari FMIPA ITB, dan Prof. Andriyan Bayu Suksmono dari STEI ITB. Selain itu, topik Metaverse: Peluang dan Tantangan “Dunia Baru” diangkat pada webinar tersebut pada tanggal 30 September 2022, dengan Pembicara: Prof. Emir Mauludi Husni dan Prof. Yusep Rosmansyah yang keduanya dari STEI ITB.

Buku ini berisi tentang pemikiran dari para pembicara di atas berkaitan dengan kedua topik tersebut serta diperkaya dengan hasil diskusi tentang hal tersebut. Selain rekaman video dari kedua acara ini yang tersimpan dalam kanal Youtube FGB ITB, kami sangat berharap bahwa kehadiran buku ini dapat memberikan pencerahan dan tambahan wawasan yang komprehensif kepada kita semua terhadap topik hangat di atas.

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada Komisi II FGB ITB “Keilmuan Masa Depan” yang diketuai oleh Prof. Ir. Bambang Riyanto, Ph.D. atas terselenggaranya acara webinar tersebut. Kami juga memberikan apresiasi yang tinggi kepada Prof. Hermawan K. Dipojono, Prof. Freddy Permana Zen, Prof. Andriyan B. Suksmono, Prof. Emir Husni dan Prof. Yusep Rosmansyah atas perkenannya untuk berbagi ilmu dan pemikiran yang saya yakin akan banyak memberikan manfaat bagi masyarakat dan bangsa.

Bandung, 10 November 2023

Ketua Forum Guru Besar ITB
Prof. Edy Tri Baskoro, M.Sc., Ph.D.



KATA PENGANTAR

Salah satu fungsi Forum Guru Besar adalah memikirkan dan mengembangkan keilmuan masa depan. Fungsi ini dipandang sangat penting dan relevan bagi pengembangan keilmuan di ITB maupun secara nasional dan global. Bahasan dan pemikiran tentang keilmuan kedepan, meskipun tidak mudah, dapat memberikan arah bagi pengembangan akademik dan riset di ITB, misalnya dalam bentuk pengembangan pusat-pusat penelitian dan inovasi maupun dalam pengembangan program studi atau fakultas/sekolah di masa depan. Sumbangan pemikiran tentang keilmuan masa depan ini juga dapat memberikan masukan kepada berbagai pihak mengenai ilmu dan teknologi yang dapat dipertimbangkan untuk dikuasai dan dikembangkan lebih lanjut, serta dapat dimanfaatkan bagi kepentingan industry, bisnis, masyarakat maupun pemerintah untuk daya saing bangsa.

Dalam kerangka ini Komisi Keilmuan Masa Depan FGB menyelenggarakan seminar yang menampilkan para pakar ITB dalam beberapa bidang yang diperkirakan akan berkembang di masa depan. Paparan dan diskusi yang berkembang dalam seminar telah diwujudkan dalam bentuk artikel yang selanjutnya dikompilasi dalam bentuk buku ini. Beberapa seminar selanjutnya juga akan disusun dalam bentuk buku.

Buku kompilasi ini membahas dua bidang keilmuan yang sedang hangat dibicarakan baik di kalangan akademisi, maupun muncul sebagai headline di berbagai media, termasuk media sosial. Dua bidang ini adalah Sains dan Teknologi Kuantum serta Metaverse. Pertama, teknologi kuantum merupakan bidang fisika dan rekayasa yang sedang berkembang, yang mencakup teknologi yang mendasarkan pada sifat mekanika kuantum, khususnya *quantum entanglement*, *quantum superposition* dan *quantum tunneling*. Komputer kuantum, sensor kuantum, kriptografi kuantum, komunikasi kuantum, pencitraan kuantum merupakan contoh-contoh teknologi kuantum yang sedang berkembang sangat pesat. Bidang Sains dan Teknologi Kuantum menampilkan tiga bab yang membahas komputasi kuantum, yang telah berkembang saat ini dan

diduga akan semakin berkembang di masa depan. Bahasan teori fisika dan konsep yang lebih mendasar tentang bidang ini, termasuk entanglement dalam *quantum transport*, *blackhole* dan gelombang gravitasi, disajikan dalam bab pertama dan kedua. Bab berikutnya memaparkan secara strategis perkembangan teknologi informasi dari klasik hingga kuantum, sekilas revolusi kuantum kedua dan perbedaannya dari revolusi kuantum pertama, beberapa contoh penelitian yang telah dilakukan, ancaman yang ditimbulkan, dan peluang-peluang yang tercipta.

Kedua, metaverse merupakan pengembangan teknologi digital yang berwujud ruang realitas-virtual di mana pengguna dapat berinteraksi dengan lingkungan yang dibangun oleh komputer dan dengan pengguna lainnya. Dua bab dalam buku ini membahas perkembangan terkini bidang teknologi Metaverse. Bab yang pertama membahas tentang peluang dan tantangan pengembangan Metaverse dan laboratorium virtual pada pendidikan tinggi. Sementara Bab kedua membahas tentang optimasi *lod* dan manajemen aset dalam pengembangan Metaverse.

Kiranya buku ini dapat memberikan wawasan dan manfaat bagi bagi para pembaca, bagi pengembangan ilmu dan teknologi di ITB, nasional maupun global.

Bandung, 10 November 2023

Tim Editor

DAFTAR ISI

SAMBUTAN	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
1. KOMPUTASI KUANTUM DALAM SEPINTAS	1
1.1 Pengantar	2
1.2 Komputer Klasik dan Komputer Kuantum	4
1.2.1 Komputer Digital	5
1.2.2 Komputer Kuantum	5
1.3 Fenomena Alam: Klasikal dan Kuantum	6
1.3.1 Klasikal	7
1.3.2 Kuantum	7
1.4 Sepintas Notasi Dirac	8
1.5 Qubit dan Sistem Qubit	11
1.6 Superposisi dan Keberbelitan (<i>Entanglement</i>)	13
1.7 Pengukuran	14
1.8 Gerbang-gerbang: Logika dan Kuantum	15
1.8.1 Gerbang Logika	15
1.8.2 Gerbang Kuantum	17
1.9 Gerbang Qubit Tunggal Utama	23
1.10 Bola Bloch	25
1.11 Gerbang Terkendali	27
1.12 <i>Observable</i> dan Harga Ekspektasi	29
1.13 Rangkaian Kuantum	31
1.14 Sedikit Tentang Teleportasi	34
1.15 Sumber Kesalahan Komputasi	37
1.16 Algoritma Kuantum	38
1.16.1 Komputasi Klasik pada Komputer Kuantum	38
1.16.2 Skema Paralelisme	42
1.16.3 Algoritma Deutsch	45
1.16.4 Analisis Rinci Algoritma Deutsch	47
1.16.5 Peran Gerbang Hadamard	51
1.16.6 Menentukan Oracle g	52
1.16.7 Algoritma Deutsch-Jozsa	54
1.16.8 Penyelesaian Klasikal	56
1.16.9 Penyelesaian Kuantum	56
1.16.10 Analisis Rinci Algoritma Deutsch-Jozsa	59
1.17 Transformasi Fourier Diskrit Kuantum (TFDK)	63
1.18 Transformasi Fourier Diskrit (TFD) Klasikal	67
1.19 Implementasi Transformasi Fourier Diskrit (TFD) Kuantum	69

1.20	Kesimpulan	72
1.21	Ucapan Terima Kasih	73
	Daftar Pustaka	73
2.	ENTANGLEMENT (KETERBELITAN) DALAM QUANTUM TRANSPORT, BLACK HOLE, DAN GELOMBANG GRAVITASI .75	
	Abstrak	75
2.1	Pendahuluan	76
2.1.1	Prinsip Fisika Kuantum	78
2.1.2	Quantum Entanglement	79
2.2	Sistem Kuantum Terbuka	81
2.3	Aplikasi Sistem Terbuka pada Transpor Kuantum	83
2.3.1	Efektivitas Noise dalam Meningkatkan Transpor Kuantum	84
2.4	Model Baru untuk Kisi dengan <i>Disorder</i>	88
2.4.1	Realisasi Eksperimen: Simulator Kuantum	89
2.4.2	Prospek Teknologi Masa Depan: Mesin Termodinamika Kuantum	91
2.5	Termodinamika Lubang Hitam	92
2.5.1	Pengantar Singkat Teori Relativitas Umum	92
2.5.2	Lubang Hitam sebagai Salah Satu Solusi pada Teori Relativitas Umum	94
2.5.3	Termodinamika Lubang Hitam	97
2.5.4	Entropi Entanglement dan Holografi	98
2.5.5	Lubang Hitam dan Entropi Entanglement	100
2.6	<i>Signatures</i> Kuantum di Awal Alam Semesta	103
	Unifikasi Teori Kuantum dan Relativitas Umum	111
2.7	Kuantisasi Medan Gravitasi	112
	Loop Quantum Gravity	113
2.8	Kesimpulan	116
	Referensi	116
3.	SEKILAS REVOLUSI KUANTUM	121
3.1	Pendahuluan	122
3.2	Teknologi Informasi dan Keterbatasannya	122
3.3	Sekilas Fisika Kuantum	124
3.4	Revolusi Kuantum Kedua	124
3.5	Perkembangan Terkini	126
3.6	Penutup	127
	Daftar Pustaka	127
4.	METaverse AND VIRTUAL LAB FOR HIGHER EDUCATION: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES	131
4.1	Introduction	132
4.2	Rationales	133
4.3	Opportunities	135
4.3.1	Improved Student Engagement	135
4.3.2	Improved Accessibility	136

4.3.3	Collaborative Learning	138
4.3.4	Risk-Free Environment	140
4.3.5	Cost-Effective	142
4.3.6	Experiential Learning	144
4.3.7	Self-Paced Exploration	146
4.3.8	Personalized Feedback	147
4.4	Challenges.....	149
4.4.1	Technological Infrastructure	149
4.4.2	Content Development	149
4.4.3	Pedagogical Design and Integration	150
4.4.4	Assessment and Evaluation	150
4.4.5	Cost and Resource Allocation.....	150
4.4.6	Technical Support and Maintenance	151
4.4.7	Digital Literacy and Training	151
4.4.8	Privacy and Security.....	151
4.4.9	Integration with Existing Systems	151
4.4.10	Access and Equity	152
4.4.11	Usability and User Experience	152
4.4.12	Ethical Considerations	152
4.5	Implementation Stages	153
4.5.1	Vision and Strategy	153
4.5.2	Leadership and Governance	153
4.5.3	Infrastructure and Resources.....	153
4.5.4	Curriculum Design and Development.....	153
4.5.5	Faculty Development and Support	154
4.5.6	Student Engagement and Support	154
4.5.7	Assessment and Evaluation	154
4.6	Conclusion	155
4.7	Acknowledgment.....	155
	References.....	155

5.	OPTIMASI LOD & MANAJEMEN ASET DALAM	
	PENGEMBANGAN METAVERSE	157
5.1	Pendahuluan	158
5.2	Metaverse.....	162
5.3	Digital Twin.....	165
5.4	Unreal Engine	167
5.4.1	Blueprint	168
5.4.2	Epic Online Services.....	170
5.5	Optimasi <i>Level of Details</i> (LOD)	171
5.6	Manajemen Aset.....	173
5.7	Implementasi Optimasi LOD & Manajemen Aset dalam	
	Pengembangan Metaverse.....	174
5.7.1	Optimasi <i>Level of Detail</i> (LOD)	175
5.7.2	Optimasi Manajemen Aset.....	179
5.7.3	Implementasi <i>Epic Online Services</i> (EOS).....	181
5.7.4	Konfigurasi dan Ekspor Proyek.....	193

5.7.5	Hasil Implementasi	196
5.7.6	Komparasi Tampilan <i>Gameplay</i>	198
Penulis		205

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 *Set-up* mengukur jenis suara dan warna rambut manusia 7

Gambar 1.2 *Set-Up* mengukur keadaan kuantum sistem dua-keadaan pada orientasi tertentu 8

Gambar 1.3 Sebuah gerbang logika NAND dengan tabel kebenarannya (*truth table*)15

Gambar 1.4 Kontruksi NOT(x_1) dengan sebuah gerbang NAND (a), dan NOR (b)17

Gambar 1.5 Kombinasi sistem dua qubit20

Gambar 1. 6 Sebuah gerbang logika bit (kiri) dan qubit tunggal (kanan).....22

Gambar 1.7 Simbol gerbang kuantum untuk pengukuran23

Gambar 1.8 Pemetaan bilangan kompleks dan qubit dengan korespondensi satu-satu25

Gambar 1.9 Vektor eigen matriks Pauli di permukaan bola Bloch26

Gambar 1.10 Rangkaian kuantum CNOT dalam dua format yang ekuivalen.....27

Gambar 1.11 Kiri, gerbang CNOT untuk qubit kendali berupa $|0\rangle$. Kanan, gerbang U terkendali27

Gambar 1.12 Gerbang Toffoli atau gerbang CCNOT yang memiliki dua buah qubit, $|a\rangle \otimes |b\rangle = |ab\rangle$ 28

Gambar 1.13 Rangkaian kuantum32

Gambar 1.14 Kiri rangkaian paling sederhana yang dapat digunakan untuk merepresentasikan transformasi Fourier kuantum. Kanan: balikan (inverse) dari rangkaian sebelah kiri.....33

Gambar 1.15 Rangkaian kuantum penukar (swap) qubit disertai buktinya33

Gambar 1.16 Rangkaian kuantum untuk menteleportasikan sebuah qubit34

Gambar 1.17 Kebenaran gerbang Toffoli, dan rangkaian representasinya39

Gambar 1.18 Rangkaian klasik untuk menerapkan gerbang NAND menggunakan sebuah gerbang Toffoli.....40

Gambar 1.19 FANOUT menggunakan gerbang Toffoli.....41

Gambar 1.20 Rangkaian kuantum untuk menghitung $f(0)$ dan $f(1)$ secara simultan.....42

Gambar 1.21 Transformasi Hadamard $H \otimes^2$ pada dua qubit43

Gambar 1.22 Rangkaian kuantum untuk menghitung $f(0)$ dan $f(1)$ secara simultan	44
Gambar 1.23 Penyiapan masukan untuk algoritma Deutsch	49
Gambar 1.24 Kiri: rangkaian kuantum ekuivalen dengan g untuk kasus $f(0,1) \rightarrow (0,1)$. Kanan: rangkaian kuantum algoritma Deutsch untuk $f(0,1) \rightarrow (0,1)$	54
Gambar 1.25 Rangkaian kuantum untuk mewujudkan algoritma Deutsch-Jozsa	57
Gambar 1.26 Rangkaian kuantum untuk transformasi Fourier diskrit kuantum yang diberikan oleh persamaan (82) dan R oleh persamaan (88).	66
Gambar 1.27 Implementasi TFDK untuk $n=2$ atau $N=2^n = 4$	71
Gambar 1.28 Implementasi TFDK untuk $n = 3$ atau $N = 2^3 = 8$ pada rangkaian kuantum	71
Gambar 2.1 Trayektori untuk (kiri) partikel klasik, yang deterministik, dan (kanan) partikel kuantum, yang probabilistik	77
Gambar 2.2 Skema sistem kuantum terbuka	81
Gambar 2.3 (Atas) skema transpor kuantum dibantu <i>dephasing noise</i> dengan arus keluar J_{out} sebagai kuantitas transpor energi.....	86
Gambar 2.4 (Kiri) skema sistem transpor kuantum dibantu oleh medan periodik eksternal; eksitasi dimulai pada qubit 2 dan ditangkap oleh situs <i>trap</i> . (Kanan) efisiensi η vs. frekuensi gaya luar Ω	87
Gambar 2.5 Mobility edge (ME) pada model rujukan [12] yang dapat dihasilkan tanpa disorder	88
Gambar 2.6 (a) skema simulator kuantum berbasis <i>ultra-cold atoms</i> pada kisi optik 1 dimensi yang dibentuk oleh superposisi laser. (b) dengan menambahkan laser pada arah lainnya, kisi optik 2 dimensi dapat dibentuk. (c) contoh perangkat eksperimen optika kuantum yang dapat digunakan untuk merealisasikan <i>ultra-cold atoms</i> [14]	90
Gambar 2.7 Foto lubang hitam yang berada pada pusat galaksi M87	95
Gambar 2.8 Ilustrasi diagram lubang hitam Schwarzschild	99
Gambar 2.9 Ilustrasi diagram lubang hitam Reissner-Nordstrom dengan dua horizon	102
Gambar 2.10 Geometri lubang hitam Schwrazschild-de Sitter dengan cosmological horizon (CH) dan horizon lubang hitam (BH)	102
Gambar 2.11 Hasil pengamatan latar belakang gelombang mikro kosmik yang menunjukkan bahwa persebaran panas di	

awal alam semesta pada temperatur sebesar 3 derajat Kelvin bersifat isotropik	104
Gambar 2.12 Tiga geometri alam semesta yang dimungkinkan berdasarkan teori relativitas umum	104
Gambar 2.13 Representasi dari medan inflasi yang diibaratkan sebagai bola yang sedang menuruni bukit	106
Gambar 2.14 Skema interferometer Hanbury Brown-Twiss (HBT)	107
Gambar 2.15 Operator Stoke.....	110
Gambar 2.16 Pembagian teori fisika menurut kecepatan dan ukuran objeknya.....	111
Gambar 2.17 Lembaran-lembaran ruang (3D) dan arah waktu n pada formulasi ADM	113
Gambar 2.18 (Kiri) <i>Spin network</i> pada LQG (2 dimensi), (tengah) <i>spin foam</i> , dan (kanan) evolusi <i>spin network</i> -nya pada (2+1) dimensi	115
Gambar 5.1 Perkembangan kecepatan internet dari masa ke masa	158
Gambar 5.2 Implementasi Blueprint pada Unreal Engine	169
Gambar 5.3 Tahapan pengembangan	175
Gambar 5.4 Proses optimasi LOD eksternal	176
Gambar 5.5 Menu daftar aset Unreal Engine	177
Gambar 5.6 Menu pengaturan aset	177
Gambar 5.7 Menu pengaturan aset	178
Gambar 5.8 Konfigurasi Reduction Settings	178
Gambar 5.9 Implementasi pengaturan LOD pada Unreal Engine (Uisco, 2022)	178
Gambar 5.10 Pengaktifan menu create compressed cooked packages ..	179
Gambar 5.11 Pengaktifan menu texture streaming dan mesh streaming	179
Gambar 5.12 Pengaktifan menu <i>Enable CSM Caching</i>	180
Gambar 5.13 Pilihan masuk ke menu Quixel Bridge	180
Gambar 5.14 Pemilihan tekstur pada Quixel Bridge	181
Gambar 5.15 Kompatibilitas aset pada	181
Gambar 5.16 Direktori DefaultEngine.ini	182
Gambar 5.17 Cara mengakses <i>Plugins</i>	185
Gambar 5.18 Aktifasi plugins EOScore.....	185
Gambar 5.19 Tampilan portal Epic Games Developer.....	185
Gambar 5.20 Menu pengisian identitas proyek	186
Gambar 5.21 Pilihan menu Client	186
Gambar 5.22 Pengisian identitas Client	187
Gambar 5.23 Pengisian identitas <i>policy</i>	187

Gambar 5.24	Menu Epic Account Service	188
Gambar 5.25	Konfigurasi menu permissions	188
Gambar 5.26	Konfigurasi menu linked clients	188
Gambar 5.27	ID Proyek Epic Games Developer	189
Gambar 5.28	Menu EOSCore Plugin	189
Gambar 5.29	BP_GameInstance Blueprint	190
Gambar 5.30	BP_PC	190
Gambar 5.31	BP_MainMenuController Blueprint.....	190
Gambar 5.32	Then0 (UMG Menu).....	191
Gambar 5.33	Then1(Handle Friend Invites)	191
Gambar 5.34	Then2 (Handle Friend Join Button Clicked)	191
Gambar 5.35	Then3(Handle Login Status Changed Callback)	192
Gambar 5.36	Then 4(Cache the Clients IP for RTC/Voice Chat.....	192
Gambar 5.37	BP_MainMenuGameMode Blueprint.....	192
Gambar 5.38	BP_GM	193
Gambar 5.39	Menu Android SDK	194
Gambar 5.40	Isian Menu APK Packaging	194
Gambar 5.41	Menu App Bundles dan Build.....	195
Gambar 5.42	Menu Distribution Signing.....	195
Gambar 5.43	Menu <i>Packaging</i>	196
Gambar 5.44	Menu pilihan ekspor	196
Gambar 5.45	Komparasi nilai FPS dengan kondisi awal proyek.....	197
Gambar 5.46	Komparasi ukuran fail dengan kondisi awal	198
Gambar 5.47	<i>Gameplay</i> PC kondisi awal pada monumen kubus.....	199
Gambar 5.48	<i>Gameplay</i> PC kondisi awal pada gerbang utama.....	199
Gambar 5.49	<i>Gameplay</i> PC kondisi awal pada selasar pos satpam	200
Gambar 5.50	<i>Gameplay</i> PC kondisi awal pada Plaza	200
Gambar 5.51	<i>Gameplay</i> PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Monumen Kubus.....	201
Gambar 5.52	<i>Gameplay</i> PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Gerbang Utama Kampus ITB Ganesha	201
Gambar 5.53	<i>Gameplay</i> PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Tangga Masuk Gerbang Utama Kampus ITB Ganesha.....	202
Gambar 5.54	<i>Gameplay</i> PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Selasar Gerbang Utama	202
Gambar 5.55	<i>Gameplay</i> PC Metavers ITB setelah optimis pada Plaza Persimpangan Gerbang	203

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kebenaran yang berisi hubungan masukan dan keluaran gerbang-gerbang logika16

Tabel 1.2 Sejumlah gerbang kuantum dan representasi matriksnya. Tampak pula gerbang-gerbang (matriks-matriks) Pauli σ_x , σ_y , dan σ_z18

Tabel 1.3 Gerbang-gerbang kuantum utama, representasi matriks, dan efeknya terhadap basis standar atau basis komputasi24

Tabel 1.4 Luaran dari g untuk berbagai harga masukan dan karakteristik f 48

Tabel 1.5 Luaran dari $g(|\psi\rangle)$ 49

Tabel 1.6 Luaran dari $H_4(g(|\psi\rangle))$ dengan $|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ untuk ke-empat kemungkinan karakterisitik f 50

Tabel 1.7 Luaran dari $([H \otimes ||g(|\psi\rangle)])$ dengan $|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ untuk keempat kemungkinan karakterisitik f 51

Tabel 1.8 Matriks g dalam basis yang diberikan oleh persamaan 69 untuk keempat karakteristik f53

Tabel 1.9 Sebuah kemungkinan pemetaan f terhadap barisan tiga buah bit.....55

Tabel 1.10 Penulisan yang berbeda untuk kasus yang sama dengan Tabel 955

Tabel 5. 1 Hasil uji coba pengembangan Metaverse tahap awal 160

Tabel 5.2 Komparasi plaform Metaverse 163

Tabel 5.3 Daftar kebutuhan instalasi 193

Tabel 5.4 Rangkuman komparasi kondisi sebelum dan sesudah optimasi 198



KOMPUTASI KUANTUM DALAM SEPINTAS

Hermawan Kresno Dipojono

Abstrak

Hadirnya komputer kuantum diperkirakan akan menjadi salah satu jenis disrupsi teknologi dalam rentang waktu dua dekade ke depan. Sifat intrinsiknya yang paralel menyebabkan komputer kuantum mempunyai daya komputasi yang jauh melampaui komputer klasikal atau digital. Komputer kuan-tum menjadi kebutuhan karena adanya rasa ingin tahu manusia untuk menguak fenomena alam yang memerlukan alat bantu komputasi yang tidak dapat diberikan oleh komputer klasikal. Makalah ini membahas komputasi kuantum yang walau sepintas, tetapi cukup memadai sebagai dasar untuk menggunakan dan mempelajari lebih mendalam komputer kuantum. Pembahasan diawali dengan latar belakang, perkembangan, gerbang, dan rangkaian kuantum, algoritma kuantum sederhana, dan ditutup dengan pembahasan transformasi Fourier diskrit kuantum.

1.1 PENGANTAR

Fisikawan besar PAM Dirac pada tahun 1929 mengatakan: "The underlying physical laws necessary for the mathematical theory of a large part of of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty is only that the exact application of these laws leads to equations much too complicated to be soluble." [1]. Bahkan dengan superkomputer terbaru dan terhebat sekalipun pernyataan Dirac tersebut masih tetap berlaku hingga hari ini. Kompleksitas persoalan sistem sistem kuantum meningkat secara eksponensial dengan bertambahnya jumlah partikel di dalam sistem; daya komputasi komputer digital meningkat secara linier saja dengan bertambahnya resource. Meskipun demikian, kombinasi komputer digital dan model sistem kuantum tetap dapat memberi manfaat untuk menguak berbagai fenomena, seperti katalitik [2], baterai [3], radikal bebas [4], dan molekul [5]. Tentu ukuran, ruang maupun waktu, sistem yang dapat dikaji sangat terbatas karena keterbatasan daya superkomputer digital terhebat saat ini sekalipun. Itu sebabnya kemudian pada tahun 1982, fisikawan besar lainnya, Robert Feynmann mengusulkan agar dibuat komputer kuantum untuk mengatasi kebuntuan itu; yaitu komputer yang bekerja sepenuhnya mengikuti kaedah-kaedah mekanika kuantum karena memanfaatkan sepenuhnya partikel kuantum (elektron, photon, dan sejenisnya), seperti ucapannya: "If you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy"[6]. Setelah dua dekade, perkembangan teknologi kuantum itu luar biasa cepatnya dan industri besar, termasuk sejumlah negara, berani melakukan investasi besar-besaran. Seperti yang dilaporkan oleh Physics Today edisi Maret 2021, Jian-wei Pan dengan timnya, dari University of Science and Technology of China (USTC), berhasil mengirimkan pasangan photon terbelit (entangled) dari satelit Micius ke bumi yang berjarak sekitar 1.200 km. Sebelumnya, pada Oktober tahun 2019, tim Google memublikasikan di Nature melaporkan telah berhasil mewujudkan apa yang disebut sebagai quantum supremacy: perangkat 53 qubit

yang terbuat dari Josephson junctions hanya memerlukan waktu 200 detik dalam menyelesaikan problema yang seandainya diselesaikan dengan komputer klasik (digital) memerlukan waktu 10^4 tahun [7]. Keberhasilan ini disusul oleh, Tim USTC itu, dengan perangkat 76 qubit buatannya, melalui publikasinya di Science menyatakan hanya memerlukan waktu 10^{14} kali waktu yang dibutuhkan komputer digital terkuat yang tersedia. Keraguan tentang kemampuan mewujudkan komputer kuantum sedikit demi sedikit mulai pupus walaupun jalan menuju terwujudnya universal fault tolerant quantum computer masih jauh, yang mungkin masih memerlukan satu hingga dua dekade lagi.

Physics Today edisi Maret 2021 menampilkan tema *Quantum Information*; editorialnya diberi judul *Quantum information is exciting and important* [8]. Judul editorial ini mirip dengan edisi Maret-April 2007 yaitu *Quantum Computing is Exciting and Important - Really!* Judul editorial yang 2007 merupakan respons terhadap keraguan dapat terealisasikannya komputer kuantum yang bahkan datang dari seorang fisikawan sekaliber Rolf Landauer. Edisi 2021 menyuarakan optimisme yang semakin meningkat sejalan dengan kemajuan teknologi untuk mewujudkan komputer kuantum itu; tentu antusiasme itu juga disebabkan karena komputer kuantum mempunyai potensi ekonomi yang luar biasa. *Physics Today* sendiri cukup sering menampilkan berbagai isu mengenai teknologi kuantum ini. Edisi Desember 2021 menampilkan tentang *Quantum startups in Israel*; dilaporkan di dalamnya bahwa walaupun situasi politiknya tidak menentu namun Knesset (parlemen) menyetujui untuk menggelontorkan dana sebesar US\$400 juta selama lima tahun untuk proyek *National Quantum Initiative* mulai tahun 2019 yl. Pemimpin inisiatif itu mengatakan: "We don't aspire at least in the next few years to beat IBM or Google. We need to first form a basis for an ecosystem in Israel and that will be the purpose of the project. May be in a few years, we'll be able to jump into the deep end of the pond and compete with the big ones" [9]. Sebenarnya Israel hanya mempunyai peneliti utama di bidang ini sebanyak 125 saja, yang diakui sebagai sangat sedikit, tetapi melihat strategisnya bidang ini, berani melakukan investasi yang relatif tidak kecil. Bahwa Israel baru tahun 2019 memutuskan masuk ke teknologi ini menunjukkan kesempatan

masih terbuka lebar bagi siapa saja untuk ikut menanamkan saham pada teknologi yang kini diyakini sangat menjanjikan masa depan yang menguntungkan bagi bangsa dan negara.

Bagaimana dengan Indonesia, khususnya ITB, dalam menatap masa depan teknologi kuantum ini? Jika tidak memungkinkan terjun ke wilayah *hardware* yang amat sangat mahal, minimal dapat memulainya dengan mempersiapkan diri sebagai calon *excellent users*. Setelah masalah perangkat keras satu demi satu teratasi, kini tantangan yang tidak kalah seriusnya adalah mempersiapkan secepatnya dan dalam jumlah besar sumber daya manusia yang memahami dengan baik dan dapat secara maksimal memanfaatkan teknologi ini. Dua buku teks yang sangat bagus untuk mengawali mempelajari komputasi kuantum adalah [10, 11], sedangkan dua artikel revidu untuk komputasi kimia dapat digunakan [12, 13]. Untuk memulai menggunakan simulator komputasi kuantum IBM Qiskit, di samping dari manual dan panduannya, dapat juga digunakan tutorial yang sangat bagus, walaupun sebagian kodingnya harus diperbaharui sendiri, adalah [14]. Makalah ini mencoba untuk mengupas ringkas, tetapi memadai untuk menjadi rujukan awal, dalam mempelajari komputasi kuantum. Pembahasan akan meliputi di antaranya tentang perbedaan antara komputer klasikal dan kuantum, bit dan qubit, gerbang logika, dan kuantum. Dilanjutkan dengan pembahasan rangkaian kuantum penting, sedikit tentang teleportasi kuantum, paralelisme komputer kuantum, algoritma kuantum, dan transformasi Fourier diskrit kuantum. Bagian-bagian tertentu dibahas rinci disertai contoh sederhana dengan harapan agar pembaca tertarik untuk mendalami lebih lanjut. Masih banyak hal dari komputasi dan informasi kuantum yang tidak sempat dibahas di makalah ini. Daftar referensi yang dapat diunduh bebas dapat membantu melengkapi bagi yang berminat untuk menekuni lebih lanjut.

1.2 KOMPUTER KLASIK DAN KOMPUTER KUANTUM

Di bagian ini akan disampaikan secara singkat mengenai komputer klasik (digital) dan komputer kuantum. Karakteristik keduanya akan disampaikan secara garis besar saja, tidak ada maksud *rigor*, cukup agar dapat terlihat beberapa perbedaan-(fundamental)-nya.

1.2.1 Komputer Digital

Komputer digital mempunyai ciri yang dapat digunakan untuk membedakannya dengan komputer kuantum. Di antara ciri-ciri itu adalah:

- 1 Memanfaatkan karakteristik elektron-elektron, itu sebabnya komponen inti dari komputer klasik disebut atau termasuk dalam kelompok perangkat elektron(ik) (*electronic devices, electronic circuits*).
- 2 Khususnya karakteristik elektron-elektron dalam interaksinya dengan inti-inti atom suatu material sehingga terbentuk struktur elektronik (*electronic structure*).
- 3 Di antara struktur elektronik itu yang dimanfaatkan untuk berbagai perangkat elektronik misalnya adalah celah pita (*bandgap*), pita konduksi (*conduction bands*), pita valensi (*valence bands*).
- 4 Karakteristik itu digunakan untuk mengatur arus listrik: kapan arus boleh terjadi dan kapan pula tidak boleh; mengalihkan arus listrik (*switching devices*); atau kapan ada tegangan listrik dan kapan pula tidak boleh ada tegangan listrik.

Keadaan yang memungkinkan arus listrik mengalir (atau ada tegangan listrik) ekuivalen dengan keadaan yang disimbolkan oleh angka 1, dan lawannya disimbolkan oleh angka 0. Namun 0 dan 1 tidak sekedar simbol, tetapi juga bermakna angka nol dan satu; artinya, $a \times 0 = 0$ dan $a \times 1 = a$.

Satuan informasi dalam komputer klasik disebut bit, yang direpresentasikan oleh 0 atau 1 tersebut. Bit tunggal hanya dapat berada di salah satu dari keadaan 0 atau 1. Bit umumnya digunakan untuk menyebut laju perpindahan data (*rates of data transfer*), misal Mbps (*mega bits per second*) dsb. Byte digunakan untuk menyebut jumlah informasi yang disimpan dalam suatu memori. Implementasi konsep komputer digital dilakukan via gerbang-gerbang logika (*logic gates*).

1.2.2 Komputer Kuantum

Sebagai kontras dari komputer digital, berikut ini karakteristik komputer kuantum.

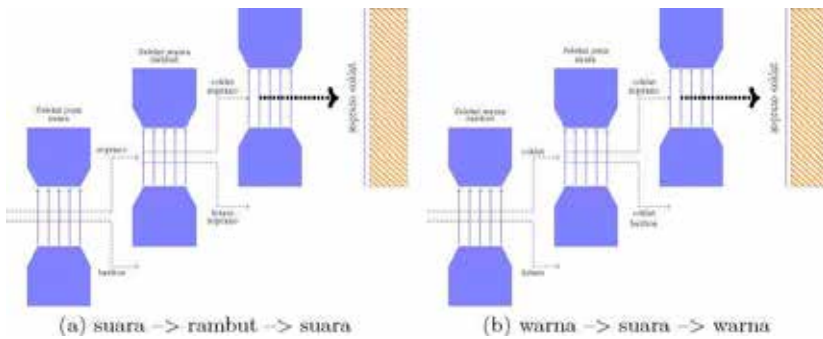
- 1 Memanfaatkan sepenuhnya karakteristik partikel kuantum (elektron, photon, dan lainnya), baik sendirian (tunggal), maupun jamak.
- 2 Karakteristik kuantum itu adalah bahwa setiap partikel atau sistem partikel-partikel mempunyai keadaan basis (base states) [15]. Dalam hal elektron tunggal keadaan basis itu ada dua: spin-up dan spin-down, atau ground-state dan excited-state; dalam hal photon juga ada dua keadaan basis: polarisasi vertikal dan polarisasi horizontal, atau pasangan-pasangan polarisasi lainnya yang saling tegak lurus.
- 3 Dua keadaan basis itu biasanya disimbolkan dengan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, atau $|-\rangle$ dan $|+\rangle$, atau $|\uparrow\rangle$ dan $|\rightarrow\rangle$ tergantung dari sistemnya. Pasangan basis ini bersifat orthogonal.
- 4 Setiap keadaan kuantum dapat dinyatakan sebagai superposisi dari keadaan basis: $|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$, atau bisa juga $|\psi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\rightarrow\rangle$ di mana α , β , a , b adalah bilangan kompleks yang memenuhi persyaratan $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ dan juga $|a|^2 + |b|^2 = 1$.
- 5 Satuan informasi pada komputer kuantum disebut qubit atau quantum bit. Qubit tunggal dapat berada di salah satu dari tak terhingga keadaan kuantum $|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$. Bandingkan dengan bit tunggal yang hanya dapat berada di salah satu keadaan 0 atau 1.
- 6 Dua atau lebih qubit dapat berada dalam keadaan berbelit (entangle). Keterbelitan ini juga merupakan sebuah karakteristik dari keadaan kuantum.
- 7 Superposisi dan keterbelitan inilah yang menyebabkan daya komputasi komputer kuantum meningkat secara eksponensial dengan bertambahnya jumlah qubit.
- 8 Implementasi konsep komputasi kuantum dapat dilakukan dengan banyak cara, salah satu di antaranya adalah via gerbang-gerbang kuantum.

1.3 FENOMENA ALAM: KLASIKAL DAN KUANTUM

Pengukuran menempati peran yang amat penting pada komputer kuantum. Pada umumnya pengukuran dilakukan untuk mengetahui keadaan sistem yang diukur. Mengukur suatu sistem adalah mengusik sistem tersebut dan dari responsnya dapat diperoleh keadaan sistem

yang hendak diukur. Terdapat perbedaan fundamental antara sistem klasikal dan kuantum. Perbedaan itu diantaranya dapat dilihat dari efek pengukuran terhadap kedua sistem tersebut. Berikut ini akan diberikan ilustrasi pengukuran yang menampilkan perbedaan fundamental itu.

1.3.1 Klasikal

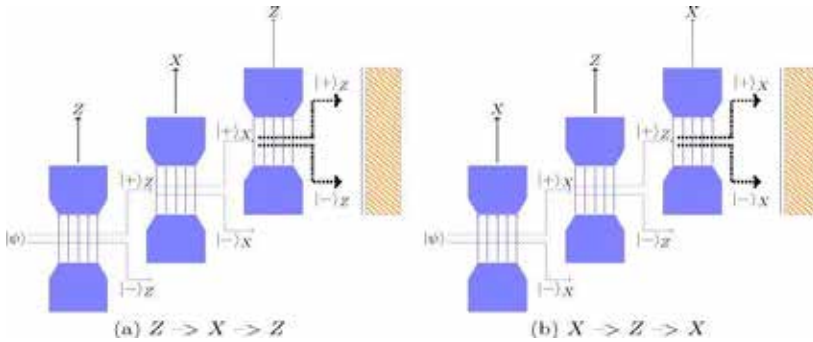


Gambar 1.1 *Set-up* mengukur jenis suara dan warna rambut manusia

Gambar 1.1 menunjukkan sebuah *set-up* pengukuran klasikal. Objek yang hendak diukur adalah manusia; keadaan yang hendak diketahui adalah jenis suara dan warna rambutnya. Dengan *set-up* seperti Gambar 1.1 akan diperoleh hasil akhir orang yang bersuara soprano dengan rambut berwarna coklat. Gambar 1.1(b) menunjukkan *set-up* seperti Gambar 1.1(a), tetapi urutan pengukuran diubah. Hasil akhir yang diperoleh dari kedua *set-up* sama, urutan pengukuran tidak mengubah hasil akhir. Hal lain yang juga penting adalah bahwa pengukuran tidak mengubah keadaan sistem sehingga hasil pengukuran sebelumnya terus terbawa dalam pengukuran selanjutnya.

1.3.2 Kuantum

Gambar 1.2 menunjukkan suatu *set-up* pengukuran kuantum. Hasil akhir *set-up* di 2(a) dan 2(b) ternyata berbeda. Kesimpulan terpenting dari eksperimen kuantum ini adalah (1) pengukuran telah mengubah keadaan kuantum sistem sehingga hasil pengukuran tidak terbawa di pengukuran selanjutnya, dan (2) urutan pengukuran memengaruhi hasil akhir yang akan diperoleh dari suatu rangkaian pengukuran.



Gambar 1.2 Set-Up mengukur keadaan kuantum sistem dua-keadaan pada orientasi tertentu

1.4 SEPINTAS NOTASI DIRAC

Keadaan kuantum dapat direpresentasikan dengan suatu vektor di ruang Hilbert (*Hilbert space*): suatu ruang vektor kompleks dengan sebuah perkalian dalam (*inner product*). Dalam konteks pembahasan ini, ruang ini berdimensi terbatas, tetapi memenuhi syarat komplit. Representasi vektor dari keadaan kuantum biasanya menggunakan notasi khusus, disebut notasi Dirac, ket dan bra, yaitu $|\psi\rangle$ dan $\langle\psi|$ di mana ψ dapat diisi berbagai simbol seperti alfabet, angka, +, – dan sebagainya, seperti $|\alpha\rangle$, $|\uparrow\rangle$, $\langle+|$, $\langle\beta|$. Kelebihan notasi ini, dibanding notasi vektor seperti $\vec{A}_x$ atau $\vec{A}$ atau matriks A , dalam merepresentasikan keadaan kuantum di antaranya adalah lebih kompak (*compact*) sehingga memberi kemudahan dalam melakukan berbagai operasi di sistem kuantum.

Misal sistem kuantum dua keadaan direpresentasikan di ruang vektor kompleks (Hilbert) dua dimensi yang dibangun oleh dua buah basis $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Jadi sembarang keadaan kuantum $|i\rangle$ di ruang vektor kompleks ini dapat dinyatakan dengan $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ di mana α dan β merupakan sembarang bilangan kompleks sehingga $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Notasi Dirac menyediakan cara yang amat menyenangkan untuk membahas transformasi linier keadaan-keadaan kuantum. Transpose konjugat dari suatu vektor $|\psi\rangle$ dapat dituliskan dengan $\langle\psi|$, dan perkalian titik (perkalian dalam: *inner product*) vektor-vektor H dan $|\psi\rangle$ diberikan oleh $\langle\psi|H|\psi\rangle$. Notasi $|x\rangle\langle y|$ menyatakan perkalian luar (*outer product*) dari vektor-vektor $|x\rangle$ dan $|y\rangle$. Hubungan berikut ini dapat juga digunakan

$$(|a\rangle\langle b|)|c\rangle = |a\rangle(\langle b|c\rangle)$$

Diketahui V adalah sebuah ruang vektor dari sebuah sistem qubit tunggal. Matriks dari operator $|0\rangle\langle 0|$ pada standar basis dengan urutan $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ adalah

$$|0\rangle\langle 0| = \begin{bmatrix} 1 & \\ 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Notasi $|0\rangle\langle 1|$ menyatakan transformasi linier yang memetakan $|1\rangle$ ke $|0\rangle$, dan $|0\rangle$ ke vektor nol, yaitu berdasarkan

$$\begin{aligned}(|0\rangle\langle 1|)|1\rangle &= |0\rangle(\langle 1|1\rangle) = |0\rangle(1) = |0\rangle, \\(|0\rangle\langle 1|)|0\rangle &= |0\rangle(\langle 1|0\rangle) = |0\rangle(0) = 0.\end{aligned}$$

atau dapat pula karena berdasarkan bahwa

$$|0\rangle\langle 1| = \begin{bmatrix} 1 & \\ 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Demikian pula dapat ditunjukkan bahwa

$$\begin{aligned}|1\rangle\langle 0| &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \\|1\rangle\langle 1| &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Jadi, semua transformasi linier dua-dimensi pada V dapat dituliskan dalam notasi Dirac dengan

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = a|0\rangle\langle 0| + b|0\rangle\langle 1| + c|1\rangle\langle 0| + d|1\rangle\langle 1|$$

Berikut ini adalah sedikit penyegaran kembali sejumlah terminologi aljabar linier yang diperlukan untuk memahami gerbang, rangkaian, dan algoritma kuantum. Pertama, perkalian dalam (*inner product*) atau irisan (*overlap*) antara dua buah keadaan kuantum. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, keadaan-keadaan kuantum merupakan vektor-vektor dalam ruang vektor kompleks. Irisan antara dua buah keadaan adalah perkalian dalam antara kedua vektor kompleks tersebut. Sebagai contoh, untuk dua buah keadaan qubit tunggal, $|\Phi\rangle$

= $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ dan $|\Phi\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$, maka irisan keduanya yang dalam notasi Dirac dituliskan sebagai $\langle\psi|\Phi\rangle$ adalah

$$\langle\psi|\Phi\rangle = \gamma^* \alpha + \delta^* \beta, \quad (1)$$

di mana $*$ menyatakan konjugasi kompleks. Perhatikanlah bahwa $\langle\psi|\Phi\rangle = \langle\psi|\Phi\rangle^*$. Irisan dua buah keadaan umumnya berupa sebuah bilangan kompleks. Irisan sebuah keadaan dengan sebuah bit-string akan menghasilkan koefisien terkait. Misal dari persamaan $|\Phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ dapat diperoleh $\langle 0|\Phi\rangle = \alpha$ dan $\langle 1|\Phi\rangle = \beta$. Cara lain untuk melihat irisan antara keadaan-keadaan kuantum adalah dengan mendefinisikan sebuah keadaan bra. Berbagai keadaan yang telah dibahas adalah keadaan ket, seperti $|\Phi\rangle$, yang menyatakan vektor-vektor kolom. Keadaan bra terkait keadaan ket ini, yang dituliskan dengan simbol $\langle\Phi|$, merupakan sebuah vektor baris dengan unsur-unsurnya adalah konjugasi kompleks. Misal, untuk $|\Phi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$ maka

$\langle\Phi| = [\alpha^* \ \beta^*]$. Dengan demikian maka irisan dua buah keadaan merupakan perkalian matriks sebuah vektor baris dengan sebuah matriks kolom, yang menghasilkan sebuah bilangan. Jadi irisan membentuk simbol sebuah "bra-ket".

Perkalian luar (*outer product*) dua buah keadaan merupakan sebuah operator yang amat penting, menghasilkan sebuah matriks, disimbolkan dengan $|\wedge\rangle\langle\wedge|$. Secara matematis dapat dituliskan sebagai

$$|\psi\rangle\langle\phi| = \begin{bmatrix} \gamma \\ \delta \end{bmatrix} [\alpha^* \ \beta^*] = \begin{bmatrix} \alpha^* \gamma & \beta^* \gamma \\ \alpha^* \delta & \beta^* \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dalam notasi ini, setiap matriks selalu dapat dituliskan sebagai sebuah kombinasi linier perkalian-perkalian luar antar-keadaan-keadaan bit-string. Misal, untuk sebuah matriks 2×2 maka

$$A = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} \\ A_{10} & A_{11} \end{bmatrix} = A_{00}|0\rangle\langle 0| + A_{01}|0\rangle\langle 1| + A_{10}|1\rangle\langle 0| + A_{11}|1\rangle\langle 1| \quad (3)$$

Operasi operator A terhadap sebuah keadaan adalah irisan antara berbagai keadaan, contoh

$$\begin{aligned}
 A|\phi\rangle &= A_{00}|0\rangle\langle 0|\phi\rangle + A_{01}|0\rangle\langle 1|\phi\rangle + A_{10}|1\rangle\langle 0|\phi\rangle + A_{11}|1\rangle\langle 1|\phi\rangle, \\
 &= (A_{00}\alpha + A_{01}\beta)|0\rangle + (A_{10}\alpha + A_{11}\beta)|1\rangle = \begin{bmatrix} A_{00}\alpha + A_{01}\beta \\ A_{10}\alpha + A_{11}\beta \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

Secara sepintas notasi ini nampak rumit dan ruwet, tetapi akan sangat membantu dan mudah dipahami dalam melakukan perhitungan-perhitungan yang melibatkan berbagai keadaan kuantum, tanpa menuliskan dalam bentuk matriks yang amat besar.

Notasi perkalian luar dalam bentuk bra-ket untuk menyatakan matriks juga secara intuitif memberikan relasi masukan-luaran. Sebagai contoh, matriks $|0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|$ dapat dibaca sebagai "luaran 0 jika diberi masukan 1 dan luaran 1 jika diberi masukan 0". Demikian pula untuk $|00\rangle\langle 00| + |01\rangle\langle 01| + |10\rangle\langle 11| + |11\rangle\langle 10|$ dapat ditafsirkan sebagai pemetaan $\{ "00" \rightarrow "00", "01" \rightarrow "01", "11" \rightarrow "10", "10" \rightarrow "11" \}$. Namun hendaknya diperhatikan pula bahwa gambaran ini menjadi rumit atau ruwet jika masukannya berupa sebuah superposisi. Dalam kasus seperti ini maka cara terbaik adalah kembali menggunakan persamaan (4).

1.5 QUBIT DAN SISTEM QUBIT

Qubit, singkatan dari "quantum *bit*" merupakan satuan informasi fundamental yang digunakan dalam komputer kuantum. Ia dapat dipandang sebagai generalisasi mekanika kuantum dari sebuah bit yang biasa digunakan dalam komputer klasikal (komputer digital). Secara matematis, qubit adalah sebuah sistem kuantum dua-dimensi. Keadaan sebuah qubit dapat dinyatakan dengan

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (5)$$

dalam hal ini a dan b adalah bilangan-bilangan kompleks sehingga $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Di sini telah digunakan notasi Dirac untuk meringkaskan dua keadaan basis dari sebuah ruang vektor dua dimensi, yaitu

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dengan demikian berdasarkan notasi ini, persamaan (5) menyatakan bahwa keadaan qubit adalah vektor kompleks dua-dimensi

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (7)$$

Berbeda halnya dengan bit klasikal, keadaan sebuah qubit tidak dapat diukur tanpa mengubah keadaannya. Pengukuran sebuah qubit, yang keadaannya diberikan oleh persamaan (5) akan menghasilkan harga klasikal salah satu dari nol ($|0\rangle$) dengan probabilitas $|a|^2$ atau satu ($|1\rangle$) dengan probabilitas $|b|^2$.

Struktur matematis sebuah qubit dapat dikembangkan untuk sistem kuantum berdimensi lebih tinggi. Keadaan sembarang sistem kuantum merupakan vektor ternormalisir (sebuah vektor dengan norm sama dengan satu) di dalam sebuah ruang vektor kompleks. Normalisasi perlu dilakukan untuk menjamin bahwa probabilitas total semua luaran pengukuran sama dengan satu.

Sebuah komputer kuantum akan mempunyai banyak sekali qubit. Oleh karenanya perlu untuk mengetahui bagaimana melakukan konstruksi kombinasi keadaan sistem qubit jamak jika diketahui keadaan qubit-qubit tunggal penyusunnya. Keadaan kombinasi qubit-qubit secara matematis dapat dinyatakan dengan suatu operasi yang disebut perkalian tensor dengan simbol $\otimes$, sering juga digunakan istilah perkalian Kronecker. Jika diketahui dua buah keadaan qubit tunggal $|\psi\rangle$ dan $|\psi'\rangle$ maka

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad |\psi'\rangle = \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} \\ |\psi\rangle \otimes |\psi'\rangle &= \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aa' \\ ab' \\ ba' \\ bb' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Sering kali simbol $\otimes$ tidak digunakan untuk menyatakan perkalian tensor tersebut; sebagai gantinya keadaan-keadaan tersebut dituliskan dalam sebuah ket saja. Misalnya, $|\psi\rangle \otimes |\psi'\rangle$ dituliskan langsung sebagai $|\psi\psi'\rangle$, dan $|0\rangle \otimes |0\rangle \otimes |0\rangle$ dituliskan sebagai $|000\rangle$. Untuk sistem- sistem yang lebih besar, notasi Dirac ini sangat nyaman digunakan dalam menghitung perkalian tensor (dibanding menggunakan notasi matriks), yaitu dengan memanfaatkan sifat distributif perkalian tensor. Sebagai contoh, untuk sistem, misalnya tiga qubit yang keadaan setiap qubitnya

adalah $|\gamma_j\rangle = \alpha_j|0\rangle + \beta_j|1\rangle$, untuk $j = 1, 2, 3$ maka keadaan gabungannya adalah

$$|\gamma_1\gamma_2\gamma_3\rangle = |\gamma_1\rangle \otimes |\gamma_2\rangle \otimes |\gamma_3\rangle \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \alpha_1\alpha_2\alpha_3|000\rangle + \alpha_1\alpha_2\beta_3|001\rangle + \alpha_1\beta_2\alpha_3|010\rangle + \alpha_1\beta_2\beta_3|011\rangle \\ &\quad + \beta_1\alpha_2\alpha_3|100\rangle + \beta_1\alpha_2\beta_3|101\rangle + \beta_1\beta_2\alpha_3|110\rangle + \beta_1\beta_2\beta_3|111\rangle \end{aligned} \quad (10)$$

Sebuah pengukuran untuk semua tiga qubit akan menghasilkan salah satu dari delapan (2^3) kemungkinan *bit-string* dari delapan vektor basis. Dari contoh ini dapat terlihat bahwa ruang keadaan (ruang keadaan) tumbuh secara eksponensial dari n jumlah qubit dan menghasilkan 2^n jumlah vektor basis.

1.6 SUPERPOSISI DAN KEBERBELITAN (ENTANGLEMENT)

Superposisi mengungkapkan fakta bahwa setiap kombinasi linier dari dua keadaan kuantum, setelah dinormalisir, juga merupakan sebuah keadaan kuantum yang sah. Konsekuensinya adalah bahwa setiap keadaan kuantum selalu dapat dinyatakan sebagai kombinasi linier dari sejumlah keadaan basis. Sebagai contoh, seperti terlihat di persamaan (5), setiap keadaan dari sebuah qubit dapat dinyatakan sebagai kombinasi linier dari $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Demikian pula halnya, keadaan setiap sistem n qubit dapat dituliskan sebagai sebuah normalisasi kombinasi linier keadaan-keadaan 2^n bit-string (keadaan-keadaan yang dibentuk oleh perkalian tensor $|0\rangle$ dan $|1\rangle$). Basis orthonormal yang dibentuk oleh keadaan-keadaan 2^n bit-string disebut basis komputasional atau basis standar.

Perhatikanlah bahwa persamaan (9) mendeskripsikan sebuah sistem tiga qubit yang keadaan lengkapnya merupakan perkalian tensor keadaan keadaan tiga buah qubit tunggal yang berbeda. Meskipun demikian bisa terjadi tiga qubit berada dalam suatu keadaan yang tidak dapat dinyatakan sebagai perkalian tensor tiga buah keadaan qubit tunggal. Sebagai contoh sebuah keadaan

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle) \neq (a_1|0\rangle + b_1|1\rangle)(a_2|0\rangle + b_2|1\rangle)(a_3|0\rangle + b_3|1\rangle) \quad (11)$$

untuk semua bilangan kompleks $\{a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_1\}$. Keadaan-keadaan suatu sistem yang tidak dapat dinyatakan sebagai sebuah perkalian tensor dari subsistemnya disebut keadaan-keadaan berbelit (*entangled*). Untuk sebuah sistem n qubit, hal itu berarti bahwa sebuah sistem yang berbelit tidak dapat dinyatakan sebagai sebuah perkalian tensor dari n keadaan qubit tunggal. Keberadaan keadaan-keadaan berbelit merupakan fakta fisis yang mempunyai konsekuensi pada komputasi kuantum dan pengolahan informasi kuantum. Bahkan, tanpa kehadiran keadaan-keadaan berbelit ini maka komputer kuantum tidak mempunyai kelebihan terhadap komputer digital. Keberbelitan telah memungkinkan menciptakan 2^n ruang vektor kompleks yang lengkap untuk melakukan komputasi dengan hanya menggunakan n buah qubit fisis.

1.7 PENGUKURAN

Pengukuran di sini pada dasarnya adalah mentransformasikan informasi kuantum (yang tersimpan di dalam sistem kuantum) menjadi informasi klasikal. Sebagai contoh, pengukuran sebuah qubit umumnya adalah membaca sebuah bit klasikal, baik qubit itu 0 atau 1. Fundamental mekanika kuantum menyatakan bahwa luaran pengukuran itu bersifat *probabilistik*.

Dengan menggunakan notasi-notasi untuk perkalian luar, untuk keadaan qubit tunggal pada persamaan (5), maka probabilitas mendapatkan $|0\rangle$ setelah pengukuran adalah $|\langle 0|\psi\rangle|^2$, dan probabilitas mendapatkan $|1\rangle$ setelah pengukuran adalah $|\langle 1|\psi\rangle|^2$. Jadi probabilitas-probabilitas pengukuran dapat dinyatakan sebagai kuadrat nilai absolut dari irisan-irisan keadaan-keadaan. Secara umum, probabilitas mendapatkan bit-string $|x_1 \dots x_n\rangle$ setelah pengukuran sebuah keadaan n qubit $|\psi\rangle$ akan sama dengan $|\langle x_1 \dots x_n | \psi \rangle|^2$.

Kini perhatikanlah sebuah pengukuran yang lebih rumit. Misal diketahui sebuah keadaan tiga qubit $|0\rangle$ namun hanya diinginkan untuk mengukur qubit pertama dan membiarkan kedua qubit lainnya tidak terusik. Berapakah probabilitas diperoleh $|0\rangle$ sebagai qubit pertama? Probabilitas itu tidak lain adalah:

$$\sum_{(x_2 x_3) \in \{0,1\}} |\langle 0 x_2 x_3 | \phi \rangle|^2 \quad (12)$$

Keadaan sistem setelah pengukuran ini dapat diperoleh dengan menormalisir keadaan

$$\sum_{(x_2x_3)\in\{0,1\}} \langle 0x_2x_3|\phi\rangle|0x_2x_3\rangle \tag{13}$$

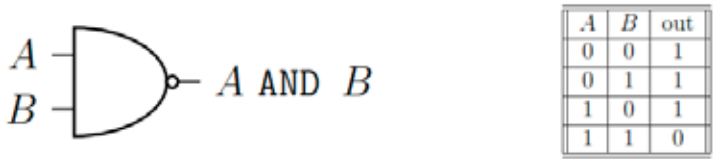
Penggunaan paradigma ini pada keadaan yang diberikan oleh persamaan (11) akan menghasilkan probabilitas mendapatkan $|0\rangle$ sebagai qubit pertama sebesar 0,5 dan jika hasil ini yang diperoleh maka keadaan akhir dari sistem adalah $|000\rangle$. Sebaliknya, jika yang diinginkan atau diukur adalah $|1\rangle$ sebagai qubit pertama maka keadaan akhir sistem adalah $|111\rangle$. Demikian pula dapat dihitung efek pengukuran subsistem pada sembarang sistem n qubit.

Dalam banyak kasus, perlu dilakukan pengukuran dengan sebuah basis yang berbeda. Hal ini dapat dicapai dengan transformasi pada sistem sebelum dilakukan pengukuran. Formalisma yang telah dibahas cukup untuk digunakan pada semua skenario yang akan dibahas di bab-bab selanjutnya.

1.8 GERBANG-GERBANG: LOGIKA DAN KUANTUM

Gerbang-gerbang logika adalah sebuah idealisasi model perangkat komputasi digital (klasik) untuk mewujudkan suatu fungsi Boolean, yaitu sebuah operasi logika yang dilakukan pada satu atau lebih masukan-masukan biner yang menghasilkan sebuah keluaran biner. Salah satu idealisasi model perangkat komputasi kuantum juga dapat dilakukan dengan menggunakan gerbang-gerbang kuantum. Pada bagian ini akan dibahas sepintas kedua jenis gerbang itu untuk melihat perbedaan fundamental antara keduanya.

1.8.1 Gerbang Logika



Gambar 1.3 Sebuah gerbang logika NAND dengan tabel kebenarannya (truth table)

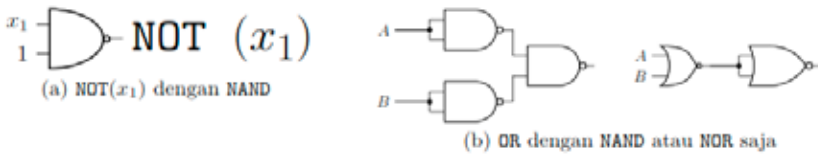
Sembarang fungsi Boolean yang didefinisikan sebagai $f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m$ dapat dihitung dengan rangkaian gerbang logika NOT, OR, dan AND, dan oleh karenanya ketiga gerbang-gerbang ini disebut sebagai gerbang logika universal. Bahkan, sebenarnya semua fungsi-fungsi Boolean ini dapat dihasilkan oleh gerbang NAND atau NOR saja sehingga kedua gerbang inilah yang lebih tepat disebut sebagai gerbang logika universal.

Gerbang-gerbang AND dan OR mempunyai dua buah bit masukan dan menghasilkan sebuah bit saja sebagai keluarannya. Sedangkan gerbang NOT mempunyai sebuah bit masukan dan sebuah bit keluaran. Hubungan antara masukan dan keluaran umumnya dinyatakan dalam bentuk tabel yang diberi nama tabel kebenaran (*truth table*). Gambar 1.3 menunjukkan sebuah contoh gerbang logika dan tabel kebenarannya. Sedangkan Tabel 1.1 merupakan tabel kebenaran sejumlah gerbang logika.

Untuk melihat adanya gerbang universal itu, yaitu gerbang-gerbang AND, OR, serta NOT dapat digantikan oleh gerbang NAND saja dapat digunakan hukum De Morgan: $OR(x_1; x_2) = NOT(AND(NOT(x_1), NOT(x_2)))$. Selanjutnya gerbang AND dapat digantikan dengan gerbang NAND via $AND(x_1 x_2) = NOT(NAND(x_1 x_2))$. Akhirnya dapat ditunjukkan bahwa gerbang NOT dapat digantikan dengan gerbang NAND. Salah satu cara untuk mewujudkan $NOT(x_1)$ dengan gerbang NAND dapat dilihat di Gambar 1.4(a). Gambar 1.4(b) menunjukkan gerbang OR yang dapat dikonstruksikan hanya dengan menggunakan gerbang NAND atau NOR saja. Demikian pula gerbang-gerbang logika lainnya dapat dikonstruksikan hanya dengan gerbang NAND atau NOR saja. Sebelumnya, pada Gambar 1.4(a) telah digunakan sebuah bit, di sini adalah bit 1, yang disebut *ancilla*. Bit ancilla ini merupakan sebuah *input* yang dimaksudkan untuk membantu komputasi.

Tabel 1.1 Kebenaran yang berisi hubungan masukan dan keluaran gerbang-gerbang logika

MASUKAN		KELUARAN					
A	B	AND	NAND	OR	NOR	XOR	XNOR
0	0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	0	1



Gambar 1.4 Kontruksi NOT(x_1) dengan sebuah gerbang NAND (a), dan NOR (b)

Sebuah gerbang Boolean disebut sebagai *reversible* jika ia mempunyai jumlah masukan yang sama dengan jumlah keluarannya. Dengan demikian maka gerbang NOT merupakan gerbang yang *reversible*, sedangkan gerbang-gerbang standar lainnya tidak *reversible* karena mereka tidak mempunyai jumlah masukan dan keluaran yang sama. Sejumlah gerbang *reversible* mempunyai sifat tambahan, yaitu mereka adalah *inverse* terhadap dirinya sendiri; artinya, menggunakannya dua kali berturut-turut akan mengembalikan ke bit aslinya. Memang ini hanyalah sifat kebetulan saja; yang perlu dicatat adalah bahwa gerbang *reversible* selalu mempunyai gerbang *inverse*-nya, yang tidak selalu sama dengan dirinya sendiri. Reversibilitas merupakan sifat yang amat penting dalam gerbang-gerbang kuantum atau komputasi kuantum.

1.8.2 Gerbang Kuantum

Rangkaian listrik suatu komputer klasik terdiri atas kawat dan sejumlah gerbang logika. Kawat digunakan untuk mengalirkan informasi sepanjang rangkaian, sedangkan gerbang-gerbang logika digunakan untuk mengolah informasi, mengubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Sebagai contoh, misal gerbang-gerbang logika untuk sebuah bit klasik. Anggota kelas ini yang tidak trivial hanyalah gerbang NOT yang operasinya didefinisikan via *truth table* dimana $0 \rightarrow 1$ dan $1 \rightarrow 0$, yaitu keadaan-keadaan 0 dan 1 dipertukarkan. Model rangkaian kuantum juga terdiri atas garis dan gerbang kuantum. Garis menyatakan qubit tunggal, sedangkan gerbang kuantum merupakan suatu operator (atau transformator) yang digambarkan dalam bentuk kotak (boks). Secara matematis gerbang kuantum itu merupakan sebuah matriks $n \times n$.

Dapatkan sebuah gerbang kuantum yang setara gerbang logika NOT untuk qubit didefinisikan? Bayangkanlah kita mempunyai sejumlah proses yang membawa keadaan $|0\rangle$ ke $|1\rangle$ dan sebaliknya.

Proses seperti ini dapat menjadi salah satu kandidat untuk gerbang kuantum yang setara dengan gerbang NOT klasik. Namun menyatakan aksi spesifik gerbang itu pada keadaan-keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ tidaklah menjelaskan apa yang terjadi dengan superposisi keadaan-keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ tanpa adanya adanya pengetahuan lebih lanjut tentang sifat-sifat gerbang kuantum itu. Bahkan kenyataannya, gerbang NOT kuantum bertindak secara linier, yaitu ia membawa keadaan

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

(14)

Tabel 1.2 Sejumlah gerbang kuantum dan representasi matriksnya. Tampak pula gerbang-gerbang (matriks-matriks) Pauli σ_x , σ_y , dan σ_z

Gerbang-gerbang satu-qubit	Gerbang-gerbang multi-qubit
Hadamard= $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	CNOT = $CX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	$CZ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$	Controlled-U = $CU = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{00} & U_{01} \\ 0 & 0 & U_{10} & U_{11} \end{bmatrix}$
NOT = $\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	SWAP = $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$\sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	Toffoli = CCNOT = $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

pada keadaan di mana peran $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ dipertukarkan yaitu

$$\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$$

(15)

Mengapa gerbang NOT kuantum bersifat linier dan bukan non-linier merupakan pertanyaan yang menarik, dan jawabnya tidak tampak jelas dengan segera. Ternyata sifat linier ini merupakan sifat umum mekanika kuantum, dan tentu ada landasan kuat secara eksperimen; lebih dari itu, sifat non-linier dapat berujung pada suatu paradoks, misalnya komunikasi lebih cepat dari cahaya. Kita akan bahas lebih mendalam pada bab-bab selanjutnya.

Ada sebuah cara yang elegan untuk menyatakan gerbang NOT kuantum dalam bentuk matriks, yang mengikuti langsung sifat linier dari gerbang-gerbang kuantum. Misal kita definisikan sebuah matriks X untuk menyatakan gerbang NOT sebagai berikut

$$X \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(Notasi X untuk gerbang NOT mempunyai sejarah tersendiri). Jika keadaan kuantum $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ dituliskan dalam bentuk sebuah vektor

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

maka keluaran dari gerbang NOT kuantum adalah

$$X \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (18)$$

Perhatikanlah bahwa aksi dari gerbang NOT adalah mengambil keadaan $|0\rangle$ dan menggantinya dengan keadaan yang dinyatakan oleh kolom pertama dari matriks X . Demikian pula, keadaan $|1\rangle$ yang digantikan oleh keadaan yang dinyatakan oleh kolom kedua dari matriks X .

Jadi gerbang-gerbang kuantum pada sebuah qubit tunggal dapat dinyatakan dengan matriks dua kali dua. Apakah ada syarat-syarat untuk matriks yang dapat digunakan sebagai gerbang-gerbang kuantum? Jawabnya cukup jelas: Ada. Ingat bahwa syarat normalisasi adalah bahwa $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ untuk sebuah keadaan kuantum $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Hal ini juga harus berlaku untuk keadaan kuantum $|\psi'\rangle = \alpha'|0\rangle + \beta'|1\rangle$. Ternyata syarat yang tepat bagi matriks yang

digunakan untuk menyatakan gerbang kuantum adalah matriks U yang menyatakan gerbang qubit tunggal itu harus uniter (*unitary*), yaitu U memenuhi persamaan

$$U^\dagger U = U U^\dagger = \mathbb{I} \quad (19)$$

di mana $U^\dagger$ merupakan *adjoint* dari U (yang diperoleh dari U yang di-transpose kemudian di-konjugat-kompleks-kan), dan $\mathbb{I}$ adalah matriks identitas dua kali dua. Sebagai contoh, gerbang NOT jelas memenuhi syarat ini karena $XX = \mathbb{I}$. Mengagumkannya adalah bahwa syarat uniter ini merupakan satu-satunya syarat untuk gerbang kuantum. Setiap matriks uniter sah menyatakan sebuah gerbang kuantum. Implikasinya adalah bahwa banyak sekali non-trivial gerbang-gerbang qubit tunggal (bandingkan dengan bit klasik yang hanya mempunyai sebuah gerbang non-trivial yaitu gerbang NOT). Gerbang kuantum bersifat *reversible* dan dapat dipandang sebagai operator atau transformator sehingga representasinya merupakan suatu matriks. Gerbang-gerbang kuantum yang paling banyak ditemui dapat dilihat di Tabel 1.1 Sebuah qubit atau sistem qubit jamak akan berubah keadaannya melalui rangkaian gerbang quantum atau serangkaian transformasi uniter. Sebuah transformasi uniter dapat dinyatakan dengan sebuah matriks uniter U yang suku-sukunya adalah bilangan kompleks. Sebuah keadaan qubit $|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ akan berevolusi akibat operasi matriks U yang berukuran 2×2 berdasarkan

$$\begin{array}{c} |0\rangle \\ |1\rangle \end{array} \xrightarrow{\boxed{X}} [X \otimes \mathbb{I}] \cdot |01\rangle \quad \begin{array}{c} |0\rangle \\ |1\rangle \end{array} \xrightarrow{\boxed{H}} [X \otimes H] \cdot |01\rangle$$

Gambar 1.5 Kombinasi sistem dua qubit

$$|\phi\rangle \longrightarrow U|\phi\rangle = \begin{bmatrix} U_{00} & U_{01} \\ U_{10} & U_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{00}\alpha + U_{01}\beta \\ U_{10}\alpha + U_{11}\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

Operator-operator yang beroperasi pada qubit-qubit yang berbeda dapat dikombinasikan dengan menggunakan perkalian tensor. Sebagai contoh, jika U dan Q adalah operator-operator yang beroperasi pada dua qubit yang berbeda maka operator yang

beroperasi pada kombinasi sistem dua qubit akan diberikan oleh $U \otimes Q$. Perhatikanlah Gambar 1.5.

Kombinasi operator X dan I yang masing-masingnya beroperasi pada qubit yang berbeda akan menghasilkan kombinasi transformasi $X \otimes I$ seperti yang ditunjukkan pada gambar kiri di Gambar 1.5. Jika masukannya adalah $|01\rangle$ maka dengan mudah dapat dilihat bahwa luarannya adalah $|11\rangle$ yang tidak lain merupakan:

$$[X \otimes I] \cdot |01\rangle = [X|0\rangle] \otimes [I|1\rangle] = |1\rangle \otimes |1\rangle = |11\rangle$$

atau dengan menggunakan notasi atau operasi matriks juga dapat diperoleh hasil yang sama,

$$[X \otimes I] \cdot |01\rangle = \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |11\rangle$$

Demikian juga, dengan cara sama, dapat dibuktikan untuk gambar kanan pada Gambar 1.5.

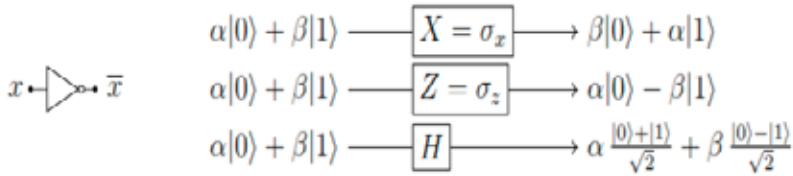
Untuk sebuah sistem n qubit, himpunan transformasi yang diizinkan secara fisis, selain pengukuran, terdiri atas semua matriks uniter $2^n \times 2^n$. Perhatikanlah bahwa ukuran transformasi bertambah secara eksponensial terhadap jumlah qubit. Dalam praktiknya sebuah transformasi pada n qubit dilakukan dengan menggunakan sebuah kombinasi transformasi-transformasi uniter yang bekerja pada hanya satu atau dua qubit di setiap tahapnya. Analogi dengan gerbang logika klasik seperti NOT dan AND, transformasi uniter dasar seperti itu, yang dapat digunakan untuk membangun transformasi n qubit yang rumit, disebut gerbang kuantum atau gerbang saja. Gerbang ini merupakan transformasi uniter dan dari persamaan (19) cukup jelas bahwa uniteritas hanya dapat dipenuhi jika jumlah qubit masukan sama dengan jumlah qubit luaran. Juga, untuk setiap gerbang U selalu dapat dicari gerbang $U^\dagger$ yang mengurai kembali transformasi itu. Jadi berbeda dengan gerbang-gerbang klasikal, gerbang-gerbang kuantum harus bersifat *reversible*, artinya masukan gerbang selalu dapat direkonstruksi dari luaran gerbang. Misal, gerbang klasikal NOT, yang memetakan 0 ke 1 dan 1 ke 0 adalah *reversible* karena suatu luaran 1 berimplikasi masukannya adalah 0, dan sebaliknya. Namun

gerbang klasikal AND tidak reversible karena luarannya 1 jika dan hanya jika kedua masukannya adalah 1. Luaran 1 berimplikasi masukan-masukannya adalah 11, tetapi luaran 0 memberi informasi yang tidak cukup untuk menentukan apakah masukannya 00, 01 atau 10. Tambahan batasan berupa sifat reversibilitas tidak berarti bahwa gerbang kuantum tidak lagi sempurna gerbang digital. Bahkan gerbang klasikal juga dapat dibuat *reversible*, tentu dengan tambahan biaya. Dengan demikian gerbang kuantum dapat dilihat sebagai generalisasi dari gerbang-gerbang reversibel klasikal.

Dua buah gerbang penting yang lain adalah gerbang Z:

$$Z \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

yang membiarkan keadaan $|0\rangle$ tidak berubah, dan membalik polaritas $|1\rangle$ menjadi $-|1\rangle$, dan gerbang Hadamard:



Gambar 1. 6 Sebuah gerbang logika bit (kiri) dan qubit tunggal (kanan)

$$H^{\otimes 0} \equiv 1 \quad H^{\otimes 1} \equiv H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} H^{\otimes 0} & H^{\otimes 0} \\ H^{\otimes 0} & -H^{\otimes 0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$H \otimes H = H^{\otimes 2} \equiv \frac{1}{2} \begin{bmatrix} H^{\otimes 1} & H^{\otimes 1} \\ H^{\otimes 1} & -H^{\otimes 1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} H & H \\ H & -H \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$H^{\otimes n} \equiv \frac{1}{\sqrt{2^n}} \begin{bmatrix} H^{\otimes(n-1)} & H^{\otimes(n-1)} \\ H^{\otimes(n-1)} & -H^{\otimes(n-1)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Gerbang Hadamard ini sering kali disebut sebagai 'gerbang akar pangkat dua NOT' yang dengan itu sebuah $|0\rangle$ diubah menjadi $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ (kolom pertama dari H), 'pertengahan' antara $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, dan mengubah $|1\rangle$ menjadi $(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ (kolom kedua H), yang juga 'pertengahan' antara $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Perlu dicatat bahwa H^2 bukanlah sebuah gerbang NOT sebagaimana dengan mudah ditunjukkan bahwa $H^2 = I$,

sehingga mengoperasikan H dua kali pada sebuah keadaan tidak akan menghasilkan perubahan apapun. (Catatan gerbang-gerbang X , Z juga Y , lihat di Tabel 1.2 tidak lain adalah matriks Pauli σ_x , σ_y , dan σ_z yang terkenal itu. Di sini akan digunakan secara bebas notasinya X atau σ_x .)

Gerbang Hadamard merupakan salah satu gerbang kuantum yang amat berguna, dan sangat bermanfaat untuk divisualisasikan operasinya pada bola Bloch. Dapat dilihat bahwa gerbang qubit tunggal ini merupakan suatu rotasi dan refleksi dari bola. Operasi Hadamard tidak lain adalah rotasi bola pada sumbu y sebesar 90° dan kemudian diikuti dengan rotasi pada sumbu x sebesar 180° . Untuk sudut positif, arah rotasi berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Sebagaimana operasi gerbang NOT kuantum dapat dijelaskan dengan menggunakan operasi matriks seperti telah dibahas sebelumnya, maka operasi gerbang Z dan gerbang Hadamard pun dapat dijelaskan menggunakan operasi matriks:

$$Z \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\beta \end{bmatrix} = \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$$

$$H \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \alpha + \beta \\ \alpha - \beta \end{bmatrix} = \alpha \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} + \beta \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$



Gambar 1.7 Simbol gerbang kuantum untuk pengukuran

Ada sebuah lagi gerbang kuantum qubit tunggal yang digunakan khusus untuk melakukan pengukuran. Artinya, pengukuran sebuah qubit juga dinyatakan dengan sebuah gerbang khusus yang disimbolkan oleh sebuah meteran seperti terlihat di Gambar 1.7. Berbeda dengan gerbang-gerbang kuantum lainnya, gerbang pengukuran ini tidak punya dan tidak memerlukan representasi matriks. Gerbang ini hanya pertanda bahwa di titik itulah luaran dibaca.

1.9 GERBANG QUBIT TUNGGAL UTAMA

Hal yang dimaksud dengan gerbang-gerbang qubit tunggal utama adalah gerbang qubit tunggal yang paling sering digunakan dalam rangkaian quantum. Gerbang-gerbang itu adalah Hadamard, Pauli- X ,

Pauli-Y, Pauli-Z, R, S, dan T. Tabel 1.3 menunjukkan gerbang tersebut yang berturut-turut disimbolkan dengan H, X, Y, Z, R, S, dan T beserta matriks nya. Tabel ini juga disertai dengan efek gerbang-gerbang tersebut terhadap basis standar $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Di Tabel 1.3 ini telah digunakan $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$.

Tabel 1.3 Gerbang-gerbang kuantum utama, representasi matriks, dan efeknya terhadap basis standar atau basis komputasi

Gerbang	Matriks	Masukan	Luaran
H	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$\frac{ 0\rangle + 1\rangle}{\sqrt{2}}$
		$ 1\rangle$	$\frac{ 0\rangle - 1\rangle}{\sqrt{2}}$
X	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
		$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
Y	$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$e^{i\pi/2} 1\rangle$
		$ 1\rangle$	$e^{-i\pi/2} 0\rangle$
Z	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
		$ 1\rangle$	$- 1\rangle$
R_ϕ	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
		$ 1\rangle$	$e^{i\phi} 1\rangle$
S	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
		$ 1\rangle$	$i 1\rangle$
T	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
		$ 1\rangle$	$e^{i\pi/4} 1\rangle$

Penting juga untuk diperhatikan bahwa $H = (X + Z)/\sqrt{2}$ dan $S = T^2$. Gerbang T disebut juga gerbang $\pi/8$ walaupun di definisinya menggunakan fasa $\pi/4$. Alasannya adalah gerbang ini punya sejarah disebut gerbang $\pi/8$ karena hingga fasa global yang tidak penting, gerbang T sama dengan gerbang yang mempunyai komponen diagonal dengan faktor $\exp(\pm i\pi/8)$. Gerbang S dan T sebenarnya merupakan gerbang fasa R dengan spesifik harga θ -nya.

$$T = \exp(i\pi/8) \begin{bmatrix} \exp(-i\pi/8) & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/8) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Matriks-matriks Pauli menghasilkan tiga kelas matriks uniter yang jika di-eksponensial-kan akan menghasilkan operator rotasi pada sumbu-sumbu x , y dan z berdasarkan persamaan sebagai berikut

$$R_x(\theta) = e^{-i\theta X/2} = \cos \frac{\theta}{2} \mathbb{I} - i \sin \frac{\theta}{2} X = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -i \sin \frac{\theta}{2} \\ -i \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$R_y(\theta) \equiv e^{-i\theta Y/2} = \cos \frac{\theta}{2} \mathbb{I} - i \sin \frac{\theta}{2} Y = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -\sin \frac{\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$R_z(\theta) \equiv e^{-i\theta Z/2} = \cos \frac{\theta}{2} \mathbb{I} - i \sin \frac{\theta}{2} Z = \begin{bmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Vektor eigen (*eigenvectors*) dari matriks Pauli X dapat diperoleh dari $(X - \lambda \mathbb{I})\alpha = 0$ di mana λ adalah harga eigen (*eigenvalues*). Dapat diperoleh pasangan harga eigen dan eigen vektor terkaitnya sebagai berikut:

α	Pemetaan	α	Pemetaan	α	Pemetaan
0	$ 0\rangle \mapsto 0$	+1	$ +\rangle \mapsto +1$	i	$ i\rangle \mapsto i$
∞	$ 1\rangle \mapsto \infty$	-1	$ -\rangle \mapsto -1$	$-i$	$ -i\rangle \mapsto -i$

Gambar 1.8 Pemetaan bilangan kompleks dan qubit dengan korespondensi satu-satu

$$\lambda_1 = 1, \quad \vec{\alpha}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle \quad (29)$$

$$\lambda_2 = -1, \quad \vec{\alpha}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle \quad (30)$$

Dengan demikian maka dapat diturunkan

$$\begin{aligned} X &= \lambda_1 \vec{\alpha}_1 \vec{\alpha}_1^\dagger + \lambda_2 \vec{\alpha}_2 \vec{\alpha}_2^\dagger = \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(\langle 0| + \langle 1|) - \frac{1}{2}(|0\rangle - |1\rangle)(\langle 0| - \langle 1|) \\ &= |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0| \end{aligned} \quad (31)$$

Posisi kedua vektor eigen dari X di permukaan bola Bloch dapat dilihat di Gambar 1.9.

1.10 BOLA BLOCH

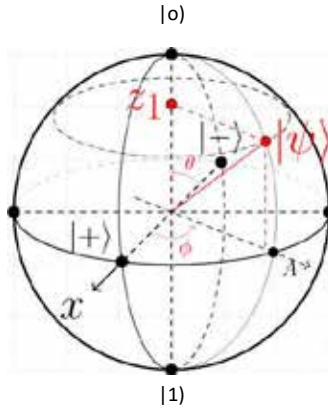
Setiap qubit dapat dinyatakan oleh persamaan (5) yaitu $|\wedge\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ di mana $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Dengan demikian dapat dilakukan pemetaan untuk semua bilangan kompleks dan keadaan qubit tunggal sebagai berikut.

$$a|0\rangle + b|1\rangle \mapsto \frac{b}{a} = \alpha, \quad \alpha \mapsto \frac{1}{\sqrt{1+|\alpha|^2}}|0\rangle + \frac{\alpha}{\sqrt{1+|\alpha|^2}}|1\rangle \quad (32)$$

Pemetaan ini tidak terdefinisi untuk $a = 0$ dan $b = 1$. Agar diperoleh korespondensi satu-satu maka ditambahkan sebuah titik yang diberi label ∞ pada bidang kompleks dan didefinisikan $\infty \leftrightarrow 1$. Maka dapat diperoleh tabel pemetaan seperti ditunjukkan di Tabel 1.8. Di samping itu ada model pemetaan lain, yaitu bola Bloch, di mana bilangan kompleks $\alpha = s + iq$, dengan s, q bilangan riil, dapat direpresentasikan pada permukaan bola satuan di ruang tiga-dimensi di titik $(x, y, z) \in \mathbb{C} - \{0, \dots, 1\}$ dengan $|x|^2 + |y|^2 + |z|^2 = 1$ via proyeksi stereografis

$$(s, q) \mapsto \left(\frac{2s}{|\alpha|^2 + 1}, \frac{2q}{|\alpha|^2 + 1}, \frac{1 - |\alpha|^2}{|\alpha|^2 + 1} \right) \quad (0, 0, 1) \mapsto \infty \quad (33)$$

Dalam model bola Bloch ini, misal untuk $a = i \rightarrow |i\rangle$ yang berarti $s = 0$, $q = 1$. Berdasar persamaan (34) maka $(0, 1) \rightarrow (0, 1, 0)$, artinya posisi $|i\rangle$ dipermukaan bola Bloch adalah $(0, 1, 0)$; seperti ditunjukkan di gambar.



Gambar 1.9 Vektor eigen matriks Pauli di permukaan bola Bloch

Seperti telah disebutkan sebelumnya, sembarang keadaan kuantum dapat dinyatakan dengan $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ di mana a dan b adalah sembarang bilangan kompleks yang memenuhi syarat $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Keadaan ini juga dapat dinyatakan dengan

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + (\cos \phi + i \sin \phi) \sin \frac{\theta}{2} \quad (34)$$

di mana θ dan ϕ adalah sudut-sudut seperti yang ditunjukkan di Gambar 1.9. Jadi, untuk $\theta = 90^\circ$ dan $\phi = 0^\circ$ akan diperoleh

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle$$

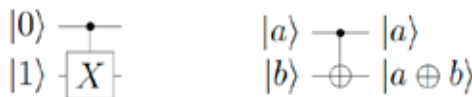
sehingga posisinya di (1, 0, 0) pada bola Bloch, lihat Gambar 1.9. Demikian pula untuk $\theta = 90^\circ$ dan $\phi = 90^\circ$ akan diperoleh

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle) = |i\rangle$$

yang berada di (0, 1, 0) pada bola Bloch, sama persis dengan yang diperoleh sebelumnya, menggunakan pemetaan.

Bola Bloch merupakan alat bantu yang ampuh untuk visualisasi keadaan sebuah qubit tunggal. Dalam banyak hal dapat digunakan untuk menguji ide awal tentang komputasi dan informasi kuantum. Banyak sekali operasi-operasi qubit tunggal dapat dengan sangat mudah diungkapkan pada permukaan bola Bloch. Meskipun demikian, intuisi yang dapat dibangun via bola Bloch tetap terbatas karena sungguh amat sulit jika digunakan untuk qubit jamak.

1.11 GERBANG TERKENDALI



Gambar 1.10 Rangkaian kuantum CNOT dalam dua format yang ekuivalen



Gambar 1.11 Kiri, gerbang CNOT untuk qubit kendali berupa $|0\rangle$. Kanan, gerbang U terkendali

Gerbang X merupakan versi kuantum untuk gerbang NOT. Gerbang CNOT, seperti yang ditunjukkan di Gambar 1.10, atau lengkapnya” controlled-NOT” atau NOT-terkendali akan menegasikan bit target jika dan hanya jika bit pengendalinya sama dengan 1. Jika diperlukan akan digunakan notasi CNOT_j untuk sebuah gerbang

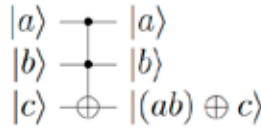
CNOT dengan qubit pengendali i dengan qubit target j . Lingkaran kecil hitam pada qubit pertama menandakan bahwa qubit ini merupakan pengendali dalam gerbang CNOT. Rangkaian gerbang CNOT, lihat Gambar 1.10, dapat dinyatakan via notasi perkalian luar sebagai berikut.

$$\text{CNOT} = |0\rangle\langle 0| \otimes \mathbb{I} + |1\rangle\langle 1| \otimes X = |00\rangle\langle 00| + |01\rangle\langle 01| + |10\rangle\langle 11| + |11\rangle\langle 10| \quad (35)$$

di mana simbol O menyatakan operasi tensor. Gerbang CNOT pada persamaan 35 secara eksplisit sebenarnya merupakan gerbang CNOT_{12} . Dengan demikian maka gerbang CNOT_{21} akan diberikan oleh

$$\text{CNOT}_{21} = \mathbb{I} \otimes |0\rangle\langle 0| + X \otimes |1\rangle\langle 1| \quad (36)$$

Seandainya yang diinginkan sebagai qubit kendali efektif adalah 10) maka dapat ditambahkan dua gerbang X seperti ditunjukkan di Gambar 1.11.



Gambar 1.12 Gerbang Toffoli atau gerbang CCNOT yang memiliki dua buah qubit, $|a\rangle$
 $\otimes |b\rangle = |ab\rangle$

Gerbang Toffoli atau” controlled-controlled NOT” or CCNOT merupakan sebuah gerbang tiga qubit yang esensinya adalah versi kuantum dari gerbang AND. Gerbang ini menegasikan bit target jika dan hanya jika kedua bit pengendali adalah 1: Dalam notasi perkalian luar gerbang Toffoli dapat dituliskan sebagai

$$\text{CCNOT} = |11\rangle\langle 11| \otimes X + (\mathbb{I} - |11\rangle\langle 11|) \otimes \mathbb{I} \quad (37)$$

CCNOT dapat juga dilihat sebagai gerbang CNOT dengan tambahan qubit pengendali

$$\text{CCNOT} = |0\rangle\langle 0| \otimes \mathbb{I} + |1\rangle\langle 1| \otimes \text{CNOT} \quad (38)$$

atau lebih eksplisit lagi gerbang Toffoli juga dapat dituliskan sebagai

$$\text{CCNOT} = |00\rangle\langle 00| \otimes \mathbb{I} + |01\rangle\langle 01| \otimes \mathbb{I} + |10\rangle\langle 10| \otimes \mathbb{I} + |11\rangle\langle 11| \otimes \text{CNOT} \quad (39)$$

Secara umum, kita dapat mendefinisikan versi terkendali sembarang gerbang uniter U , lihat gambar kanan di Gambar 1.11, sebagai

$$CU = |0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes U \quad (40)$$

CU menggunakan U pada sejumlah qubit hanya jika qubit pertama (qubit pengendali) adalah $|1\rangle$: Sebuah himpunan gerbang yang secara bersama dapat mengeksekusi semua kemungkinan komputasi kuantum disebut himpunan gerbang universal. Himpunan semua gerbang uniter dan gerbang CNOT biner (beraksi pada dua qubit) membentuk sebuah himpunan gerbang universal. Yang lebih ekonomis, himpunan $\{H, T, \text{CNOT}\}$ membentuk gerbang universal. Gerbang Toffoli sendirian juga merupakan gerbang universal.

1.12 OBSERVABLE DAN HARGA EKSPEKTASI

Eksperimen dalam mekanika kuantum bersifat probabilistik. Padahal sering kali kita perlu mengasosiasikan luaran eksperimen dengan sebuah bilangan riil. Besaran-besaran yang diukur dalam mekanika kuantum akan selalu bersifat rerata statistik dari bilangan-bilangan itu. Misal, kita ingin melakukan eksperimen pada banyak sekali keadaan qubit tunggal dari persamaan (5): kita ukur sebuah keadaan dan jika diperoleh $|0\rangle$ kita rekam 1 di catatan, dan dicatat — jika diperoleh yang lainnya. Kita tidak pernah memprediksi luaran dari suatu pengukuran itu, namun yang tepat untuk diajukan adalah pertanyaan: "Berapakah rerata bilangan yang tercatat?" Dari pembahasan sebelumnya diketahui bahwa probabilitas terukur $|0\rangle$ adalah $|\alpha|^2$ dan probabilitas terukur $|1\rangle$ adalah $|\beta|^2$. Jadi rerata bilangan yang terekam adalah

$$|\alpha|^2 - |\beta|^2 \quad (41)$$

Dalam formalisme kuantum, terdapat sebuah cara untuk menyatakan eksperimen seperti itu dan rerata-nya dengan menggunakan suatu operator. Untuk eksperimen seperti di contoh ini dapat digunakan operator yang berupa gerbang Z yaitu

$$Z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Dengan menggunakan operator ini sebagai ganti eksperimen itu maka rerata luaran dari $|0\rangle$ dapat dicari dari irisan $|\phi\rangle$ dengan $Z|\phi\rangle$ yaitu

$$\langle\phi|Z|\phi\rangle = \langle\phi|0\rangle\langle 0|\phi\rangle - \langle\phi|1\rangle\langle 1|\phi\rangle = |\alpha|^2 - |\beta|^2 \quad (43)$$

Operator Z disebut *observable* dari eksperimen itu. Besaran $\langle\phi|Z|\phi\rangle$ disebut sebagai harga ekspektasi, yang sering pula dituliskan $\langle Z\rangle$, jika tidak ada keraguan mengenai keadaan di mana eksperimen itu dilakukan. Eksperimen ini telah dilakukan di basis komputasi $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Namun eksperimen tidak selalu dalam basis komputasi ini. Eksperimen dapat dirancang dalam berbagai basis. Apa *observable* untuk eksperimen dalam basis yang lain itu? Eksperimen terkait bilangan riil $\{\alpha_i\}$ dalam pengukuran berbasis $\{|\phi_i\rangle\}$ akan mempunyai *observable*

$$O \equiv \sum_i a_i |\Phi_i\rangle\langle\Phi_i| \quad (44)$$

Observable ini akan menghasilkan harga ekspektasi yang benar untuk eksperimen terhadap sembarang keadaan $|\psi\rangle$ yaitu

$$\langle\psi|O|\psi\rangle = \sum_i a_i \langle\psi|\Phi_i\rangle\langle\Phi_i|\psi\rangle = \sum_i a_i |\langle\Phi_i|\psi\rangle|^2 \quad (45)$$

Mengingat himpunan basis $\{|\Phi_i\rangle\}$ adalah orthonormal, O akan memenuhi persamaan harga eigen sebagai berikut

$$O|\Phi_j\rangle = \sum_i a_i |\Phi_i\rangle\langle\Phi_i|\Phi_j\rangle = a_j |\Phi_j\rangle \quad (46)$$

Jadi O adalah sebuah operator yang mempunyai vektor eigen orthogonal yang lengkap (*complete*) dan harga-harga eigen riil. Operator seperti ini disebut operator Hermit (Hermitian operator), dan jelas bahwa $O = O^\dagger$. Dalam mekanika kuantum, setiap operator Hermit merupakan sebuah *observable* yang sah. Vektor eigen dari operator merupakan luaran yang mungkin dari eksperimen dan harga eigen terkaitnya merupakan bilangan riil terkait dengan luaran itu.

Pertanyaannya adalah apakah semua *observable* yang sah itu dapat diukur? Jawaban dari pertanyaan ini sangat tergantung pada

sistem kuantumnya. Di sini yang akan digunakan adalah prosesor kuantum IBM. Dalam sistem ini hanya pengukuran dalam basis komputasional ($\{|0\rangle, |1\rangle\}$) yang tersedia. Pengukuran dalam basis lainnya dapat dilakukan dengan menggunakan transformasi uniter yang tepat sebelum pengukuran dilakukan. Misal perangkat keras hanya mengizinkan pengukuran dilakukan dalam basis $\{|i\rangle\}$, tetapi kita ingin melakukan pengukuran dalam basis $\{|\Phi_i\rangle\}$. Problema ini dapat diselesaikan dengan menggunakan transformasi uniter

$$U = \sum_i |i\rangle\langle\Phi_i| \quad (47)$$

Kini pengukuran $U|\psi\rangle$ dalam basis komputasi sama dengan mengukur $|\psi\rangle$ dalam basis $\{|\Phi_i\rangle\}$. Hal ini dapat dilihat dari

$$|\langle j|U|\psi\rangle|^2 = \left| \sum_i \langle j|i\rangle\langle\Phi_i|\psi\rangle \right|^2 = |\langle\Phi_j|\psi\rangle|^2 \quad (48)$$

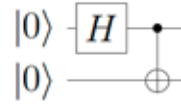
Jadi sekali U digunakan, luaran $|j\rangle$ akan ekivalen dengan luaran $|\Phi_j\rangle$ dalam skenario pengukuran awal. Namun tidak semua transformasi uniter seperti itu mudah implementasinya. Dengan demikian jika algoritma kuantum memerlukan pengukuran dalam suatu basis yang rumit maka biaya implementasi U harus diperhitungkan.

1.13 RANGKAIAN KUANTUM

Algoritma kuantum dalam literatur sering kali dinyatakan secara diagramatis sebagai suatu rangkaian atau sirkit (*circuit*). Pada representasi rangkaian ini, qubit dinyatakan sebagai garis horizontal. Gerbang-gerbang digambarkan pada qubit yang padanya operasi dilakukan. Ini dilakukan secara berurutan dari kiri ke kanan. Keadaan awal dari qubit ditempatkan di awal garis horizontal itu. Perhatikan, sewaktu menuliskan persamaan matematis untuk rangkaian ini, gerbang-gerbang dituliskan dari kanan ke kiri, sesuai dengan urutan penggunaannya. Gerbang terkendali, walaupun menggunakan kata gerbang, sebenarnya juga merupakan sebuah rangkaian kuantum sederhana. Di bagian ini akan disajikan sejumlah rangkaian kuantum sederhana yang dapat menjadi bagian dari suatu rangkaian kuantum

yang lebih kompleks. Kita mulai dengan rangkaian yang ditunjukkan di Gambar 1.13.

In	Out
$ 00\rangle$	$(00\rangle + 11\rangle)/\sqrt{2} \equiv \beta_{00}\rangle$
$ 01\rangle$	$(01\rangle + 10\rangle)/\sqrt{2} \equiv \beta_{01}\rangle$
$ 10\rangle$	$(00\rangle - 11\rangle)/\sqrt{2} \equiv \beta_{10}\rangle$
$ 11\rangle$	$(01\rangle - 10\rangle)/\sqrt{2} \equiv \beta_{11}\rangle$



Gambar 1.13 Rangkaian kuantum

Rangkaian kuantum untuk menciptakan keadaan-keadaan Bell beserta tabel kebenaran kuantum pasangan *input-output*-nya ini akan menghasilkan keadaan kuantum yang dikenal dengan nama keadaan-keadaan Bell suatu keadaan terbelit. Rangkaian di Gambar 1.13 ini mewujudkan persamaan

$$\text{CNOT}_{12}(H \otimes I)|00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Rangkaian ini dibaca dari kiri ke kanan. Misal $|x\rangle = |0\rangle$ dan $|y\rangle = |0\rangle$. Gerbang Hadamard (H) beraksi pada qubit teratas $|x\rangle = |0\rangle$ sehingga keadaan sistem berubah menjadi

$$H \otimes I|00\rangle = (H|0\rangle) \otimes (I|0\rangle) = \left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}\right) \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)$$

Gerbang CNOT_{12} beraksi pada kedua qubit tersebut. Seperti telah sebelumnya, aksi gerbang CNOT dengan demikian akan menghasilkan

$$\text{CNOT}_{12}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\text{CNOT}_{12}|00\rangle + \text{CNOT}_{12}|10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Masukan dan luaran dua qubit pada rangkain Bell ini diberikan oleh tabel yang juga diberikan di Gambar 1.1. Keadaan-keadaan Bell yang terbelit ini menjadi contoh umum dalam pembahasan tentang teleportasi yang akan di bahas pada bab selanjutnya.



Gambar 1.14 Kiri rangkaian paling sederhana yang dapat digunakan untuk merepresentasikan transformasi Fourier kuantum. Kanan: balikan (inverse) dari rangkaian sebelah kiri

$$\begin{array}{c}
 |a\rangle \\
 |b\rangle
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \bullet \\
 \oplus
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \oplus \\
 \bullet
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 |b\rangle \\
 |a\rangle
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 |a, b\rangle \longrightarrow |a, a \oplus b\rangle \\
 \longrightarrow |a \oplus (a \oplus b), a \oplus b\rangle = |b, a \oplus b\rangle \\
 \longrightarrow |b, (a \oplus b) \oplus b\rangle = |b, a\rangle
 \end{array}$$

Gambar 1.15 Rangkaian kuantum penukar (swap) qubit disertai buktinya

Rangkaian kuantum dua qubit lain yang akan kita temui dalam pembahasan tentang transformasi Fourier kuantum adalah seperti yang ditunjukkan di sebelah kiri pada Gambar 1.14. Representasi matriks dari gerbang $R^{\wedge/2}$ dapat dilihat kembali di Tabel 1.3. Representasi matriks rangkaian dapat diturunkan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 [H \otimes I][I \otimes |0\rangle\langle 0| + R_{\pi/2} \otimes |1\rangle\langle 1|][I \otimes H] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & i & -i \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -i & i \end{bmatrix} \quad (49)
 \end{aligned}$$

Sebagai contoh, masukan berupa $|01\rangle$ akan menghasilkan luaran berupa keadaan kuantum $|\psi\rangle = |00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle$. Jika $|\psi\rangle$ ini menjadi masukan rangkaian kuantum di gambar kanan pada Gambar 1.14 maka diperoleh kembali keadaan kuantum $|01\rangle$. Jadi, dengan kata lain, gambar sebelah kanan merupakan balikan (*inverse*) dari rangkaian kuantum di gambar sebelah kiri pada Gambar 1.14. Perhatikan tanda minus untuk sudut fasa rangkaian balikan. Hal ini dapat dipahami sepenuhnya; jika transformasi Fourier kuantum bersudut fasa positif (berlawanan dengan putaran jarum jam) maka sewajarnya jika balikannya mempunyai sudut fasa negatif (searah jarum jam). Rangkaian balikan transformasi Fourier kuantum dapat dinyatakan dengan

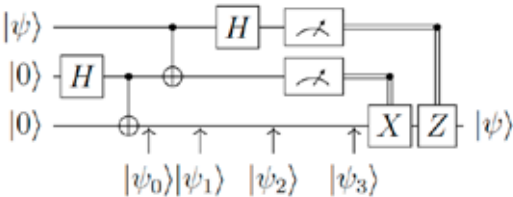
$$[\mathbb{I} \otimes H][\mathbb{I} \otimes |0\rangle\langle 0| + R_{(-\pi/2)} \otimes |1\rangle\langle 1|][H \otimes \mathbb{I}] \tag{50}$$

Transformasi Fourier kuantum ini akan dibahas lebih rinci di bagian lain selanjutnya.

Satu contoh rangkaian kuantum sederhana lain, misalnya adalah rangkaian yang dapat digunakan untuk menukarkan posisi qubit-qubit pada sistem qubit jamak. Atau dengan kata lain, rangkaian ini dapat digunakan untuk melakukan *swapping*. Rangkaian beserta bukti dapat digunakan untuk *swapping* ditunjukkan di Gambar 1.15. Rangkaian penukar ini berperan amat penting dalam transformasi Fourier kuantum.

1.14 SEDIKIT TENTANG TELEPORTASI

Dua garis pertama merepresentasikan sistem Alice dan garis ketiga merepresentasikan sistem Bob Meteran merepresentasikan pengukuran dan garis doble yang keluar dari meteran membawa bit klasikan.



Gambar 1.16 Rangkaian kuantum untuk menteleportasikan sebuah qubit

Rangkaian untuk sistem tiga qubit diperlihatkan di Gambar 1.16 yang disertai pula dengan keadaan sistem $|\psi_i\rangle$ di setiap tahap. Pada rangkaian ini juga terdapat garis rangkap yang keluar dari meteran pengukuran yang menyimbolkan bit-bit klasik. Rangkaian ini merupakan rangkaian untuk teleportasi kuantum. Keadaan kuantum yang akan diteleportasikan adalah $|\psi\rangle = a|0\rangle + \beta|1\rangle$ di mana a dan β adalah amplitudo-amplitudo yang tidak diketahui. Kita akan bahas secara singkat tentang teleportasi kuantum, yaitu suatu teknik memindahkan keadaan-keadaan kuantum dari satu tempat ke tempat lainnya walaupun tanpa tersedia kanal komunikasi kuantum sekalipun. Dalam komunikasi kuantum umumnya digunakan

pasangan Alice dan Bob yang merepresentasikan dua pihak yang saling berkomunikasi secara kuantum.

Persoalannya: Alice ingin mengirim keadaan kuantum $|\psi\rangle$ kepada Bob. Alice tidak tahu detail tentang $|\psi\rangle$, dan tentu juga tidak mempunyai salinan dari $|\psi\rangle$. Alice hanya dapat mengirim informasi klasikal kepada Bob karena tidak tersedia kanal kuantum yang memungkinkan dikirimkannya $|\psi\rangle$ secara langsung. Sebelum berpisah Alice dan Bob membangkitkan sebuah pasangan keadaan Bell dan selanjutnya masing-masing membawa satu qubit dari pasangan itu. Beruntung Alice dan Bob karena teleportasi kuantum dengan memanfaatkan pasangan terbelit Bell, $|\psi\rangle$ dapat dikirim ke Bob via kanal klasikal. Bagaimana caranya? Alice menginteraksikan $|\psi\rangle$ dengan sebuah dari pasangan Bell yang dimilikinya, dan kemudian mengukurnya. Pengukuran itu akan memberikan salah satu dari empat kemungkinan hasil klasikal: 00, 01, 10 dan 11. Hasil klasikal yang diperoleh itu kemudian dikirimkan ke Bob via kanal klasikal. Tergantung dari pesan klasikal dari Alice, kemudian Bob melakukan sebuah dari empat kemungkinan operasi pada separuh pasangan Bell yang dimilikinya. Mengherankannya, dengan melakukan hal tersebut, Bob dapat memperoleh keadaan kuantum $|\psi\rangle$ itu. Rangkaian kuantum pada Gambar 1.16 memberikan deskripsi rinci tentang teleportasi kuantum ini.

Masukan keadaan kuantum $|\psi_0\rangle$ ke dalam rangkaian adalah

$$|\psi_0\rangle = |\psi\rangle|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\alpha|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + \beta|1\rangle(|00\rangle + |01\rangle)\right] \quad (51)$$

$|\beta_{00}\rangle$ adalah keadaan Bell seperti yang ditunjukkan dalam tabel di Gambar 1.13. Gerbang Hadamard dan CNOT di bagian awal dimaksudkan untuk membangkitkan pasangan keadaan terbelit Bell. Di sini digunakan konvensi bahwa dua qubit pertama adalah milik Alice dan qubit ketiga adalah milik Bob. Seperti telah disebutkan sebelumnya, qubit kedua milik Alice dan qubit milik Bob merupakan pasangan keadaan kuantum Bell. Alice mengirimkan qubit-qubit yang dimilikinya melalui sebuah gerbang CNOT dan diperoleh

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\alpha|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + \beta|1\rangle(|10\rangle + |01\rangle)\right] \quad (52)$$

Kemudian Alice mengirimkan qubit pertamanya melalui sebuah gerbang Hadamard sehingga diperoleh

$$|\psi_2\rangle = \frac{1}{2} \left[\alpha(|0\rangle + |1\rangle)(|00\rangle + |11\rangle) + \beta(|0\rangle - |1\rangle)(|10\rangle + |01\rangle) \right] \quad (53)$$

Persamaan keadaan kuantum $|\psi_2\rangle$ di persamaan (53) dapat diatur untuk dituliskan kembali sebagai

$$\begin{aligned} |\psi_2\rangle = \frac{1}{2} & \left[|00\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) \right. \\ & \left. + |10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \right] \end{aligned} \quad (54)$$

Seperti dapat dilihat, persamaan (54) mempunyai empat suku. Pada suku pertama terdiri dari qubit-qubit Alice di keadaan kuantum $|00\rangle$, dan qubit Bob berada di keadaan kuantum $(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$ yang ternyata adalah keadaan kuantum yang hendak dikirimkan, yaitu $|\psi\rangle$. Jika hasil pengukuran Alice adalah 00 maka sistem milik Bob akan berada di keadaan kuantum $|\psi\rangle$. Tentu Alice dapat mengirimkan hasil pengukuran yang berupa bit-bit klasikal 00 melalui kanal klasikal sehingga Bob tahu bahwa keadaan kuantum yang dikirim Alice, yaitu $|\psi\rangle$. Berikut ini pemetaan hasil pengukuran Alice (yang dapat diinformasikan kepada Bob via kanal klasikal) dengan keadaan kuantum sistem milik Bob:

$$|00\rangle \mapsto |\psi_3(00)\rangle \equiv [\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle] \quad (55)$$

$$|01\rangle \mapsto |\psi_3(01)\rangle \equiv [\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle] \quad (56)$$

$$|10\rangle \mapsto |\psi_3(10)\rangle \equiv [\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle] \quad (57)$$

$$|11\rangle \mapsto |\psi_3(11)\rangle \equiv [\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle] \quad (58)$$

Jadi, tergantung pada hasil pengukuran Alice, qubit milik Bob akan berada di salah satu dari empat keadaan kuantum seperti yang diberikan oleh pemetaan di atas. Sudah barang tentu untuk mengetahui keadaan kuantum miliknya, Bob harus diberitahu hasil pengukuran Alice. Perlunya diketahui hasil pengukuran Alice, yang

harus dikirimkan via kanal klasikal inilah yang menyebabkan teleportasi tidak mungkin lebih cepat dari kecepatan cahaya. Begitu Bob mengetahui hasil pengukuran Alice, ia dapat menyesuaikan sistemnya agar dapat mengetahui $|\psi\rangle$. Misal jika hasil pengukuran Alice adalah 00, tentu Bob tidak perlu melakukan penyesuaian lagi. Tetapi jika hasil pengukuran Alice adalah 01 maka Bob perlu menggunakan gerbang X untuk memperoleh $|\psi\rangle$. Jika hasil pengukuran itu adalah 10 maka Bob perlu menggunakan gerbang Z. Sedangkan jika hasil pengukuran itu adalah 11 maka Bob harus menggunakan secara berurutan gerbang X dan kemudian disusul gerbang Z. Semua hal tersebut secara jelas tampak di rangkaian kuantum pada Gambar 1.16.

Banyak hal yang dapat dipelajari lebih lanjut dari teleportasi kuantum ini. Ia menggarisbawahi bahwa berbagi pasangan keadaan berbelit dapat merupakan sumber daya komunikasi sekurang-kurangnya satu qubit komunikasi. Artinya, melalui teleportasi kuantum dapat dilakukan pertukaran sumber daya kuantum. Teleportasi kuantum juga dapat digunakan untuk membangun gerbang-gerbang kuantum yang tahan menghadapi pengaruh derau (*noise*). Teleportasi kuantum juga sangat erat berkaitan dengan kode-kode untuk melakukan koreksi kesalahan (*error-correcting codes*). Catatan ini hanya sebatas memperkenalkan, tidak akan membahas lebih lanjut mengenai teleportasi kuantum.

1.15 SUMBER KESALAHAN KOMPUTASI

Bila ingin menerapkan sebuah algoritma kuantum sangatlah perlu mempertimbangkan sumber-sumber derau (*noise*) dalam komputer. Dua sumber utama derau pada umumnya adalah *infidelity* dan *decoherence*. *Infidelity* gerbang merujuk pada sebuah kenyataan bahwa gerbang yang digunakan oleh pengguna tidak tepat sama dengan gerbang fisis yang digunakan. Persoalan ini akan semakin parah untuk gerbang-gerbang multi-qubit dibanding pada gerbang satu-qubit. Jadi dianjurkan untuk seminimal mungkin menggunakan gerbang multi-qubit pada algoritma yang digunakan. *Decoherence* merujuk pada kenyataan bahwa dengan berjalannya waktu komputer kuantum kehilangan sifat kuantumnya dan bertingkah laku sebagaimana layaknya objek-objek klasikal. Setelah *decoherence*

mendominasi maka komputer tidak lagi dapat memanfaatkan sifat-sifat kuantum. Ini semua akan menyebabkan derau yang semakin parah pada algoritma kuantum dengan berjalannya waktu. Perlu juga disampaikan bahwa setiap qubit mempunyai *decohere* dengan laju yang berbeda, dan hal ini dapat digunakan untuk merancang algoritma menjadi lebih baik. Laju kesalahan setiap qubit pada prosesor IBM umumnya ditampilkan di situs *IBM Quantum Experience*.

1.16 ALGORITMA KUANTUM

Kelas komputasi apakah yang dapat dikerjakan menggunakan rangkaian kuantum? Bagaimana kelas itu jika dikerjakan dengan menggunakan rangkaian logika klasik? Mungkinkah ditemukan jenis-jenis pekerjaan yang komputer kuantum berkinerja lebih baik dibanding komputer klasik? Di bab-bab berikut ini hal-hal tersebut akan dibahas dan diberikan sejumlah contoh untuk memperkuat sejumlah argumen untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut. Hingga di sini kita sudah menyampaikan semua hal yang diperlukan untuk diskusi mengenai algoritma kuantum dalam penggunaan praktikal. Algoritma kuantum mempunyai tiga langkah dasar:

- 1 Enkoding data, yang dapat berupa data klasikal maupun kuantum, ke dalam keadaan sebuah himpunan qubit-qubit masukan.
- 2 Rangkaian gerbang-gerbang kuantum yang akan menerima himpunan masukan-masukan itu.
- 3 Pengukuran qubit-qubit di tahap terakhir untuk mendapatkan sesuatu hasil klasikal yang dapat diinterpretasikan.

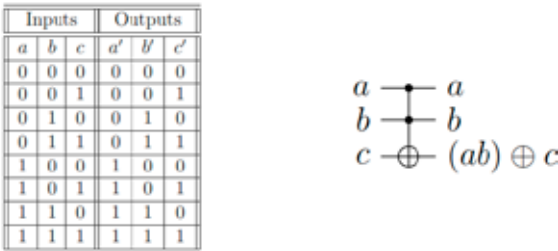
1.16.1 Komputasi Klasik pada Komputer Kuantum

Dapatkah kita menyimulasikan rangkaian logika klasik menggunakan sebuah rangkaian kuantum? Tentu tidak mengejutkan jika jawabnya adalah dapat atau bisa. Justru akan sangat mengherankan seandainya tidak demikian karena para fisikawan yakin bahwa semua aspek kehidupan, termasuk rangkaian logika dapat dijelaskan dengan mekanika kuantum. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya alasan mengapa rangkaian kuantum tidak dapat digunakan secara langsung

untuk menyimulasikan rangkaian klasik adalah karena gerbang-gerbang logika kuantum *unitary* secara inheren bersifat *reversible*, padahal banyak sekali gerbang-gerbang logika klasik seperti gerbang NAND secara inheren bersifat *irreversible*.

Setiap rangkaian klasik dapat digantikan oleh sebuah rangkaian ekuivalen yang hanya berisi unsur-unsur *reversible* dengan cara menggunakan gerbang yang dikenal dengan nama gerbang Toffoli. Seperti telah dibahas pada bab sebelumnya, gerbang Toffoli mempunyai tiga bit *input* dan tiga bit *output* seperti yang beserta tabel kebenarannya ditunjukkan di Gambar 1.17. Kedua bit pertama dari input merupakan bit-bit kontrol yang tidak terpengaruh oleh aksi gerbang Toffoli. Bit ketiga merupakan bit target yang akan berubah jika kedua bit kontrol berharga 1, jika tidak demikian akan dibiarkan seperti semula. Perhatikan bahwa menggunakan gerbang Toffoli dua kali pada suatu himpunan bit akan berakibat $(a, b, c) \rightarrow (a, b, c \otimes ab) \rightarrow (a, b, c)$ sehingga gerbang Toffoli merupakan sebuah gerbang *reversible* karena mempunyai *inverse* yaitu, dirinya sendiri. Gambar 1.17 menunjukkan tabel kebenaran dan rangkaian representasi dari gerbang Toffoli.

Gerbang Toffoli dapat digunakan untuk menyimulasikan gerbang-gerbang NAND seperti ditunjukkan pada Gambar 1.18, dan juga dapat digunakan untuk melakukan FANOUT seperti tampak di Gambar 1.19. Dengan kedua operasi ini dimungkinkan untuk menyimulasikan semua elemen dalam sebuah rangkaian klasik, dan artinya sembarang rangkaian klasik dapat disimulasikan dengan sebuah rangkaian *reversible* padanannya.



Gambar 1.17 Kebenaran gerbang Toffoli, dan rangkaian representasinya

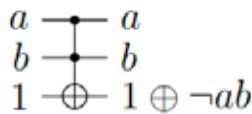
Gerbang Toffoli telah digambarkan sebagai sebuah gerbang klasik, tetapi ia juga dapat diwujudkan sebagai sebuah gerbang logika

kuantum. Berdasar definisinya, penerapan logika kuantum dari gerbang Toffoli dapat dilakukan secara sederhana melalui permutasi keadaan-keadaan basis komputasional sebagaimana halnya gerbang Toffoli klasik. Sebagai contoh, gerbang Toffoli kuantum bekerja pada keadaan $|110\rangle$ membalik qubit ketiga karena kedua qubit pertama di set untuk itu dan menghasilkan keadaan $|111\rangle$. Tentu ini juga dapat ditunjukkan dengan menggunakan matriks transformasi U yang dalam hal ini berupa matriks 8×8 , sekaligus menunjukkan bahwa U adalah sebuah matriks unitary, artinya gerbang Toffoli merupakan sebuah gerbang kuantum yang sah.

$$U = \mathbb{I} \otimes U_{CN} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

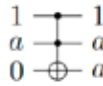
Tampak dengan jelas bahwa U adalah *unitary* karena $U^\dagger U = \mathbb{I}$.

Bit-bit *ancilla* adalah sejumlah bit ekstra yang digunakan untuk mencapai sejumlah tujuan komputasi (misal komputasi *reversible*). Di komputasi klasik, setiap bit memori dapat dihidup-matikan kapan saja, tanpa memerlukan sejumlah persyaratan. Namun hal seperti ini tidak mungkin dilakukan di komputasi kuantum atau komputasi *reversible* klasik. Di model-model komputasi seperti ini, semua operasi pada memori komputer harus *reversible*, dan memindahkan hidup-mati sebuah bit akan menyebabkan hilangnya informasi nilai awal



Gambar 1.18 Rangkaian klasik untuk menerapkan gerbang NAND menggunakan sebuah gerbang Toffoli

Dua bit teratas menyatakan *input* dari NAND, sedangkan bit ketiga disiapkan dalam keadaan standar 1, yang sering disebut sebagai sebuah keadaan *ancilla*. *Output* dari rangkaian NAND ini disediakan pada bit ketiga.



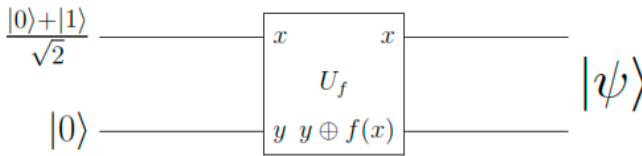
Gambar 1.19 FANOUT menggunakan gerbang Toffoli

di mana bit kedua menjadi *input* dari FANOUT (dan kedua yang lain adalah bit standar keadaan-keadaan ancilla), dan *output* dari FANOUT muncul pada bit kedua dan ketiga dari bit itu. Dikarenakan alasan inilah, pada sebuah algoritma kuantum tidak tersedia cara untuk secara deterministik menempatkan bit dalam suatu keadaan kecuali jika diberi akses ke bit-bit yang keadaan awalnya telah diketahui. Bit-bit seperti itu, yang telah diketahui nilainya secara *a-priori*, dikenal dengan nama bit *ancilla* dalam komputasi kuantum atau komputasi reversibel. Contoh sederhana bit ancilla adalah yang digunakan untuk menyederhanakan gerbang-gerbang kuantum yang rumit; misalnya, bit ancilla digunakan di gerbang Toffoli sehingga dapat digunakan sebagai gerbang CNOT atau gerbang NOT. Konsep bit ancilla ini dapat diperluas untuk komputasi kuantum dengan terminologi qubit-qubit ancilla, yang dapat digunakan misalnya untuk koreksi kesalahan kuantum (*quantum error correction*).

Gerbang Toffoli dapat digunakan untuk simulasi gerbang-gerbang logika klasik *irreversible*, sebagaimana halnya gerbang Toffoli klasik, dan menjamin komputer kuantum dapat melakukan semua jenis komputasi yang dapat dilakukan oleh komputer klasik (deterministik). Bagaimana jika komputer klasik itu non-deterministik, artinya mempunyai kemampuan membangkitkan bit-bit acak yang dapat digunakan dalam komputasinya? Tentu tidak lagi mengherankan jika komputer kuantum dapat juga untuk mensimulasikan hal ini. Untuk melakukan simulasi seperti itu ternyata cukup dengan membangkitkan koin secara acak, yang dapat dilakukan dengan menyiapkan sebuah qubit dalam keadaan $|0\rangle$ kemudian kirimkan ke gerbang Hadamard sehingga dihasilkan $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, dan kemudian ukur keadaannya. Hasilnya adalah keadaan $|0\rangle$ atau $|1\rangle$ dengan probabilitas 50/50. Fakta ini memungkinkan sebuah komputer kuantum berkemampuan untuk secara efisien mensimulasikan sebuah komputer klasik non-deterministik.

Tentu saja jika kemampuan menyimulasikan komputer klasik itu hanya merupakan satu-satunya fitur komputer kuantum maka kita

tidak perlu bersusah payah mengeksplorasi efek kuantum. Keunggulan komputasi kuantum adalah bahwa banyak sekali fungsi-fungsi canggih yang dapat dihitung dengan menggunakan gerbang-gerbang dan qubit-qubit kuantum.



Gambar 1.20 Rangkaian kuantum untuk menghitung $f(0)$ dan $f(1)$ secara simultan

U_f adalah rangkaian kuantum yang mengolah masukan $|x, y\rangle$ menjadi keluaran $|x, y \otimes f(x)\rangle$.

1.16.2 Skema Paralelisme

Parallelisme Kuantum merupakan sebuah fitur fundamental dari banyak algoritma kuantum. Komputer kuantum memungkinkan untuk mengevaluasi sebuah fungsi $f(x)$ untuk berbagai harga x secara simultan. Pada bab ini akan dibahas bagaimana paralelisme kuantum bekerja, dan sejumlah keterbatasannya.

Misal $f(x): \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$ adalah sebuah fungsi dengan sebuah wilayah dan jelajah satu-bit. Sebuah cara untuk menghitung fungsi ini pada sebuah komputer kuantum adalah dengan komputer kuantum dua qubit yang berkeadaan awal $|x, y\rangle$. Melalui urutan gerbang-gerbang logika yang tepat, terbuka kemungkinan melakukan transformasi keadaan ini menjadi $|x, y \otimes f(x)\rangle$, di mana $\otimes$ adalah penjumlahan modulo 2; register pertama disebut register data, dan register kedua disebut register target. Transformasi yang didefinisikan melalui peta $|x, y\rangle \rightarrow |x, y \otimes f(x)\rangle$ disimbolkan dengan U_f yang dengan mudah dibuktikan sebagai unitary. Jika $y = 0$, maka keadaan final dari qubit kedua adalah nilai dari $f(x)$.

Perhatikanlah Gambar 1.20 di mana U_f menerima *input* superposisi $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, yang dapat diperoleh dari gerbang Hadamard yang menerima masukan $|0\rangle$. *Output* dari U_f ini adalah

$$\frac{|0, f(0)\rangle + |1, f(1)\rangle}{\sqrt{2}} \quad (60)$$

Keadaan yang dihasilkan sangat menarik untuk dikomentari. Suku-suku dari keadaan ini berisi informasi $f(0)$ dan $f(1)$; hasil ini seolah-olah kita telah menghitung $f(x)$ untuk dua buah harga x secara simultan, sebuah fitur yang dikenal sebagai paralelisme kuantum. Berbeda halnya dengan paralelisme klasik, di mana sejumlah rangkaian yang masing-masingnya dibuat untuk menghitung $f(x)$ untuk sebuah harga x yang dieksekusi secara simultan; sedangkan di sini sebuah rangkaian $f(x)$ tunggal yang digunakan menghitung fungsi itu untuk berbagai harga x secara simultan dengan cara mengeksploitasi kemampuan sebuah komputer kuantum berada pada berbagai keadaan superposisi.

$$\begin{bmatrix} |0\rangle \\ |0\rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$$

Gambar 1.21 Transformasi Hadamard $H \otimes^2$ pada dua qubit

Prosedur ini dapat dengan mudah di generalisir untuk fungsi-fungsi pada sembarang jumlah bit melalui suatu operasi yang dikenal sebagai transformasi Hadamard, atau kadang-kadang juga disebut sebagai transformasi Hadamard-Walsh. Operasi ini tidak lain adalah n buah gerbang Hadamard parallel yang menerima masukan n qubit. Sebagai contoh perhatikanlah Gambar 1.21 untuk kasus $n = 2$ dengan qubit yang awalnya adalah $|0\rangle$ sehingga sebagai *output* diperoleh

$$\left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right) = \frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2} \quad (61)$$

di sini digunakan simbol $H^{\otimes 2}$ untuk menyatakan aksi parallel dua buah gerbang Hadamard, simbol $\otimes$ dibaca sebagai 'tensor'. Hasil kerja transformasi Hadamard pada n qubit yang semuanya berawal pada keadaan $|0\rangle$ adalah

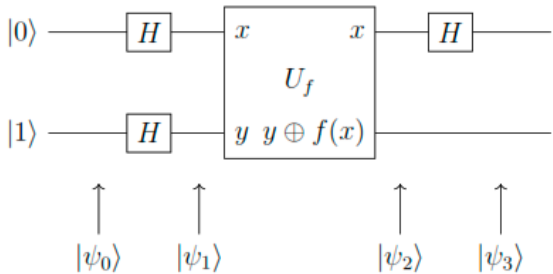
$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_x |x\rangle \quad (62)$$

di mana penjumlahan dilakukan untuk semua kemungkinan harga-harga x , dan aksi ini disimbolkan dengan $H \otimes^2$. Artinya, transformasi Hadamard menghasilkan superposisi setara untuk semua keadaan-

keadaan basis komputasional. Lebih dari itu, semuanya itu dilakukan dengan sangat efisien, menghasilkan suatu superposisi 2^n keadaan hanya menggunakan n buah gerbang saja. Menghitung secara parallel kuantum sebuah fungsi dengan *input* n bit dan *output* 1-bit, yaitu $f(x)$ dapat dilakukan sebagai berikut ini. Siapkan keadaan $n + 1$ qubit $|0\rangle \otimes^n |1\rangle$, kemudian gunakan transformasi Hadamard pada n qubit pertama, selanjutnya gunakan rangkaian kuantum penerapan U_f . Hasil yang akan diperoleh adalah

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_x |x\rangle |f(x)\rangle \tag{63}$$

Dalam arti luas, paralelisasi kuantum memungkinkan untuk menghitung harga-harga $f(x)$ secara simultan, meskipun hanya cukup dengan sekali menghitungnya. Meskipun demikian, paralelisme ini tidak langsung dapat dimanfaatkan. Sebagai contoh untuk kasus qubit tunggal, pengukuran keadaan hanya akan memberi hasil salah satu dari $|0, f(0)\rangle$ atau $|1, f(1)\rangle$. Demikian pula untuk kasus yang lebih umum, pengukuran keadaan $\sum_x |x, f(x)\rangle$ hanya akan memberi hasil $f(x)$ untuk sebuah harga tunggal x . Sudah barang tentu komputer klasik juga dapat melakukan hal ini. Komputasi kuantum memerlukan sesuatu yang lebih dari sekedar paralelisme agar bermanfaat; ia harus mampu mengekstrak informasi lebih dari sekedar nilai $f(x)$ dari keadaan-keadaan superposisi seperti $\sum_x |x, f(x)\rangle$. Kita akan mengurai masalah ini pada bab berikutnya.



Gambar 1.22 Rangkaian kuantum untuk menghitung $f(0)$ dan $f(1)$ secara simultan

U_f adalah rangkaian kuantum yang mengolah masukan $|x, y\rangle$ menjadi keluaran $|x, y \oplus f(x)\rangle$.

1.16.3 Algoritma Deutsch

Algoritma Deutsch merupakan contoh yang sederhana, tetapi sangat bagus untuk memberi gambaran tentang kelebihan algoritma kuantum dibanding algoritma klasikal. Problemanya adalah menentukan karakteristik sebuah fungsi f berdasarkan luaran (*output*) akibat suatu masukan (*input*). Khususnya, masukan berupa salah satu dari 0 atau 1, dan demikian pula luarannya, 0 atau 1. Jadi ada empat kemungkinan hubungan antara masukan dan luaran pada f , yaitu

$$f(0) \rightarrow 0. \quad f(0) \rightarrow 1. \quad f(1) \rightarrow 0. \quad f(1) \rightarrow 1$$

Dengan demikian berdasarkan keempat kemungkinan itu ada dua karakteristik f , yaitu seimbang atau konstan. Karakteristik seimbang artinya luaran dari f adalah separuh 0 dan separuh 1, yaitu $f(0) \rightarrow 1$ $f(1) \rightarrow 0$. Sedangkan karakteristik konstan artinya apapun masukannya, luarannya berharga tetap, atau $f(0) \rightarrow 1$ $f(1) \rightarrow 1$. Jadi anggap f sebagai kotak hitam misterius, persoalannya adalah berapa kali tes yang diperlukan agar diketahui bahwa f adalah seimbang atau konstan? Secara klasikal, diperlukan minimal dua kali tes agar diketahui dengan pasti karakteristik f . Misal, kita beri masukan 0 dan diperoleh luaran 1 atau $f(0) \rightarrow 1$. Ini tentu belum cukup untuk dapat mengetahui karakteristik f . Diperlukan sekali lagi tes dengan memberi masukan 1, barulah dapat diketahui dengan pasti karakteristik dari kotak hitam f tersebut. Mungkinkah cukup dilakukan sekali pengukuran (tes) agar diketahui dengan pasti karakteristik f tersebut? Secara klasikal jawabannya adalah tidak mungkin! Bagaimana jika pengujian dilakukan secara kuantum?

Melalui modifikasi sederhana rangkaian di Gambar 1.20 terlihat bagaimana rangkaian kuantum jauh melampaui kinerja rangkaian klasik. Hal ini dilakukan dengan cara menerapkan algoritma Deutsch yang menggabungkan paralelisme kuantum dengan salah satu sifat mekanika kuantum yang dikenal sebagai interferensi. Sebagaimana sebelumnya, kita gunakan lagi gerbang Hadamard untuk menyiapkan qubit pertama berupa superposisi $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, tetapi sekarang juga menyiapkan qubit kedua y sebagai superposisi $(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ menggunakan sebuah gerbang Hadamard pada keadaan $|1\rangle$.

Rangkaian ini ditunjukkan oleh Gambar 1.22 di mana keadaan *input* diberikan oleh

$$|\psi_0\rangle = |01\rangle = |0\rangle|1\rangle \quad (64)$$

dan melewati dua gerbang Hadamard sehingga menghasilkan

$$|\psi_1\rangle = \left[\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \quad (65)$$

Jika digunakan U_f pada keadaan $(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$, maka akan diperoleh keadaan $(-1)^{f(x)}|x\rangle$ $|0\rangle - |1\rangle/\sqrt{2}$. Oleh karena itu menggunakan U_f untuk $|\psi_1\rangle$ akan menghasilkan salah satu dari dua kemungkinan

$$|\psi_2\rangle = \begin{cases} \pm \left[\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{jika } f(0) = f(1) \\ \pm \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{jika } f(0) \neq f(1) \end{cases} \quad (66)$$

Dengan demikian maka gerbang Hadamard akhir pada qubit pertama akan menghasilkan

$$|\psi_3\rangle = \begin{cases} \pm |0\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{jika } f(0) = f(1) \\ \pm |1\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{jika } f(0) \neq f(1) \end{cases} \quad (67)$$

Menyadari bahwa $f(0) \otimes f(1)$ sama dengan 0 jika $f(0) = f(1)$, dan sama dengan 1 jika tidak demikian halnya, maka persamaan (67) dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih kompak sehingga dengan mengukur qubit pertama dapat ditentukan $f(0) \otimes f(1)$. Hal ini sangat mencengangkan: rangkaian kuantum telah mengungkapkan kemampuannya untuk menentukan sifat global dari $f(x)$ yaitu $f(0) \otimes f(1)$ hanya dengan sekali menghitung $f(x)$. Jelas ini lebih cepat dibanding perangkat klasik yang sekurang-kurangnya memerlukan dua kali pengukuran.

$$|\psi_3\rangle = \pm |f(0) \oplus f(1)\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right], \quad (68)$$

Contoh ini telah menyoroti perbedaan antara paralelisme kuantum dan algoritma acak klasik. Sering kali seseorang secara naif beranggapan bahwa keadaan $|0\rangle|f(0)\rangle + |1\rangle|f(1)\rangle$ mirip benar dengan komputer klasik probabilistik yang menghitung $f(0)$ dengan probabilitas setengah, atau $f(1)$ dengan probabilitas setengah. Perbedaannya adalah bahwa dalam komputer klasik kedua alternatif itu sepenuhnya tidak beririsan, terpisah satu sama lain; dalam komputer kuantum kedua alternatif itu dimungkinkan untuk berinterferensi satu sama lain untuk menghasilkan sejumlah sifat global dari fungsi f , misal menggunakan gerbang Hadamard menghasilkan suatu rekombinasi alternatif lain sebagaimana telah ditunjukkan oleh algoritma Deutsch. Esensi rancang bangun algoritma kuantum adalah memilih secara cerdas fungsi dan transformasi final yang memungkinkan ditentukannya secara efisien informasi global yang bermanfaat dari fungsi tersebut - suatu informasi yang tidak dapat dengan cepat diperoleh via komputasi klasikal.

1.16.4 Analisis Rinci Algoritma Deutsch

Perhatikan kembali Gambar 1.22. Cukup banyak alasan untuk menjelaskan bahwa $f(x)$ tidak dapat digunakan untuk menangani sebuah qubit. Cukuplah argumentasi matematis di bawah ini menjelaskan hal tersebut. Jika $f(x)$ digunakan untuk menangani sebuah keadaan kuantum yang merupakan superposisi dari keadaan basis standar maka akan diperoleh

$$f\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)\right) \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |1\rangle) = \frac{2}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad \text{bukan operator uniter}$$

Jadi, $f(x)$ merupakan suatu fungsi klasikal murni yang hanya dapat beroperasi pada bit klasikal. Oleh karena itu perlu didefinisikan sebuah operator kuantum g yang melibatkan $f(x)$ sedemikian rupa sehingga tetap memenuhi syarat uniteritas. Cara yang terbaik untuk tujuan ini adalah operasi sebagai berikut

$$g|q_1\rangle|q_2\rangle \longrightarrow |q_1\rangle|q_2 \oplus f(q_1)\rangle$$

Sebagai contoh, kita mulai dengan kasus $f(0,1) \rightarrow (0,1)$, artinya untuk $f(0) \rightarrow 0$ dan $f(1) \rightarrow 1$ sehingga diperoleh

$$g\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + |01\rangle)\right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|11\rangle + |01\rangle)$$
$$g(|10\rangle) = g(|1\rangle|0\rangle) \rightarrow |1\rangle|0 \oplus f(1)\rangle = |11\rangle$$

Dari manakah asal-usul $\otimes$ atau mengapa harus ada $\otimes$? Ini merupakan salah satu cara menangani problema klasikal menggunakan algoritma kuantum. Kadang diperlukan cara baru untuk menghampiri problemnya. Dengan operator $\otimes$ ini kita dapat melibatkan f dengan tetap menjaga atau memenuhi syarat uniteritas. Bahkan lebih penting dari itu, dengan menggunakan g sebagaimana definisinya serta jenis dari fungsi f itu dapat diperoleh luaran yang unik. Hasil dari g untuk berbagai harga f dapat dilihat di Tabel 1.4.

Tabel 1.4 Luaran dari g untuk berbagai harga masukan dan karakteristik f

Seimbang		Konstan	
$f(0,1) \rightarrow (0,1)$	$f(0,1) \rightarrow (1,0)$	$f(0,1) \rightarrow 0$	$f(0,1) \rightarrow 1$
$g(00\rangle) \rightarrow 00\rangle$	$g(00\rangle) \rightarrow 01\rangle$	$g(00\rangle) \rightarrow 00\rangle$	$g(00\rangle) \rightarrow 01\rangle$
$g(01\rangle) \rightarrow 01\rangle$	$g(01\rangle) \rightarrow 00\rangle$	$g(01\rangle) \rightarrow 01\rangle$	$g(01\rangle) \rightarrow 00\rangle$
$g(10\rangle) \rightarrow 11\rangle$	$g(10\rangle) \rightarrow 10\rangle$	$g(10\rangle) \rightarrow 10\rangle$	$g(10\rangle) \rightarrow 11\rangle$
$g(11\rangle) \rightarrow 10\rangle$	$g(11\rangle) \rightarrow 11\rangle$	$g(11\rangle) \rightarrow 11\rangle$	$g(11\rangle) \rightarrow 10\rangle$

Apa makna dari angka-angka dalam Tabel 1.4 Sebagaimana halnya klasikal f dapat memetakan bit-bit $(0,1)$ pada satu dari empat kemungkinan, operator g dapat memetakan keadaan dua qubit pada salah satu dari empat keadaan akhirnya. Juga sebagaimana halnya pada kasus klasikal, jika hanya menggunakan sebuah keadaan sebagai *input*, kita tidak akan dapat menentukan karakteristik f . Misal jika hanya menggunakan keadaan $|00\rangle$ sebagai *input* maka akan diperoleh salah satu dari dua hasil: $|00\rangle$ atau $|01\rangle$. Berdasarkan hasil ini, kita telah mengeliminasi dua dari empat kemungkinan, namun masih tetap mempunyai dua kemungkinan untuk f . Bagaimana jika masukannya berupa keadaan superposisi mengingat di sinilah keunggulan penggunaan qubit dibanding menggunakan bit!

Misal untuk kasus $f(0,1) \rightarrow (1,0)$, perhatikan luaran g untuk masukan berupa superposisi seperti di bawah ini

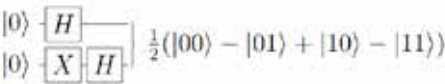
$$g\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)\right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

Jika kita perhatikan luaran ini dan dibandingkan dengan luaran untuk f lainnya maka luaran-luaran itu unik, berbeda satu dengan lainnya. Jadi jika kita dapat membaca luarannya maka secara otomatis kita tahu karakteristik f . Namun sayangnya kita tidak dapat melihat luaran itu secara lengkap, pengukuran hanya menghasilkan dua kemungkinan yaitu

$$g\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)\right) \rightarrow |01\rangle \quad \text{atau} \quad g\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)\right) \rightarrow |10\rangle$$

Ada dua problematika di sini: 1) Secara sendirian, kedua hasil pengukuran itu tidak konklusif untuk dapat digunakan memutuskan karakteristik f . Bahkan jika salah satu hasil pengukuran itu dapat digunakan untuk memutuskan karakteristik f namun peluangnya hanya 50% untuk mendapatkan hasil pengukuran itu. Tidak perlu khawatir, kita masih dapat menggunakan masukan lainnya untuk melakukan tes yang diperlukan.

Misal kita gunakan masukan berupa

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$$


Gambar 1.23 Penyiapan masukan untuk algoritma Deutsch

yang dapat diperoleh dengan menggunakan rangkaian kuantum seperti di Gambar 1.23. Luaran dari $g(|\psi\rangle)$ untuk empat karakteristik f dapat dilihat di Tabel 1.5.

Tabel 1.5 Luaran dari $g(|\psi\rangle)$

$g(\psi\rangle)$		
Seimbang	$f(0,1) \rightarrow (0,1)$	$\frac{1}{2}(00\rangle - 01\rangle - 10\rangle + 11\rangle)$
	$f(0,1) \rightarrow (1,0)$	$-\frac{1}{2}(00\rangle - 01\rangle - 10\rangle + 11\rangle)$
Konstan	$f(0,1) \rightarrow 0$	$\frac{1}{2}(00\rangle - 01\rangle + 10\rangle - 11\rangle)$
	$f(0,1) \rightarrow 1$	$-\frac{1}{2}(00\rangle - 01\rangle + 10\rangle - 11\rangle)$

Dengan $|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ untuk keempat kemungkinan karakteristik

Kini, dengan memperhatikan luarannya, mulai tampak hal yang menarik. Luaran untuk kedua f seimbang sama, hanya berbeda fasanya saja. Demikian pula luaran untuk kedua f konstan, luarannya sama, hanya berbeda fasanya saja. Hal tersebut hanya terlihat jika kita melihat fungsi gelombang luarannya, tetapi pengukuran hanya dapat memberikan informasi yang sama untuk semuanya dengan peluang yang sama pula. Jadi belum dapat digunakan untuk menentukan karakteristik f melalui sebuah saja pengukuran atau tes. Apa yang perlu kita lakukan?

Operasikan gerbang Hadamard pada kedua qubit luaran adalah salah satu pilihan cerdas. Kita coba lihat apa luaran yang akan diperoleh setelah gerbang Hadamard digunakan di tahap ini. Hasil akhir luaran setelah dioperasikan gerbang Hadamard H_4 terlihat di Tabel 1.5.

Dari Tabel 1.6 dapat dilihat bahwa jika qubit pertama adalah $|1\rangle$ maka karakteristik f adalah seimbang, sedangkan jika qubit pertama adalah $|0\rangle$ maka karakteristik f adalah konstan. Jadi algoritma ini telah berhasil dalam mengidentifikasi karakteristik f hanya dengan sekali pengukuran saja. Pengukuran itu dilakukan cukup terhadap qubit pertama saja. Ini juga berarti bahwa kita akan mendapatkan hasil yang sama jika gerbang Hadamard cukup dilakukan pada qubit pertama saja setelah melalui g . Atau dengan kata lain, tidak digunakan H_4 namun cukup $H \otimes I$ terhadap luaran setelah g . Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.7.

Tabel 1.6 Luaran dari $H_4(g(|\psi\rangle))$ dengan $|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ untuk ke-empat kemungkinan karakteristik f

$H_4(g(\psi\rangle))$		
Seimbang	$f(0,1) \rightarrow (0,1)$	$ 11\rangle$
	$f(0,1) \rightarrow (1,0)$	$- 11\rangle$
Konstan	$f(0,1) \rightarrow 0$	$ 01\rangle$
	$f(0,1) \rightarrow 1$	$- 01\rangle$

Tabel 1.7 Luaran dari $([H \otimes \mathbb{I}](g(|\psi\rangle)))$ dengan $|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ untuk keempat kemungkinan karakteristik f

$[H \otimes \mathbb{I}](g(\psi\rangle))$		
Seimbang	$f(0, 1) \rightarrow (0, 1)$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(10\rangle - 11\rangle)$
	$f(0, 1) \rightarrow (1, 0)$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}(10\rangle - 11\rangle)$
Konstan	$f(0, 1) \rightarrow 0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(00\rangle - 01\rangle)$
	$f(0, 1) \rightarrow 1$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}(00\rangle - 01\rangle)$

Hasil dari skema ini, yang ditunjukkan di Tabel 1.7 ekivalen dengan persamaan (67). Rangkaian kuantum untuk skema ini seperti yang ditunjukkan di Gambar 1.20. Jadi cukup dengan melakukan pengukuran satu kali terhadap luaran qubit pertama sudah dapat diketahui karakteristik dari f . Secara singkat algoritma Deutsch dapat diringkaskan dengan:

siapkan $|01\rangle \rightarrow H_4|01\rangle \rightarrow g(|\psi\rangle) \rightarrow [H \otimes \mathbb{I}]|\psi_{\text{out}}\rangle \rightarrow \text{ukur qubit 0}$

Seperti dapat dilihat, hasil pengukuran pada qubit 0 (qubit pertama) akan dapat dengan sempurna menentukan karakteristik f . Bahkan, karena kita tidak perlu peduli dengan qubit 1 (qubit kedua), sebenarnya kita cukup menggunakan sebuah transformasi Hadamard, yaitu pada qubit 0 setelah melewati g . Ini akan menghasilkan qubit 0 menjadi $|0\rangle$ atau $|1\rangle$, sementara itu qubit 1 (qubit kedua) tetap berada dalam keadaan superposisi.

1.16.5 Peran Gerbang Hadamard

Jika g kita abaikan, perhatikanlah efek gerbang Hadamard H_4 dalam algoritma Deutsch seperti terlihat di rangkaian proses sebagai berikut:

$$H_4|01\rangle \rightarrow |\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) \rightarrow H_4|\psi\rangle \rightarrow |01\rangle$$

Ternyata, jika f berkarakteristik konstan, maka proses ini pada dasarnya sudah lengkap. Artinya, efek g adalah membiarkan

keadaan itu tetap (tidak berubah) untuk $f \rightarrow 0$, atau berubah fasanya menjadi negatif untuk $f \rightarrow 1$. Jadi untuk kedua kasus f konstan itu, efek transformasi Hadamard H_4 yang kedua adalah mengembalikan ke keadaan $|01\rangle$ atau $-|01\rangle$. Jadi penggunaan H_4 dua kali akan membawa ke keadaan semula.

Bagaimana untuk kasus f seimbang? Efek g ternyata adalah memindahkan tanda negatif ke pasangan keadaan yang lainnya. Hal ini dapat dilihat dengan jelas di Tabel 1.5. Ini juga berlaku untuk kasus f konstan. Pengamatan yang lebih teliti menunjukkan bahwa untuk kasus f seimbang, pasangan keadaan $|00\rangle$ & $|11\rangle$ selalu mempunyai polaritas fasa yang sama, demikian juga pasangan $|01\rangle$ & $|10\rangle$. Sedangkan untuk kasus f konstan pasangan dengan polaritas fasa yang sama adalah $|00\rangle$ & $|10\rangle$, serta pasangan $|01\rangle$ & $|11\rangle$. Transformasi Hadamard memetakan keempat keadaan dua qubit keempat keadaan superposisi yang unik dan orthogonal. Efek g adalah selalu memetakan kembali ke $|01\rangle$ untuk f konstan, dan memetakan kembali ke $|11\rangle$ untuk f seimbang (lihat Tabel 1.6).

1.16.6 Menentukan Oracle g

Sebagai langkah awal dalam membangun g , kita tengok kembali empat kemungkinan operator g dalam bentuk matriks dengan basisnya adalah vektor

$$\begin{bmatrix} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{bmatrix} \quad (69)$$

Perhatikan kembali Tabel 1.4. Dengan basis seperti yang diberikan oleh persamaan 69 maka matriks g untuk setiap karakteristik g ditunjukkan di Tabel 1.8.

Matriks ketiga, untuk $f(0,1) \rightarrow 0$, adalah yang paling mudah dikenali, yaitu matriks identitas bagi dua qubit, atau $I \otimes I = I_2$. Matriks ketiga, untuk $f(0,1) \rightarrow (0,1)$, juga mudah dikenali, yaitu matriks gerbang CNOT. Bagaimana menjelaskan hasil-hasil ini?

Kasus $f(0; 1) \rightarrow 0$ merupakan kasus termudah untuk dipahami. Karena semuanya dipetakan ke 0; dan operator g merupakan penjumlahan modulo 2: $|q1 \otimes 0\rangle$; maka semua keadaan tidak diubah

alias tetap. Untuk ketiga matriks yang lain, semuanya mempunyai pola yang sama: bergantung pada masukan yang harus dipetakan ke 1. Perlu diingat bahwa g hanya akan berdampak pada qubit kedua; artinya, matriks-matriks tersebut tidak boleh mengubah qubit pertama. Ini terlihat dengan jelas di Tabel 1.4. Lebih mendalam, terlihat bahwa menambahkan $\otimes 1$ pada sebuah qubit ekuivalen dengan menggunakan sebuah gerbang X ; dan penambahan $\otimes 0$ ekuivalen dengan tanpa melakukan apapun (atau menggunakan sebuah gerbang I). Atau, itu semua dapat diartikan bahwa transformasi yang diijinkan hanyalah: $|00\rangle \xrightarrow{\quad} |01\rangle$ dan $|10\rangle \xrightarrow{\quad} |11\rangle$. Apa yang dapat disimpulkan tentang sifat g berdasarkan Tabel 1.4 dan Tabel 1.8.

Tabel 1.8 Matriks g dalam basis yang diberikan oleh persamaan 69 untuk keempat karakteristik f

Matriks g untuk keempat karakteristik f			
Seimbang		Konstan	
$f(0,1) \rightarrow (0,1)$	$f(0,1) \rightarrow (1,0)$	$f(0,1) \rightarrow 0$	$f(0,1) \rightarrow 1$
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Kita lihat terlebih dahulu kasus seimbang $f(0;1) \rightarrow (0;1)$ di Tabel 1.4. Efek g terhadap qubit kedua berkaitan erat dengan qubit pertama (yang tidak berubah). Qubit kedua akan tetap jika qubit pertama adalah $|0\rangle$, dan qubit kedua akan berubah jika qubit pertama adalah $|1\rangle$. Jadi efek g adalah ekuivalen dengan efek gerbang CNOT, tetapi dengan qubit pengendalinya adalah $|0\rangle$. Matriks terkait dengan $f(0;1) \rightarrow 0$ juga dalam sepiintas saja dapat dilihat merupakan matriks identitas I . Bagaimana matriks transformasi terkait dengan $f(0;1) \rightarrow 1$? Perhatikan Tabel 1.4, qubit pertama selalu tetap namun qubit kedua semuanya berubah. Gerbang yang mempunyai sifat mengubah (membalik) qubit adalah gerbang X ; namun hanya untuk qubit kedua. Juga untuk sistem keseluruhan mempunyai representasi matriks 4×4 ; dengan qubit pertama tidak berubah. Maka wajar jika representasinya adalah $I \otimes X$; persis seperti terlihat di Tabel 1.8. Tentu, pada saat menulis koding, yang ditampilkan hanya gerbang X pada qubit kedua, dan bukan $I \otimes X$.

Terakhir, mengkonstruksi $f(0; 1) \rightarrow (0; 1)$. Perhatikan Tabel 1.4 kembali. Mirip gerbang CNOT hanya qubit kendalinya adalah $|0\rangle$, bukan $|1\rangle$. Dikarenakan gerbang seperti ini tidak tersedia maka harus dibangun terlebih dahulu. Untuk hal ini, kita akan menggunakan gerbang CNOT plus gerbang X untuk mengubah qubit 0 agar dapat menjadi qubit kendali. Hasilnya berupa rangkaian kuantum seperti ditunjukkan pada Gambar 1.24. Sampai disini, secara formal telah diselesaikan dengan rinci tentang algoritma Deutsch. Meskipun algoritma ini hanyalah sebuah proses satu tahap namun algoritma Deutsch merupakan satu tahapan yang amat penting untuk dapat memahami bagaimana algoritma kuantum dapat mengalahkan algoritma klasikal dalam menyelesaikan sebuah persoalan yang sama, dan juga di sini melibatkan trik matematika yang pelik. Jadi dapat dilihat di sini dengan sangat jelas bahwa untuk algoritma yang nampak sederhana ini banyak hal yang sesungguhnya terjadi. Hal seperti ini akan banyak digunakan atau ditemui dalam komputasi kuantum. Oleh karena itu memahami dengan baik algoritma yang sangat sederhana serta implementasi rangkaian kuantumnya menjadi amat penting.



Gambar 1.24 Kiri: rangkaian kuantum ekuivalen dengan g untuk kasus $f(0,1) \rightarrow (0,1)$. Kanan: rangkaian kuantum algoritma Deutsch untuk $f(0,1) \rightarrow (0,1)$.

1.16.7 Algoritma Deutsch-Jozsa

Sesuai dengan namanya, algoritma ini sangat erat hubungannya dengan algoritma Deutsch yang telah kita pelajari sebelumnya. Perbedaannya terletak pada f yang harus dipetakan pada 0 atau 1. Di sini f merupakan sebuah barisan bit yang diberi label $x_0, x_1, \dots, x_n$ di mana setiap x_i adalah 0 atau 1. Jadi f memetakan barisan ini menjadi 0 atau 1, atau dituliskan sebagai

$$f(\{x_0, x_1, x_2, \dots\}) \longrightarrow 0 \text{ atau } 1 \quad (70)$$

Untuk suatu barisan yang terdiri atas n bit akan terdapat sebanyak 2^n kombinasi. Meskipun demikian, hanya ada dua

kemungkinan untuk f , yaitu seimbang atau konstan, persis seperti algoritma Deutsch. Jadi, f konstan akan memberikan semuanya 0 atau 1 untuk setiap masukan; f seimbang bila memberikan separuh 0 dan separuh 1 untuk seluruh masukan. Sebagai contoh dari sebuah kemungkinan pemetaan barisan tiga buah bit dapat dilihat di Tabel 1.9. Kita dapat juga menuliskan barisan bit dengan menggunakan angka dalam basis puluhan dan hasilnya dapat dilihat di Tabel 1.10. Dengan demikian tampak dengan jelas bahwa secara sendiri-sendiri bit-bit dalam barisan itu tidak mempunyai makna bagi f . Hanya bit-bit sebagai barisan yang akan memengaruhi kerja atau operasi dari f . Dari Tabel 1.9 juga cukup jelas bahwa untuk f seimbang, jumlah luaran 0 dan 1 sama banyaknya, yaitu masing-masing sebanyak 4 untuk kasus $n = 3$. Atau dengan kata lain, jika f benar-benar merupakan fungsi acak seimbang maka masukan barisan yang terdiri atas n bit akan mempunyai variasi sebanyak $2^n! / (2^{n-1}!)$. Jadi, tidak mungkin tersedia cara yang mudah untuk memahami f dengan mempelajari kecenderungan individu bit-bit tersebut. Bahkan kita dapat menuliskan barisan bit itu kedalam bilangan puluhan sehingga diperoleh Tabel 1.10. *Set-up* untuk kasus ini diharapkan cukup jelas, termasuk bedanya dengan algoritma Deutsch juga cukup jelas. Problemanya dengan demikian adalah: seberapa cepat kita dapat menentukan apakah f adalah konstan atau seimbang.

Tabel 1.9 Sebuah kemungkinan pemetaan f terhadap barisan tiga buah bit

Seimbang		Konstan	
$\{0, 0, 0\} \rightarrow 0$	$\{1, 0, 0\} \rightarrow 1$	$\{0, 0, 0\} \rightarrow 0$	$\{1, 0, 0\} \rightarrow 0$
$\{0, 0, 1\} \rightarrow 1$	$\{1, 0, 1\} \rightarrow 1$	$\{0, 0, 1\} \rightarrow 0$	$\{1, 0, 1\} \rightarrow 0$
$\{0, 1, 0\} \rightarrow 0$	$\{1, 1, 0\} \rightarrow 0$	$\{0, 1, 0\} \rightarrow 0$	$\{1, 1, 0\} \rightarrow 0$
$\{0, 1, 1\} \rightarrow 1$	$\{1, 1, 1\} \rightarrow 0$	$\{0, 1, 1\} \rightarrow 0$	$\{1, 1, 1\} \rightarrow 0$

Tabel 1.10 Penulisan yang berbeda untuk kasus yang sama dengan Tabel 9

Seimbang		Konstan	
$\{1\} \rightarrow 0$	$\{5\} \rightarrow 1$	$\{1\} \rightarrow 0$	$\{5\} \rightarrow 0$
$\{2\} \rightarrow 1$	$\{6\} \rightarrow 1$	$\{2\} \rightarrow 0$	$\{6\} \rightarrow 0$
$\{3\} \rightarrow 0$	$\{7\} \rightarrow 0$	$\{3\} \rightarrow 0$	$\{7\} \rightarrow 0$
$\{4\} \rightarrow 1$	$\{8\} \rightarrow 0$	$\{4\} \rightarrow 0$	$\{8\} \rightarrow 0$

1.16.8 Penyelesaian Klasikal

Secara klasikal, harus dicek untuk setiap kemungkinan barisan bit-bit, satu per satu agar dapat disimpulkan tipe f , konstan atau seimbang. Skenario terbaik yang memungkinkan untuk itu, diperoleh luaran yang berbeda untuk dua buah masukan, misalnya $\{0, 0, 0\} \rightarrow 0$ dan $\{1, 0, 0\} \rightarrow 1$. Kemudian diperoleh lagi dua luaran yang berbeda, maka dapat disimpulkan bahwa f adalah seimbang. Sebaliknya, jika diperoleh luaran yang sama, misal:

$$\{0, 0, 0\} \rightarrow 1, \{0, 0, 1\} \rightarrow 1, \{0, 1, 0\} \rightarrow 1, \{0, 1, 1\} \rightarrow 1, \dots$$

maka harus dicek tepat sebanyak $2^{n-1} + 1$ agar dapat disimpulkan bahwa f adalah konstan, yang berarti satu plus separuh dari jumlah total kombinasi. Untuk dapat melihat mengapa pengecekan perlu dilakukan sebanyak itu, misal untuk $n = 3$ telah dicek 4 dari 8 kemungkinan kombinasi masukan-luaran yang semuanya memberi luaran 0, tetapi ternyata luaran yang ke 5 adalah 1. Secara probabilistik hal ini bisa jadi merupakan peristiwa yang sangat jarang. Namun jika hal ini terjadi maka f pasti seimbang, tidak lagi konstan. Jadi, tidak ada cara lain kecuali harus dilakukan pengecekan sebanyak 2^{n-1} .

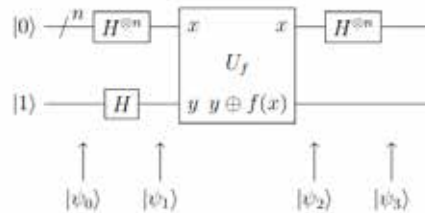
1.16.9 Penyelesaian Kuantum

Kita akan menyelesaikan problema ini 100% sempurna dengan hanya sekali saja melakukan pengukuran. Cara yang digunakan mirip dengan algoritma Deutsch. Berikut ini disandingkan algoritma Deutsch dan Deutsch-Jozsa:

$$\begin{aligned} \text{Deutsch :} & \text{siapkan } |01\rangle \rightarrow H_4|01\rangle \rightarrow g(|\psi\rangle) \rightarrow [H \otimes I]|\psi_{\text{out}}\rangle \rightarrow \text{ukur qubit 0} \\ \text{Deutsch-Jozsa :} & \text{siapkan } |0\rangle^{\otimes n}|1\rangle \rightarrow H^{\otimes(n+1)}|0\rangle^{\otimes n}|1\rangle \rightarrow g|\psi\rangle \rightarrow H^{\otimes(n+1)}|\psi\rangle \rightarrow \text{ukur qubit } |0\rangle^{\otimes n} \end{aligned}$$

di mana g adalah fungsi uniter yang mengandung fungsi f yang hendak ditentukan karakteristiknya, seimbang atau konstan. Tampak bahwa kedua algoritma ini identik. Perbedaannya hanya terletak pada penggunaan sebuah qubit tunggal yang berada di keadaan $|0\rangle$ pada Deutsch, sedangkan pada Deutsch-Jozsa digunakan $|0\rangle^{\otimes n}$. Perhatikan bahwa dalam algoritma Deutsch digunakan satu qubit bersama satu qubit ancilla, yaitu 1 pada keadaan $|1\rangle$. Di sini, algoritma Deutsch-

Jozsa, f menggunakan n bit dengan sebuah bit ancilla. Perhatikan Gambar 1.25.



Gambar 1.25 Rangkaian kuantum untuk mewujudkan algoritma Deutsch-Jozsa

Simbol $/^n$ merepresentasikan suatu himpunan n qubit. Kita akan membahas algoritma Deutsch-Jozsa secara garis besar dengan menggunakan Gambar 1.25. Keadaan masukan diberikan oleh

$$|\psi_0\rangle = |0\rangle^{\otimes n} |1\rangle \quad (71)$$

mirip dengan persamaan (64) namun bukan $|0\rangle|1\rangle$ melainkan $|0\rangle \otimes^n |1\rangle$. Artinya, register untuk pengecekan memberikan keadaan n qubit yang semuanya disiapkan dalam keadaan $|0\rangle$. Setelah melewati gerbang-gerbang Hadamard akan diperoleh keadaan

$$|\psi_1\rangle = \sum_{x \in \{0,1\}^n} \frac{|x\rangle}{\sqrt{2^n}} \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \quad (72)$$

Untuk penjumlahan x dengan $n = 2$ dapat diperoleh seperti diberikan oleh persamaan (61). Persamaan (72) menunjukkan bahwa register pengecekan merupakan sebuah superposisi untuk semua $x \in \{0,1\}^n$, dan register jawaban merupakan superposisi 0 dan 1 dengan bobot yang sama. Selanjutnya f dievaluasi dengan menggunakan U_f : $|x, y\rangle \rightarrow |x, y \oplus f(x)\rangle$ yang menghasilkan

$$|\psi_2\rangle = \sum_x \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}} |x\rangle \left[|0 \oplus f(x)\rangle - |1 \oplus f(x)\rangle \right] = \sum_x \frac{(-1)^{f(x)} |x\rangle}{\sqrt{2^n}} \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \quad (73)$$

mengingat untuk setiap x , harga $f(x)$ adalah 0 atau 1, sehingga dengan mempertimbangkan kedua kemungkinan harga $f(x)$ untuk semua x itulah dapat diperoleh persamaan (73). Selanjutnya, seperti yang diberikan oleh rangkaian kuantum di Gambar 1.25, isi register

pengecekan dalam $|\psi_2\rangle$ akan mengalami interferensi via gerbang Hadamard $H^{\otimes n}$. Berikut ini hasil perhitungan efek gerbang Hadamard tersebut terhadap $|x\rangle$. Akan sangat membantu terlebih dahulu di uji dengan $x = 0$ dan $x = 1$ secara terpisah yang untuk qubit tunggal akan memberikan hasil $H|x\rangle = \sum_z (-1)^{x \cdot z} |z\rangle / \sqrt{2}$ di mana $x, z \in \{0, 1\}$. Dengan demikian maka dapat diperoleh

$$H^{\otimes n}|x_1 x_2 \dots x_n\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{z_1 z_2 \dots z_n} (-1)^{x_1 z_1 + x_2 z_2 + \dots + x_n z_n} |z_1 z_2 \dots z_n\rangle \quad (74)$$

Persamaan (74) ini dapat dituliskan dengan lebih kompak dalam bentuk

$$H^{\otimes n}|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_z (-1)^{x \cdot z} |z\rangle \quad (75)$$

di mana $x \cdot z$ adalah pasangan perkalian titik modulo 2 antara x dan z , seperti tampak jelas dipersamaan (74). Dengan menggunakan persamaan-persamaan (73) dan (75) dapat diperoleh

$$|\psi_3\rangle = \sum_z \sum_x \frac{1}{2^n} (-1)^{x \cdot z + f(x)} |z\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \quad (76)$$

Kini marilah kita perhatikan $|z\rangle$ isi register pengecekan. Amplituda untuk keadaan $|0\rangle^{\otimes n}$ adalah $\sum_x (-1)^{f(x)} / 2^n$. Ada dua kemungkinan kasus: f konstan dan f seimbang. Untuk kasus f konstan, amplituda untuk $|0\rangle^{\otimes n}$ adalah $+1$ atau -1 , tergantung dari $f(x)$. Mengingat $|\psi_3\rangle$ berharga satu maka semua amplituda yang lainnya harus sama dengan nol, dan menjadi jelas bahwa semua qubit di register pengecekan akan sama dengan 0. Jika f adalah seimbang maka kontribusi amplituda $|0\rangle^{\otimes n}$ yang negatif dan positif akan saling menghapus, akan meninggalkan sebuah amplituda non-zero, dan sebuah pengukuran akan menghasilkan harga bukan nol sekurang-kurangnya pada satu qubit di register pengecekan. Ringkasnya, jika pengukuran di register pengecekan semuanya adalah nol maka f adalah konstan; jika tidak demikian maka f adalah seimbang. Dengan demikian algoritma Deutsch-Jozsa dapat diringkaskan sebagai berikut.

Algoritma: Deutsch-Jozsa

Input:

o Sebuah operator Oracle bekerja sebagai transformator $|x\rangle|y\rangle \rightarrow |x\rangle|y \oplus f(x)\rangle$, untuk $x \in \{0, \dots, 2^n - 1\}$ dan $f(x) \in \{0, 1\}$. Ada dua kemungkinan f yaitu konstan untuk semua harga x , atau lainnya seimbang, yaitu berharga 1 untuk separuh dari semua kemungkinan x , dan berharga 0 untuk separuh yang lainnya.

Output:

o 0 jika dan hanya jika f adalah konstan.

Pengecekan:

Sekali saja pengecekan terhadap U_f , dan selalu berhasil.

Prosedur:

Step 1 $|0\rangle^{\otimes n}|1\rangle$ keadaan awal
Step 2 $\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right]$ menciptakan superposisi dengan menggunakan gerbang Hadamard.
Step 3 $\rightarrow \sum_x (-1)^{f(x)} |x\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right]$ hitung fungsi $f(x)$ menggunakan U_f .
Step 4 $\rightarrow \sum_z \sum_x \frac{1}{\sqrt{2^n}} (-1)^{x \cdot z + f(x)} \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right]$ melakukan transformasi Hadamard.
Step 5 $\rightarrow z$ melakukan pengukuran untuk mendapatkan luaran final z .

1.16.10 Analisis Rinci Algoritma Deutsch-Jozsa

Seperti sebelumnya di algoritma Deutsch, f akan dimasukkan ke dalam operator uniter g via penjumlahan modulo 2, yaitu $\oplus$. Misal X_i merupakan barisan bit $x_0, x_1, x_2, \dots$, maka operator g akan bekerja sebagai berikut

klasikal: $f(X_i) \rightarrow 0 \text{ atau } 1 \iff$ kuantum: $g|X_i\rangle|\alpha\rangle \rightarrow |X_i\rangle|\alpha \oplus f(X_i)\rangle$

di mana keadaan $|X_i\rangle$ menyatakan keadaan barisan n individual qubit atau

$$|X_i\rangle = |x_1 x_2 x_3 \dots\rangle = |x_1\rangle \otimes |x_2\rangle \otimes |x_3\rangle \otimes \dots = |x_1\rangle |x_2\rangle |x_3\rangle \dots$$

Misal, diketahui bahwa f mempunyai karakteristik di antaranya:

$$f(010) \rightarrow 0 \quad f(011) \rightarrow 1$$

maka operator g terkait karakteristik f tersebut adalah

$$\begin{aligned} g|010\rangle|\alpha\rangle &\longrightarrow |010\rangle|\alpha \oplus 0\rangle = |010\rangle|\alpha\rangle \\ g|011\rangle|\alpha\rangle &\longrightarrow |011\rangle|\alpha \oplus 1\rangle = |011\rangle X|\alpha\rangle \end{aligned}$$

Perhatikan, mengingat di sini digunakan penjumlahan modulo 2 maka $|a \oplus 1\rangle = X|a\rangle$, artinya penjumlahan modulo 2 dengan bit 1 ekuivalen dengan sebuah gerbang X . Jadi dampak digunakannya operator g adalah mengambil keadaan secara acak dan kemudian menggunakan gerbang X pada keadaan ancilla-nya. Untuk kasus f konstan, kita akan menggunakan pada semua atau tidak sama sekali gerbang X di keadaan ancilla-nya. Sedangkan untuk f seimbang, tepat separuh dari keadaan-keadaan itu akan menerima operasi g .

Sebagaimana halnya di algoritma Deutsch, sebuah komponen kunci di sini adalah keadaan $|a\rangle$. Qubit ancilla di-inisialisasi dalam keadaan $|1\rangle$, kemudian digunakan sebuah gerbang Hadamard H sehingga menyebabkannya berubah menjadi keadaan $| - x \rangle = (1/2)(|0\rangle - |1\rangle)$ sebelum dilewatkan operator uniter g . Hal ini berarti bahwa efek operator g dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{array}{ll} f(X_i) \longrightarrow 0 & f(X_j) \longrightarrow 1 \\ g|X_i\rangle| - x \rangle \longrightarrow |X_i\rangle| - x \rangle & g|X_j\rangle| - x \rangle \longrightarrow -|X_j\rangle| - x \rangle \end{array}$$

yaitu mengingat bahwa $| - x \oplus 1 \rangle = X| - x \rangle = -| - x \rangle$ yang dapat dibuktikan secara mudah, misal dengan menuliskan $| - x \rangle$ dalam basis $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Di tahap terakhir adalah tentang apa yang harus dilakukan terhadap keadaan kuantum hasil pengukuran. Mirip dengan algoritma Deutsch, keputusan f konstan atau seimbang, adalah melihat hasil pengukuran di register pengecekan dalam keadaan kuantum $|0\rangle$ atau $|1\rangle$. Dalam hal algoritma Deutsch-Jozsa adalah

$$|000\dots\rangle \longleftrightarrow f_{\text{konstan}} \quad \text{jika ada keadaan kuantum } |1\rangle \longleftrightarrow f_{\text{seimbang}}$$

Ada tiga komponen kunci dalam algoritma Deutsch-Jozsa: (1) qubit ancilla, (2) transformasi Hadamard, dan (3) penjumlahan $\oplus$ modulo 2. Karena kombinasi dari ketiga komponen inilah yang menyebabkan algoritma ini bekerja dengan sempurna. Kunci (1) dan (3) telah kita ketahui secara rinci sebelumnya sehingga berikut ini kita

akan membahas efek transformasi Hadamard. Untuk dapat melihat lebih rinci, kita lihat kasus f konstan terlebih dahulu di mana pengukuran akan selalu menghasilkan keadaan kuantum $|000\dots\rangle$. Ini berarti bahwa semua keadaan kuantum pada sistem menerima perlakuan yang sama dari g . Ingat bahwa untuk f konstan isi register pengecekan semuanya adalah 0; artinya tidak ada perubahan (dibanding masukan awal) bit. Dengan kata lain kita mempersiapkan proses sebagai berikut:

$$|0\rangle^{\otimes n}|1\rangle \longrightarrow H^{\otimes(n+1)} \longrightarrow I^{\otimes(n+1)} \longrightarrow H^{\otimes(n+1)} \longrightarrow |0\rangle^{\otimes n}|1\rangle$$

Bisa juga $I \otimes X^{(n+1)}$ digantikan dengan $I \otimes X$ yang akan menghasilkan keadaan akhir yang sama, tetapi dengan tanda negatif. Untuk memudahkan pemahaman, misal $n=2$ dan fokuskan pada efek matriks transformasi itu pada keadaan-keadaan $|000\rangle$ dan $|001\rangle$ di mana qubit terakhir merupakan qubit ancilla. Efek $I \otimes X \otimes X$ atau g terhadap $|000\rangle$ dan $|001\rangle$ adalah mempertukarkan (*swap*) amplitudonya (ekivalen dengan sebuah gerbang X). Perhatikan untuk g yang berada di antara dua transformasi Hadamard. Mula-mula telah disiapkan keadaan kuantum $|00\rangle|1\rangle$, kemudian transformasi Hadamard pertama $H \otimes^{(n+1)}$ akan menghasilkan superposisi semua kemungkinan keadaan kuantum, termasuk $|000\rangle$ dan $|001\rangle$. Salah satu hasilnya, berikut ini adalah efek dari g yaitu

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |001\rangle) \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(-|000\rangle + |001\rangle)$$

(ingat $g|Xi\rangle|a\rangle = |Xi\rangle X|a\rangle$ atau juga lihat persamaan (73)). Efek g untuk semua kemungkinan keadaan kuantum bila $n=2$ dan f adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} |00\rangle| - x\rangle &= |000\rangle - |001\rangle \xrightarrow{g} -|000\rangle + |001\rangle = -|00\rangle| - x\rangle \\ |01\rangle| - x\rangle &= |010\rangle - |011\rangle \xrightarrow{g} -|010\rangle + |011\rangle = -|01\rangle| - x\rangle \\ |10\rangle| - x\rangle &= |100\rangle - |101\rangle \xrightarrow{g} -|100\rangle + |101\rangle = -|10\rangle| - x\rangle \\ |11\rangle| - x\rangle &= |110\rangle - |111\rangle \xrightarrow{g} -|110\rangle + |111\rangle = -|11\rangle| - x\rangle \end{aligned}$$

Cara lain untuk melihat apa yang terjadi di sini dapat juga dilakukan dengan menambahkan fasa global negatif di antara kedua transformasi Hadamard $H^{\otimes(n+1)}$. Mengingat bahwa sebuah fasa global tidak melakukan apapun terhadap sistem secara keseluruhan, maka keadaan kuantum luaran dari transformasi Hadamard kedua adalah negatif dari keadaan kuantum yang masuk ke transformasi Hadamard kedua:

$$\begin{aligned}
 |00\rangle - |x\rangle &= |000\rangle - |001\rangle \xrightarrow{g} -|000\rangle + |001\rangle = -|00\rangle - |x\rangle \\
 |01\rangle - |x\rangle &= |010\rangle - |011\rangle \xrightarrow{g} |010\rangle - |011\rangle = |01\rangle - |x\rangle \\
 |10\rangle - |x\rangle &= |100\rangle - |101\rangle \xrightarrow{g} |100\rangle - |101\rangle = |10\rangle - |x\rangle \\
 |11\rangle - |x\rangle &= |110\rangle - |111\rangle \xrightarrow{g} -|110\rangle + |111\rangle = -|11\rangle - |x\rangle \\
 |\psi\rangle &\longrightarrow H^{\otimes(n+1)} \longrightarrow |\phi\rangle \rightarrow -|\phi\rangle \longrightarrow H^{\otimes(n+1)} \longrightarrow -|\psi\rangle
 \end{aligned}$$

Karena keadaan kuantum awal sistem qubit adalah $1000 \dots 0$, maka luaran akhir juga akan berupa $-|000 \dots 0\rangle$. Jadi pengukuran akan menghasilkan semuanya dalam keadaan $|0\rangle$, sehingga dapat disimpulkan bahwa f adalah konstan. Bagaimana untuk kasus f seimbang?

Untuk kasus seimbang, matriks g juga akan mempunyai struktur gerbang X sepanjang diagonal, tetapi tidak di semua elemen diagonal melainkan hanya separuhnya saja. Jadi jika matriks g untuk kasus seimbang ini diurai dalam 2^n blok 2×2 maka separuhnya adalah gerbang X dan separuhnya adalah matriks identitas 2×2 . Akibatnya jika kita gunakan kasus seperti sebelumnya, yaitu untuk $n = 2$ di mana f seimbang pada keadaan-keadaan $|000\rangle$ dan $|001\rangle$ maka akan diperoleh sehingga jika digunakan keadaan kuantum

$\frac{1}{2}(-|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$ sebagai masukan pada transformasi Hadamard $H^{0(n+1)}$ yang kedua maka akan diperoleh hasil akhir $-|11\rangle$ (1). Artinya, jika dilakukan pengukuran akan diperoleh sekurang-kurangnya ada sebuah qubit berada di keadaan 11). Jadi f adalah seimbang. Kita cukupkan pembahasan tentang contoh algoritma kuantum yang lebih ampuh dibanding algoritma klasikal. Bagi yang ingin melihat berbagai algoritma kuantum dipersilahkan

mengunjungi <https://quantumalgorithmzoo.org> atau suatu ringkasan tentang hal itu dapat dibaca di arXiv:1511.04206v2.

1.17 TRANSFORMASI FOURIER DISKRIT KUANTUM (TFDK)

Transformasi Fourier kuantum mempunyai peran amat penting dalam algoritma faktorisasi maupun algoritma kuantum penting lainnya. Algoritma ini adalah suatu algoritma kuantum yang efisien untuk melakukan transformasi Fourier amplituda-amplituda mekanika kuantum. Namun algoritma ini tidak mempercepat perhitungan transformasi Fourier data-data klasikal. Namun ada percepatan dalam melakukan estimasi fasa, yang merupakan hampiran harga eigen suatu operator uniter dalam kasus-kasus tertentu. Hal ini telah memungkinkan diselesaikannya sejumlah problema yang menarik seperti problema mencari urutan dan problema faktorisasi. Dengan ini juga dapat diselesaikan secara efisien untuk problema logaritma diskrit yang sangat sulit diselesaikan dengan komputer klasikal.

Salah satu cara untuk menyelesaikan sebuah problem dalam matematik adalah dengan cara mentransformasikannya ke dalam problema lain yang solusinya telah tersedia atau diketahui. Ada sejumlah transformasi jenis ini yang sering kali digunakan dalam berbagai konteks sehingga transformasinya itu sendiri dipelajari secara khusus dan mendalam. Salah satu penemuan besar dalam komputasi kuantum adalah dalam hal transformasi yang dapat diselesaikan jauh lebih cepat di komputer kuantum dibanding di komputer klasikal; sebuah penemuan yang memungkinkan dikonstruksikannya algoritma yang lebih cepat di komputer kuantum. Salah satu di antara algoritma itu adalah transformasi Fourier diskrit. Transformasi Fourier diskrit mempunyai masukan berupa suatu vektor bilangan-bilangan kompleks $x_0, \dots, x_{N-1}$ dengan N adalah panjang vektor yang merupakan parameter tetap. Luarannya berupa data yang telah tertransformasikan, yaitu sebuah vektor bilangan kompleks $y_0, \dots, y_{N-1}$ yang didefinisikan sebagai

$$y_k \equiv \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-2\pi i j k / N} \quad (77)$$

Transformasi Fourier diskrit kuantum merupakan transformasi yang mirip meskipun notasi konvensional transformasi Fourier kuantum nampak berbeda. Transformasi Fourier diskrit kuantum pada sebuah basis orthonormal $\{|0\rangle, \dots, |N-1\rangle\}$ didefinisikan sebagai sebuah operator linier yang aksinya pada keadaan-keadaan basis berupa

$$|j\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\pi i j k / N} |k\rangle \quad (78)$$

sehingga aksinya pada sembarang keadaan kuantum dapat dituliskan sebagai

$$\sum_{j=0}^{N-1} x_j |j\rangle \mapsto \sum_{k=0}^{N-1} y_k |k\rangle \quad (79)$$

di mana amplituda-amplituda y_k merupakan transformasi Fourier diskrit kuantum dari amplituda-amplituda x_j . Transformasi yang diberikan oleh persamaan (78) adalah transformasi uniter karena

$$\langle m | j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k,n=0}^{N-1} e^{-2\pi i m n / N} e^{2\pi i j k / N} \langle n | k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\pi i (j-m) k / N} = \delta_{j,m} \quad (80)$$

artinya, perkalian dalam (*inner product*) tetap terjaga. Hasil ini juga berarti bahwa $\{|j\rangle\}$ merupakan basis yang sah. Jadi TFK juga dapat disebut sebagai transformasi basis di ruang Hilbert di mana keadaan-keadaan kuantum terdefinisi.

Untuk memperjelas konsep transformasi Fourier kuantum, misal $N = 2^n$ di mana n bilangan bulat dan basis komputasi untuk sistem n qubit adalah $\{|0\rangle, \dots, |2^n - 1\rangle\}$. Untuk menyatakan keadaan kuantum $|j\rangle$ digunakan representasi $j = j_1 2^{n-1} \dots j_n$ atau secara formalnya $j = j_1 2^{n-1} + j_2 2^{n-2} + \dots + j_n 2^0$. Juga akan diadopsi notasi $0, j_e j_{e+1} \dots j_m$ untuk menyatakan pecahan biner $j_e/2 + j_{e+1}/4 + \dots + j_m/2^{m-e+1}$. Dengan demikian transformasi Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk perkalian sebagai berikut

$$j_1 j_2 \dots j_n \mapsto \frac{1}{2^{n/2}} \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0, j_n} |1\rangle \right) \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0, j_{n-1} j_n} |1\rangle \right) \dots \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0, j_1 j_2 \dots j_n} |1\rangle \right) \quad (81)$$

Representasi dalam bentuk perkalian ini sangat bermanfaat untuk menurunkan rangkaian kuantum yang efisien dari transformasi Fourier kuantum. Persamaan (81) dapat diturunkan sebagai berikut

$$|j\rangle \mapsto \frac{1}{2^{n/2}} \sum_{k=0}^{2^n-1} e^{2\pi i j k / 2^n} |k\rangle \quad (82)$$

$$= \frac{1}{2^{n/2}} \sum_{k_1=0}^1 \cdots \sum_{k_n=0}^1 e^{2\pi i j (\sum_{\ell=1}^n k_\ell 2^{-\ell})} |k_1 \cdots k_n\rangle \quad (83)$$

$$= \frac{1}{2^{n/2}} \sum_{k_1=0}^1 \cdots \sum_{k_n=0}^1 \bigotimes_{\ell=1}^n e^{2\pi i j k_\ell 2^{-\ell}} |k_\ell\rangle \quad (84)$$

$$= \frac{1}{2^{n/2}} \bigotimes_{\ell=1}^n \left[\sum_{k_\ell} e^{2\pi i j k_\ell 2^{-\ell}} |k_\ell\rangle \right] \quad (85)$$

$$= \frac{1}{2^{n/2}} \bigotimes_{\ell=1}^n \left[|0\rangle + e^{2\pi i j k_\ell 2^{-\ell}} |1\rangle \right] \quad (86)$$

$$= \frac{1}{2^{n/2}} \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_n} |1\rangle \right) \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_{n-1} j_n} |1\rangle \right) \cdots \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_1 j_2 \cdots j_n} |1\rangle \right) \quad (87)$$

Representasi perkalian yang diberikan oleh persamaan (81) dalam bentuk rangkaian kuantum ditunjukkan pada Gambar 1.26 di mana a diberikan oleh

$$\begin{aligned} |\alpha_1\rangle &= |0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_1 \cdots j_n} |1\rangle \\ |\alpha_2\rangle &= |0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_2 \cdots j_n} |1\rangle \\ |\alpha_{n-1}\rangle &= |0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_{n-1} \cdots j_n} |1\rangle \\ |\alpha_n\rangle &= |0\rangle + e^{2\pi i 0 \cdot j_n} |1\rangle \end{aligned}$$

dan R_k diberikan oleh persamaan sebagai berikut

$$R_k \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{2\pi i / 2^k} \end{bmatrix} \quad (88)$$

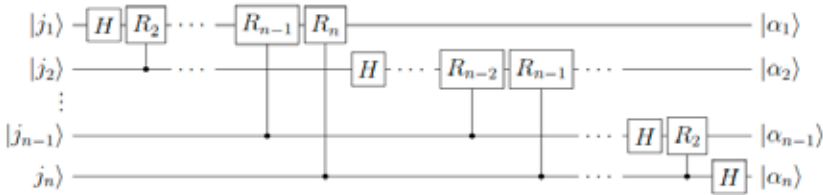
Untuk melihat rangkaian kuantum Gambar 1.26 merepresentasikan persamaan (82) dapat dimulai dengan

memberikan masukan berupa keadaan kuantum $|j_1, \dots, j_n\rangle$. Melewatkan masukan itu ke gerbang Hadamard akan menghasilkan

$$\frac{1}{2^{1/2}} \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0, j_1} |1\rangle \right) |j_1 \dots j_n\rangle,$$

karena $e^{2\pi i 0, j_1} = -1$ jika $j_1 = 1$, dan akan sama dengan $+1$ jika $j_1 = 0$. Selanjutnya penggunaan gerbang terkendali R2 akan menghasilkan keadaan kuantum

$$\frac{1}{2^{1/2}} \left(|0\rangle + e^{2\pi i 0, j_1 j_2} |1\rangle \right) |j_2 \dots j_n\rangle$$



Gambar 1.26 Rangkaian kuantum untuk transformasi Fourier diskrit kuantum yang diberikan oleh persamaan (82) dan R oleh persamaan (88).

Gerbang-gerbang pertukaran (*swap gates*) di akhir rangkaian yang digunakan untuk menukarkan urutan qubit, ataupun faktor $1/\sqrt{2}$ bagi luarannya tidak ditunjukkan di gambar ini. Demikian kita gunakan selanjutnya gerbang-gerbang terkendali R_3, R_4 hingga R_n sehingga pada akhirnya akan menghasilkan $|\alpha_1\rangle$. Jika hal yang serupa dilakukan terhadap qubit-qubit berikutnya, mengikuti rangkaian kuantum itu maka akan diperoleh *output* yang lainnya. Operasi pertukaran (*swap*) yang tidak diperlihatkan di Gambar 1.26 selanjutnya digunakan untuk mengubah urutan qubit-qubit itu sehingga dapat diperoleh hasil seperti persamaan (82). Berapa banyak gerbang yang dibutuhkan di rangkaian transformasi Fourier kuantum? Diawali dengan sebuah gerbang Hadamard dan $n - 1$ gerbang rotasi terkendali sebanyak $n - 1$, sehingga totalnya diperlukan n buah gerbang untuk qubit pertama. Untuk qubit kedua diperlukan $n - 1$ gerbang, sehingga hingga qubit kedua diperlukan $n + (n - 1)$ gerbang. Demikian seterusnya hingga pada akhirnya total gerbang diperlukan adalah $n + (n - 1) + \dots + 1 = n(n + 1)/2$ ditambah gerbang-gerbang untuk keperluan pertukaran (*swap*). Maksimum diperlukan

$n/2$ pertukaran dan masing-masingnya dapat dilakukan dengan menggunakan tiga buah gerbang CNOT. Jadi rangkaian kuantum ini menawarkan algoritma $O(n^2)$ untuk menyelesaikan transformasi Fourier kuantum.

Sebagai pembanding, algoritma klasikal terbaik untuk menghitung transformasi Fourier 2^n elemen adalah algoritma seperti *Fast Fourier Transform* (FFT) yang menghitung transformasi Fourier diskrit menggunakan $O(n^2)$ gerbang-gerbang klasikal. Artinya, diperlukan jauh lebih banyak (eksponensial) operasi untuk menghitung transformasi Fourier di komputer klasikal. Berdasarkan fakta ini nampaknya transformasi Fourier kuantum sangat menarik karena banyak sekali persoalan pengolahan data di dunia nyata yang membutuhkan bantuan transformasi Fourier. Sayangnya belum tersedia cara untuk memanfaatkan transformasi Fourier kuantum untuk membantu mempercepat dalam menghitung transformasi Fourier. Hal ini disebabkan karena amplituda-amplituda di komputer kuantum tidak dapat diakses melalui pengukuran. Jadi, tidaklah mungkin untuk menentukan amplituda keadaan awal yang telah ditransformasi Fourier kuantum. Artinya, mencari cara untuk dapat memanfaatkan transformasi Fourier kuantum merupakan problema yang lebih rumit dari yang semula kita bayangkan.

1.18 TRANSFORMASI FOURIER DISKRIT (TFD) KLASIKAL

Transformasi Fourier kuantum mempunyai peranan amat penting dalam sejumlah algoritma sebagaimana pentingnya transformasi Hadamard pada algoritma-algoritma yang telah dibahas sebelumnya. Secara matematis, TFDK ternyata ekuivalen dengan transformasi Fourier diskrit balik (*inverse discrete Fourier transform* atau TFD^v), tetapi digunakan untuk keadaan-keadaan sistem kuantum. Oleh karena itu akan diberikan contoh singkat tentang transformasi Fourier diskrit balik terlebih dahulu. Secara formal, transformasi diskrit ini, seperti telah diberikan oleh persamaan (77), adalah sebagai berikut

$$\mathbb{A} = \{a_0, \dots, a_k, \dots, a_{N-1}\} \xrightarrow{TFD} \hat{\mathbb{A}} = \{\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_k, \dots, \hat{a}_{N-1}\} \quad (89)$$

$$\hat{a}_k = \sum_{j=0}^{N-1} a_j e^{-2\pi i k j / N} \quad (90)$$

di mana transformasi ini memetakan semua bilangan di A ke A , dan seperti biasanya $e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta$. TFD seperti yang didefinisikan di persamaan-persamaan (89) dan (90) yang menunjukkan bahwa harga dari setiap luaran a_k menerima kontribusi dari setiap masukan a_k . Secara lebih eksplisit, setiap masukan dikalikan dengan suatu bilangan kompleks dalam bentuk $e^{2\pi i \theta}$ dan kemudian semuanya dijumlahkan. Harga setiap 0 ditentukan dari perkalian kj . Namun, agar fungsi klasikal ini dapat dibandingkan dengan versi kuantumnya, maka bilangan fasa yang muncul di fungsi eksponensial itu haruslah bernilai positif untuk menerapkan TFD^y. Berikut ini akan diberikan sebuah contoh, misal:

$$\begin{aligned} \mathbb{A} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \hat{a}_0 &= \sum_{j=0}^3 a_j e^{2\pi i 0 \cdot j / 4} = \sum_{j=0}^3 a_j = 0; \quad \hat{a}_1 = \sum_{j=0}^3 a_j e^{2\pi i 1 \cdot j / 4} = 2 - 2i; \\ \hat{a}_2 &= \sum_{j=0}^3 a_j e^{2\pi i 2 \cdot j / 4} = 0; \quad \hat{a}_3 = \sum_{j=0}^3 a_j e^{2\pi i 3 \cdot j / 4} = 2 + 2i \\ \therefore \mathbb{A} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{TFD} \hat{\mathbb{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 2 - 2i & 0 & 2 + 2i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dalam representasi matriks, TFD^y ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 - 2i \\ 0 \\ 2 + 2i \end{bmatrix}$$

Atau, dengan kata lain, transformasi atau operator matriksnya adalah

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \quad (91)$$

Harga-harga pada matriks di atas dapat juga dituliskan sebagai berikut.

$$\omega \equiv e^{2\pi i/N} \quad \text{matriks TFD}^\dagger: \mathbb{F}_4 = \begin{bmatrix} \omega^0 & \omega^0 & \omega^0 & \omega^0 \\ \omega^0 & \omega^1 & \omega^2 & \omega^3 \\ \omega^0 & \omega^2 & \omega^4 & \omega^6 \\ \omega^0 & \omega^3 & \omega^6 & \omega^9 \end{bmatrix}$$

Pangkat dari ω berasal dari perkalian $k \cdot j$, dan N menyatakan jumlah bilangan yang akan ditransformasikan (dalam hal ini $N = 4$), yaitu misal untuk $k=1$ sebagai berikut.

$$\begin{array}{llll} k \cdot j : & 1 \cdot 0 = 0 & 1 \cdot 1 = 1 & 1 \cdot 2 = 2 & 1 \cdot 3 = 3 \\ \omega^{kj} : & \omega^0 & \omega^1 & \omega^2 & \omega^3 \\ = & e^0 & e^{i\pi/2} & e^{\pi i} & e^{\pi i 3/2} \\ = & 1 & i & -1 & -i \end{array}$$

Sekedar untuk membandingkannya dengan transformasi Fourier diskrit kuantum, pembahasan tentang TFD^y dicukupkan sampai di sini. Kita akan membahas contoh TFD kuantum pada bab selanjutnya. Contoh dari TFD^y di sini akan kita gunakan pada pembahasan TFDK berikut ini.

1.19 IMPLEMENTASI TRANSFORMASI FOURIER DISKRIT (TFD) KUANTUM

TFD kuantum merupakan inti dari sejumlah algoritma kuantum, misal algoritma Shor yang digunakan untuk menyelesaikan problema faktorisasi. Pada bagian ini akan diberikan contoh untuk kasus sederhana yaitu untuk sistem-sistem satu, dua dan tiga-qubit. Untuk sistem ini juga akan diberikan implementasi rangkaian kuantumnya. Khusus untuk yang dua-qubit juga akan dibandingkan dengan TFD klasikal. Kita akan menggunakan persamaan (78) sehingga dalam hal ini $N = 4$ atau $n=2$ qubit. Dengan demikian keadaan-keadaan kuantum n -qubit dapat dilabelkan dengan sebuah bilangan bulat n -bit, misal x , atau oleh angka-angka bit individual x_i yang membentuk representasi biner dari x . Artinya, misal 3 atau 11. Sebagai contoh, dalam basis standar, keadaan 2-qubit dapat dituliskan sebagai

$$|0\rangle \equiv |00\rangle; \quad |1\rangle \equiv |01\rangle; \quad |2\rangle \equiv |10\rangle; \quad |3\rangle \equiv |11\rangle$$

Untuk mencegah kekaburan, jika diperlukan, akan kita gunakan subskrip yang menyatakan sistem yang dipelajari adalah n -qubit,

misal $|x\rangle_n$ sehingga $|2\rangle_2 = |10\rangle$. Kita mulai dengan sistem satu-qubit atau $n=1$ atau $N=2$ dalam basis standar $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Berdasar persamaan (78) maka

$$\begin{aligned} |0\rangle &\mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle \\ |1\rangle &\mapsto \frac{2}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle \end{aligned}$$

Jadi transformasi Fourier diskrit kuantum untuk sistem satu-qubit mempunyai operator matriksnya tidak lain adalah matriks Hadamard. Artinya implementasi transformasi Fourier diskrit untuk sistem satu-qubit cukup dengan sebuah gerbang Hadamard. Hasilnya adalah $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ yang tidak lain adalah basis Hadamard. Untuk sistem dua-qubit, $n=2$ atau $N=4$, dengan menggunakan persamaan (78) transformasi itu menghasilkan

$$\begin{aligned} |0\rangle_2 &\mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle_2 + |1\rangle_2 + |2\rangle_2 + |3\rangle_2) = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) \\ |1\rangle_2 &\mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle_2 + e^{2\pi i/4}|1\rangle_2 + e^{2\pi i2/4}|2\rangle_2 + e^{2\pi i3/4}|3\rangle_2) \\ &= \frac{1}{2}(|0\rangle_2 + i|1\rangle_2 - |2\rangle_2 - i|3\rangle_2) = \frac{1}{2}(|00\rangle + i|01\rangle - |10\rangle - i|11\rangle) \\ |2\rangle_2 &\mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle_2 + e^{2\pi i2/4}|1\rangle_2 + e^{2\pi i4/4}|2\rangle_2 + e^{2\pi i6/4}|3\rangle_2) \\ &= \frac{1}{2}(|0\rangle_2 - |1\rangle_2 + |2\rangle_2 - |3\rangle_2) = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) \\ |3\rangle_2 &\mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle_2 + e^{2\pi i3/4}|1\rangle_2 + e^{2\pi i6/4}|2\rangle_2 + e^{2\pi i9/4}|3\rangle_2) \\ &= \frac{1}{2}(|0\rangle_2 - i|1\rangle_2 - |2\rangle_2 + i|3\rangle_2) = \frac{1}{2}(|00\rangle - i|01\rangle - |10\rangle + i|11\rangle) \end{aligned}$$

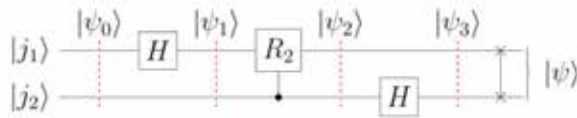
Jadi dengan basis yang berurutan $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ maka operator matriks dari TFDK untuk sistem dua-qubit adalah

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \quad (92)$$

yang sama dengan TFD^y persamaan (91) kecuali ada tambahan faktor 1/2 di TFDK ini. Implementasi rangkaian kuantum dari persamaan (92) ditunjukkan di Gambar 1.27. Berdasarkan Gambar 1.27 maka

$$|\psi_1\rangle = [H \otimes I]|\psi_0\rangle = U_1|\psi_0\rangle; |\psi_2\rangle = [I \otimes |0\rangle\langle 0| +$$

$$R_2 \otimes |1\rangle\langle 1|]|\psi_1\rangle = U_2|\psi_1\rangle; |\psi_3\rangle = [I \otimes H]|\psi_2\rangle = U_3|\psi_2\rangle; \text{ dan } |\psi\rangle = U_4|\psi_3\rangle \text{ sehingga}$$



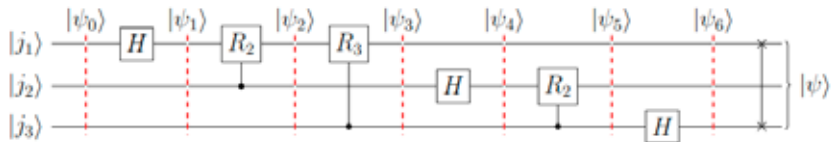
Gambar 1.27 Implementasi TFDK untuk $n=2$ atau $N=2^n = 4$

$|\psi\rangle = U_4 U_3 U_2 U_1 |\psi_0\rangle$, atau dengan kata lain TDFK adalah $F = U_4 U_3 U_2 U_1$ yaitu

$$U_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad U_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \end{bmatrix}; \quad U_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$U_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \therefore F = U_4 U_3 U_2 U_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix}$$

Terlihat bahwa F sama dengan TFDK yang diberikan oleh persamaan (92). Jadi rangkaian kuantum pada Gambar 1.27 merupakan implementasi dari TDFK untuk sistem dua-qubit. Untuk TDFK dengan $n = 3$ atau $N = 2^3 = 8$ rangkaian kuantumnya diberikan oleh Gambar 1.28.



Gambar 1.28 Implementasi TFDK untuk $n = 3$ atau $N = 2^3 = 8$ pada rangkaian kuantum

R_3 di Gambar 1.28 diberikan oleh persamaan (88) dengan $k = 3$ yang tidak lain adalah gerbang T ; dan gerbang R_2 tiada lain adalah gerbang fasa S (lihat Tabel 1.3). Dengan menggunakan metoda analisis sebagaimana untuk sistem dua-qubit dapat diperoleh $|\psi\rangle = F|\psi_0\rangle$ di mana untuk $\omega = \exp(2\pi i/8) = \sqrt{i}$ maka dapat dituliskan

$$\mathbb{F} = \frac{1}{\sqrt{8}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 & \omega^3 & \omega^4 & \omega^5 & \omega^6 & \omega^7 \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \omega^6 & 1 & \omega^2 & \omega^4 & \omega^6 \\ 1 & \omega^3 & \omega^6 & \omega^7 & \omega^4 & \omega^7 & \omega^2 & \omega^5 \\ 1 & \omega^4 & 1 & \omega^4 & 1 & \omega^4 & 1 & \omega^4 \\ 1 & \omega^5 & \omega^2 & \omega^7 & \omega^4 & 1 & \omega^6 & \omega^3 \\ 1 & \omega^6 & \omega^4 & \omega^2 & 1 & \omega^6 & \omega^4 & \omega^2 \\ 1 & \omega^7 & \omega^6 & \omega^5 & \omega^4 & \omega^3 & \omega^2 & \omega \end{bmatrix} \quad (93)$$

Berapa banyak gerbang kuantum yang dibutuhkan pada rangkaian-rangkaian kuantum untuk implementasi transformasi Fourier diskrit kuantum? Implementasi itu dimulai oleh sebuah gerbang Hadamard dan $n - 1$ rotasi bersyarat sehingga ada n gerbang pada qubit pertama. Kemudian ada sebuah gerbang Hadamard dan $n - 2$ rotasi bersyarat pada gerbang kedua, sehingga hingga qubit kedua ada sebanyak $n + (n - 1)$ gerbang kuantum. Jika proses ini dilanjutkan hingga qubit ke n maka dibutuhkan sebanyak $n(n + 1)/2$ gerbang kuantum, kemudian masih perlu ditambahkan gerbang untuk melakukan pertukaran (*swap*). Sekurang-kurangnya diperlukan $n/2$ pertukaran, dan untuk setiap pertukaran diperlukan tiga gerbang CNOT. Jadi untuk melakukan n -qubit TFDK diperlukan $O(n^2)$ gerbang kuantum. Pada komputer klasik, untuk menghitung algoritma transformasi Fourier terbaik semisal *Fast Fourier Transform* (FFT) diperlukan sebanyak $O(n^2)$. Artinya, diperlukan operasi yang meningkat secara eksponensial jika transformasi Fourier itu dilakukan di komputer klasikal digital.

1.20 KESIMPULAN

Makalah ini telah membahas latar belakang kehadiran dan memberi catatan terhadap sejumlah perkembangan terakhir komputer kuantum. Selanjutnya telah dibahas seluk beluk tentang komputer kuantum, mulai dari komponen dasar penyusunnya berupa gerbang-gerbang kuantum hingga ke rangkaian kuantum untuk implementasi algoritma kuantum sederhana. Mengingat perannya yang luar biasa penting dalam berbagai kegiatan rekayasa, telah dibahas juga transformasi Fourier diskrit kuantum, termasuk implementasi rangkaian kuantumnya. Masih amat banyak yang dapat dibahas dan didiskusikan tentang topik yang menarik dalam teknologi kuantum. Juga kini sudah amat banyak pustaka yang

dapat digunakan untuk mengikuti dan mempelajari teknologi yang diduga, dalam gabungan dengan AI+Big Data+ML akan menjadi salah satu disrupsi hebat teknologi dalam satu-dua dekade mendatang, waktu yang tidak terlalu lama lagi. Mungkin kini sudah saatnya kita untuk memberi perhatian yang lebih serius dan masif.

1.21 UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini iijinkan saya menyampaikan terima kasih kepada Pimpinan Forum Guru Besar-ITB yang telah memberi kesempatan untuk berbicara memperkenalkan topik yang sangat menarik dan relevan dengan riset simulasi kuantum kami. Juga kepada Dekan FTI Prof. Brian dan Dr. Agung Budiyo yang pertama kali mendorong kami untuk memulai memanfaatkan teknologi ini di penelitian rancang bangun material komputasional. Juga terima kasih kepada semua anggota laboratorium rancang bangun material komputasional dan simulasi kuantum. Tak lupa terima kasih kepada Dr. Cica Gustiani dari Oxford University atas bantuan mendapatkan berbagai literatur dan juga atas kesediaannya membantu laboratorium kami untuk mengawali penggunaan teknologi ini. Juga terima kasih saya sampaikan kepada Dr. Daniel Koch dari *Air Force Research Center New York* yang telah mengizinkan penggunaan banyak hal dari paper-papernya di makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Paul Adrien Maurice Dirac. Quantum mechanics of many-electron systems. *Proceedings of the Royal Society of London*, 123(792), 1929.
- [2] A.L. Maulana, A.G. Saputro, Y. Prasetyo, M.H. Mayuddin, M. Iqbal, H.T. Yudistira, I.G. Wenten, and H.K. Dipojono. Two-electron electrochemical reduction of CO₂ on B-doped Ni—N—C catalysts: A first principle study. *Journal of Physical Chemistry C*, 125(35):19247-19258, 2021.
- [3] R.W.M. Komalig, G. Shukri, M.K. Agusta, A.G. Saputro, A. Sumboja, A. Nuruddin, and H.K. Dipojono. Enhanced lithium diffusivity in reduced cerium oxides: A first- principles study. *Journal of Physical Chemistry C*, 126(7):3328-3338, 2022.

- [4] V. Khoirunisa, F. Rusydi, L.S.P. Boli, A.G. Saputro, Nakanishi H. Rachmawati, H., H. Kasai, and H.K. Dipojono. Computational investigation on the OOH scavenging sites of gnetin c. *Food Biophysics*, 16:337-345, 2021.
- [5] M.H. Mahyuddin, A.G. Saputro, R.P.P Sukanli, F. Fathurrahman, J. Rizkiana, A. Nuruddin, and H.K. Dipojono. Molecular insight into the role of zeolite lattice constraints on methane activation over the Cu—O—Cu active site. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(7):4196-4203, 2022.
- [6] Richard P. Feynman. Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21:467-488, 1982.
- [7] Frank Arute, Kunal Arya, ..., and John M. Martinis. Quantum supremacy using pro- grammable superconducting processor. *Nature*, 574:505-510, 2019.
- [8] Charles Day. Quantum Information is exciting and important. *Physics Today*, 74(3):8, 2021.
- [9] Issues & Events. Israel has become a powerhouse in quantum technologies. *Physics Today*, 74(12):24-27, 2021.
- [10] John Preskill. *Lecture Notes for Physics: Quantum Information and Computation*. California Institute of Technology, 1998.
- [11] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2010.
- [12] Yudong Cao, Jonathan Romeo, Jonathan P. Oslo, Matthias Degroote, Peter D. Johnson, Mara Kieferova, Ian D. Kivlichan, Tim Menke, Borja Peropadre, Nicolas P. D. Sawaya, Sukin Sim, Libor Veis, and Alan Aspuru-Guzik. Quantum chemistry in the age of quantum computing. *ACS Chemical Reviews*, 119:10856-10915, 2019.
- [13] Sam McArdle, Suguru Edo, Alan Aspuru-Guzik, Simon C. Benjamin, and Xiao Yuan. Quantum computational chemistry. *arXiv:1808.10402v3*, pages 1-59, 2020.
- [14] Daniel Koch, Saahil Patel, Laura Wessing, and Paul M. Alsing. Introduction to coding quantum algorithms: A tutorial series using qiskit. *arXiv:1903.04359v1*.
- [15] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics: Quantum Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1966.

2

ENTANGLEMENT (KETERBELITAN) DALAM QUANTUM TRANSPORT, BLACK HOLE, DAN GELOMBANG GRAVITASI

Freddy Permana Zen, Donny Dwiputra, Hadyan Luthfan
Prihadi, Anom Trenggana, Seramika Ariwahjoedi

ABSTRAK

Fisika kuantum dan relativitas umum Einstein menjelaskan fenomena alam pada skala yang berbeda. Yang pertama menjelaskan dinamika atom, molekul, dan interaksinya dengan cahaya, sementara yang kedua menjelaskan fenomena kosmik di mana gravitasi menjadi interaksi yang dominan. Secara realistik, tidak ada sistem fisis yang tertutup dari lingkungannya baik skala kuantum maupun relativistik. Tulisan ini akan memaparkan mengenai *entanglement*, sistem kuantum terbuka, dan aplikasinya dalam menjelaskan transpor kuantum, di mana gangguan lingkungan dapat meningkatkan kinerja sistem, serta realisasi eksperimennya. Pada relativitas umum, tinjauan sistem-lingkungan dapat diterapkan pada lubang hitam dan termodinamikanya. Akan dipaparkan mengenai prinsip holografi pada lubang hitam dan kaitannya dengan *entanglement* kuantum. Efek kuantum pada lubang hitam, awal alam semesta, dan gelombang gravitasi primordial menjadi kajian untuk melihat hubungan antara teori relativitas umum dan kuantum, yang berbeda skalanya. Upaya penyatuan kedua teori tersebut hingga kini masih menjadi *problem* terbuka. Akan dipaparkan bagaimana *loop quantum gravity* dapat mengatasi masalah unifikasi teori gravitasi dan kuantum.

2.1 PENDAHULUAN

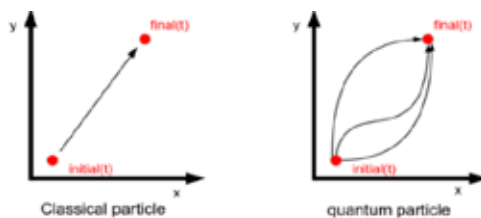
Fisika kuantum dan relativitas Einstein telah menjadi cikal bakal kehidupan modern sejak awal perumusannya pada awal abad ke-20. Salah satu penemuan pentingnya adalah tabel periodik dan klasifikasi sifat atom-atom yang bersifat konduktor dan isolator. Teori kuantum memprediksi adanya sifat di antara keduanya: semikonduktor. Dengan bahan ini kemudian dibuat transistor—saklar elektronik—yang menjadi komponen utama logika bit (keadaan 0 atau 1) untuk komputer dan sistem telekomunikasi. Perbedaan fisika kuantum, dibandingkan fisika klasik, adalah partikel memiliki sifat gelombang sehingga dapat menempati lebih dari satu tempat dan keadaan energi secara bersamaan (superposisi)—setidaknya sebelum sistem tersebut diukur (dengan diganggu oleh pengukur yang berperan sebagai lingkungannya).

Pada abad ke-21 ini komputasi yang berbasis mekanika kuantum, dengan basis qubit (quantum bit), yaitu keadaan 0 dan 1 secara bersamaan, telah berhasil diwujudkan secara eksperimen dan bahkan telah ada prototipe yang mulai dipasarkan. Secara prinsip, komputer kuantum memiliki keunggulan komputasi eksponensial dibandingkan dengan komputer konvensional. Selain komputer kuantum, para ilmuwan juga tengah berfokus mengembangkan teknologi lainnya seperti komunikasi dan kriptografi kuantum, *quantum sensing*, sampai dengan mesin kuantum. Kita memasuki era revolusi kuantum kedua (Quantum 2.0) yang berfokus pada rekayasa sistem kuantum (dan lingkungannya) secara individual dengan memanfaatkan sifat superposisi, *tunneling*, dan *entanglement*.

Kompleksitas sistem kuantum yang meningkat eksponensial dibandingkan dengan sistem klasik (2^N kali untuk sistem N qubit vs. N bit) membuat langkah untuk mensimulasikan sistem kuantum “sederhana”, seperti molekul organik, secara full quantum membutuhkan komputer yang super canggih. Bahkan sampai saat inipun, komputer (klasik) yang kita miliki butuh waktu berjam-jam sampai berbulan-bulan untuk mensimulasikan dinamika pergerakan sebuah molekul. Hal ini tentu akan lambat untuk, misalnya, perkembangan ilmu farmasi dalam mencari obat atau vaksin baru. Akan dipaparkan bagaimana eksperimen simulator kuantum dapat menjawab tantangan kompleksitas ini.

Berbeda dengan fisika kuantum yang lebih banyak bersangkutan dengan dunia skala kecil, relativitas umum Einstein menjelaskan fenomena alam semesta pada skala kosmologis, e.g., planet, bintang, lubang hitam, dan galaksi. Secara matematis keduanya berbeda secara prinsip: fisika kuantum mendeskripsikan gelombang-partikel dengan fluktuasi akibat ketidakpastian Heisenberg yang secara pengukuran nondeterministik, sementara relativitas umum bersifat deterministik baik secara formulasi maupun pengukuran. Bagaimana kedua teori ini dapat disatukan untuk membentuk suatu teori yang lebih umum? Salah satu jalannya adalah melalui teori *loop quantum gravity*.

Sampai saat ini belum ada teori gravitasi kuantum universal yang sudah mapan. Namun, kita tetap dapat menelaah keterhubungan antara teori kuantum dan relativitas pada dua keadaan ekstrem yang sangat penting dalam fisika: lubang hitam dan awal alam semesta. Pada tulisan ini akan dijelaskan bagaimana efek kuantum berperan pada lubang hitam dan kosmologi awal alam semesta, terutama efek *entanglement* kuantum. Pada lubang hitam *entanglement* antara partikel di dalam dan di luar *event horizon* memberikan dampak serius yang memancarkan lubang hitam memancarkan radiasi. Sementara pada awal alam semesta, ukurannya sangat kecil dan mampat sehingga fluktuasi kuantum dapat mencetuskan inflasi dan ledakan besar. Karena awalnya dari satu sumber, dua partikel yang terpisah jauh (tidak terhubung secara kausalitas) masih mungkin memiliki *entanglement*, yang tentu akan memiliki *signature* pada spektrum radiasi latar alam semesta. Untuk memulai, pertama-tama kita akan membahas secara singkat prinsip dasar fisika kuantum dan apa bedanya dengan fisika sehari-hari (fisika klasik), fenomena *entanglement*, dan sistem kuantum terbuka sebagai metode untuk sistem kuantum komposit yang saling berinteraksi.



Gambar 2.1 Trayektori untuk (kiri) partikel klasik, yang deterministik, dan (kanan) partikel kuantum, yang probabilistik

2.1.1 Prinsip Fisika Kuantum

Apa perbedaan mendasar antara fisika klasik dan kuantum? Dalam dunia klasik, keadaan (*state*) sistem tiap waktu dikarakterisasi secara deterministik oleh momentum $p(t)$ dan posisi $x(t)$, serta dinamikanya tunduk pada Hukum Newton. Pada pengukuran di fisika klasik, ketelitian pengukuran hanya bergantung pada kepandaian pengukur dan ketelitian alatnya. Secara prinsip ketidakpastian (karena ketidaktelitian) momentum Δp dan posisi Δx secara serentak memenuhi $\Delta p \Delta x \geq 0$ sehingga trajektori benda dalam ruang fasa bersifat tunggal (Gambar 2.1, kiri). Artinya jika kita sangat presisi sekali mengukur maka bisa mendapatkan nilai pasti dari pengukurannya. Dalam dunia klasik sebuah pengukuran, misalnya panjang atau kecepatan, tidak mengubah benda yang diukur itu sendiri (*what-you-see-is-what-you-get*/WYSIWYG), atau dengan kata lain si pengukur tidak memiliki peran apapun pada objek pengukuran. Sedangkan dalam dunia kuantum keadaannya berbeda drastis: ketelitian pengukuran dibatasi oleh ketidakpastian Heisenberg,

$$\Delta p \Delta x \geq h,$$

Dengan h merupakan konstanta Planck. Perhatikan bahwa hubungan ini berbeda dengan klasik karena $h \neq 0$; jika kita ambil $\Delta x = 0$ maka $\Delta p \rightarrow \infty$. Dalam kuantum kedua variabel ini tidak kompatibel dalam pengukuran serentak, dan secara matematis keduanya adalah pasangan ranah transformasi Fourier. Pengukuran momentum dan posisi selalu mengandung ketidakpastian yang dibatasi oleh konstanta Planck tersebut; tidak peduli se-presisi apapun kita mengukur. Akibatnya keadaan sistem tidak dapat dikarakterisasi oleh himpunan $\{p(t), x(t)\}$ seperti pada dunia klasik dan trajektori sistem dalam ruang fasa tidak tunggal; secara prinsip terdapat tak hingga banyaknya kemungkinan, di mana terdapat beberapa trajektori lebih mungkin dari yang lainnya (Gambar 2.1, kanan). Bagaimana memformulasikan fisika tanpa posisi dan momentum yang pasti? Jawabannya adalah meninggalkan formulasi yang bergantung posisi dan momentum, dan beralih ke formulasi gelombang. Untuk mengkarakterisasi sebuah sistem diambil fungsi gelombang atau *state vector* ψ yang disimbolkan dengan notasi

$|\psi(t)\rangle$ = kombinasi linear (superposisi) semua *state* yang mungkin.

Formulasi sistem kuantum sifatnya deterministik dan dapat dinyatakan oleh persamaan diferensial (misalnya persamaan Schrödinger), tetapi pengukuran/pengamatan dalam kuantum bersifat probabilistik sehingga dibutuhkan suatu interpretasi untuk menjembatani keduanya—sangat berbeda dengan dunia klasik yang tidak membedakan antara formulasi dan pengukuran.

2.1.2 Quantum Entanglement

Salah satu konsekuensi lain dari kuantum adalah keterkaitan/keterbelitan kuantum (*quantum entanglement*). Fenomena ini terjadi pada sistem yang terdiri lebih dari satu derajat kebebasan, atau lebih dari satu partikel. *Entanglement* ini terjadi karena dalam kuantum deskripsi sistem, berapapun jumlah partikelnya, harus terkandung dalam fungsi gelombang yang tunggal. Pada dua buah partikel yang berasal dari satu sumber, walaupun terpisah jarak tahunan cahaya, tidak independen; terdapat suatu “realitas bersama” yang mengorelasikan keduanya. Contoh dari *entanglement* kuantum yang paling sederhana adalah *entanglement* antara dua partikel ber-*spin up/down* ($\uparrow/\downarrow$) yang datang dari satu sumber, kita misalkan partikel satu milik Ani dan satunya milik Budi. Keadaan dua partikel tersebut harus dituliskan dalam satu fungsi gelombang bersama, $|\psi\rangle$, dan *entanglement* terjadi ketika fungsi gelombang ini tidak dapat ditulis sebagai perkalian dari keadaan partikel Ani dan Budi secara terpisah, $|\psi\rangle \neq |\text{Ani}\rangle|\text{Budi}\rangle$. Contoh dari keadaan *entanglement* adalah Bell states, yang dua di antaranya berbentuk

$$|\psi_1\rangle = |\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B,$$

$$|\psi_2\rangle = |\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B,$$

Dengan indeks A dan B menandakan partikel tersebut punya Ani/Budi. Perhatikan bahwa terjadi *entanglement* karena masing-masing keadaan di atas tidak dapat ditulis sebagai perkalian dari keadaan Ani saja dan Budi saja. Keadaan $|\psi_1\rangle$ dan $|\psi_2\rangle$ menyatakan bahwa keluaran dari pengukuran salah satu partikel adalah *spin* $\uparrow$ atau $\downarrow$, dengan probabilitas 50:50. Untuk kasus $|\psi_1\rangle$, jika Ani mendapati pengukuran pada partikelnya *spin* $\uparrow$ maka pengukuran

pada partikel Budi pasti (probabilitas = 1) menghasilkan *spin* $\uparrow$ (lihat suku pertama), sebaliknya jika partikel Ani $\downarrow$ maka Budi pasti $\downarrow$ (lihat suku kedua); demikian juga pada keadaan $|\psi_2\rangle$ jika punya Ani $\uparrow$ maka Budi $\downarrow$, dan sebaliknya. Hal ini dapat terjadi bahkan jika Ani dan Budi terpisah puluhan tahun cahaya jauhnya!

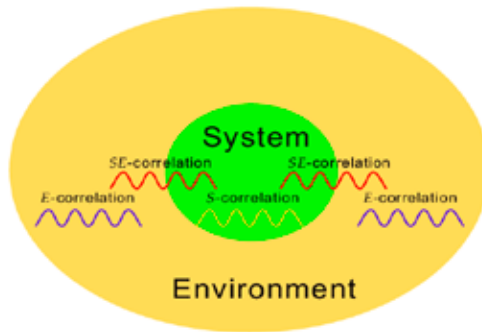
Dari contoh di atas dapat dipahami bahwa korelasi kuantum berbeda dengan korelasi biasa (klasik). Ambil contoh sepasang sepatu yang dipisahkan oleh jarak, Ani memegang salah satu sepatu dan Budi yang lainnya. Jika Ani mendapati sepatunya yang kanan, tentu ia langsung mengetahui bahwa Budi memiliki sepatu yang kiri. Hal ini berbeda jika sepatu kita ganti dengan *spin* partikel, yang dapat eksis dalam bentuk superposisi dua keadaan. Dengan adanya superposisi ini, terdapat ketidakpastian (sebaran probabilitas) pengukuran Ani. Baru ketika Ani melakukan pengukuran, besaran *spin* ini jatuh ke satu keadaan dan Ani dapat menyimpulkan keadaan *spin* Budi. Jika dilakukan berulang kali, secara statistik Ani akan memperoleh sebaran 50:50 untuk *spin up* atau *down*. Akibat dari superposisi dan *entanglement*, korelasi kuantum secara umum lebih kuat dari korelasi klasik dan hal ini mencetuskan ide untuk menggunakan korelasi kuantum sebagai sumber daya untuk teknologi kuantum.

Keanehan dari fenomena *entanglement* menjadi perkara bagi Einstein dkk., kepastian dari hasil pengukuran Budi setelah pengukuran Ani terjadi dalam waktu serentak. Hal ini menurut Einstein bertentangan dengan kausalitas (sebab-akibat) yang merupakan bagian dari teori relativitas. Dalam relativitas, transfer informasi paling cepat dibatasi oleh kecepatan cahaya. Bagaimana kedua partikel Ani dan Budi berkomunikasi satu sama lain jika kejadiannya serentak? Masalah ini disebut dengan paradoks EPR (Einstein-Podolski-Rosen). Menurut EPR, teori kuantum tidak lengkap sebagai teori fisis, karena tidak memenuhi dua elemen:

- Realisme: Besaran-besaran fisis mempunyai nilai sebelum diukur (pengukuran tidak mengubah/level klasik).
- Lokalitas (kecepatan informasi $v \leq c$): Pengukuran partikel Ani harusnya tidak bergantung pada pengukuran di kotak Budi.

Oleh karena itu menurut EPR, perlu ada variabel lain yang tersembunyi, *hidden variable*, yang mengatur efek nonlokalitas dari

teori tersebut. *Hidden variable* harus ditambahkan untuk deskripsi sistem kuantum supaya dapat menjelaskan *entanglement* tanpa aksi jarak jauh (*spooky-action-at-a-distance*). Namun nyatanya pada 1981 fenomena *entanglement* telah terbukti secara eksperimen melalui fenomena teleportasi kuantum. Hal ini mengindikasikan bahwa *hidden variable* yang lokal itu tidak ada. Sampai kini teori beberapa *hidden variable* nonlokal masih berkembang dan upaya mencari celah bagi eksperimen-eksperimen *entanglement*.



Gambar 2.2 Skema sistem kuantum terbuka

2.2 SISTEM KUANTUM TERBUKA

Kita telah membahas sistem kuantum yang terdiri dari dua partikel. Nyatanya, sebuah sistem pasti berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya, baik klasik maupun kuantum. Hal ini menambah jumlah partikel dan derajat kebebasan bagi permasalahan yang sedang ditinjau. Ingat bahwa kompleksitas sistem kuantum meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya derajat kebebasan. Tentu perhitungan akan menjadi terlalu rumit untuk memperoleh hasil yang berarti. Formulasi sistem kuantum terbuka mempartisi sistem banyak partikel ini menjadi sistem, yang dinamikanya penting untuk ditinjau, dan lingkungan, yakni sisanya. Formulasi ini secara signifikan mereduksi kompleksitas perhitungan dan telah mengiringi perkembangan teknologi kuantum dalam beberapa dekade terakhir.

Sistem kuantum sangat sensitif terhadap gangguan lingkungan. Bahkan untuk sistem dengan temperatur orde miliKelvin pun pada skala waktu tertentu koherensi atau sifat gelombang (superposisi) akan hilang. Fenomena ini disebut dengan dekoherensi. Secara

umum, interaksi lingkungan berpengaruh signifikan pada sistem dan menghasilkan disipasi, sehingga sebagian informasi dari sistem bocor ke lingkungan. Hal ini juga berarti lingkungan berperan sebagai pengukur, yang memonitor sebuah sistem kuantum. Dari sudut pandang teori informasi, informasi yang bocor ini diukur oleh produksi entropi yang keluar dari sistem. Seiring berjalannya waktu, korelasi kuantum sistem-lingkungan meningkat; lihat Gambar 2.2.

Pengaruh lingkungan inilah yang menjadi masalah utama dari teknologi kuantum, yakni rapuhnya sistem kuantum terhadap pengaruh eksternal, dengan kata lain, fluktuasi termal dan interaksi dengan lingkungan yang menyebabkan disipasi dan dekoherensi. Kebanyakan eksperimen kuantum berada pada suhu dingin ekstrim mendekati 0 K demi meminimalkan gangguan lingkungan. Oleh karena itu, setiap pemodelan realistik harus memasukkan faktor interaksi lingkungan. Namun secara teoretis, formulasi sistem kuantum "terbuka" ini sangat menantang dan banyak aproksimasi untuk berbagai ranah parameter yang perlu diperhatikan validitasnya.

Bagaimana memodelkan lingkungan kuantum dan interaksinya dengan sistem? Tentunya sebuah lingkungan (*reservoir*) umumnya sangat besar dibandingkan dengan sistem. Masalahnya, dalam formulasi kuantum basis fungsi gelombang jumlahnya meningkat secara eksponensial; 2^N untuk sistem N -qubit. Sehingga kompleksitas untuk menggambarkan dinamika ribuan partikel lingkungan tak terbayangkan. Oleh karena itu diperlukan pendekatan statistik, yaitu dengan menggunakan formulasi matriks densitas $\rho = \sum_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|$ (*mixed state*), dengan masing-masing $|\Psi_i\rangle$ adalah suatu keadaan kuantum (*pure state*) yang evolusinya diberikan oleh persamaan Schrödinger. Dengan menggunakan formulasi ini, kita dapat mengaproksimasi evolusi dari suatu sistem, yang didefinisikan sebagai subsistem dari sistem yang lebih besar—dalam hal ini kompleks sistem-lingkungan. Evolusi sistem dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan master, yang mendeskripsikan bagaimana elemen dari matriks densitas berubah terhadap waktu. Salah satu persamaan master yang besar kegunaannya dalam teori sistem kuantum terbuka adalah persamaan Lindblad (Gorini–Kossakowski–Sudarshan–Lindblad) [1,2],

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [H_S, \rho_S] + \sum_n \left(V_n \rho_S V_n^\dagger - \frac{1}{2} (\rho_S V_n^\dagger V_n + V_n^\dagger V_n \rho_S) \right),$$

dengan H_S adalah Hamiltonian sistem (operator total energi sistem) dan V_n disebut operator Lindblad, yang menjelaskan semua pengaruh interaksi lingkungan. Persamaan master ini diturunkan melalui aproksimasi Born-Markov dari Hamiltonian total $H = H_S + H_L + H_{LB}$ dengan H_L Hamiltonian lingkungan dan H_{LB} untuk interaksi sistem-lingkungan. Secara total, sistem-lingkungan tetap berevolusi uniter, mengikuti persamaan Schrödinger, namun secara parsial, sistem atau lingkungan saja, evolusinya non-uniter. Suku pertama di sebelah kanan menjelaskan evolusi uniter (Schrödinger) dan suku kedua, di dalam kurung, menjelaskan evolusi nonuniter akibat pengaruh interaksi lingkungan.

Persamaan di atas bersifat Markovian, tidak ada ketergantungan waktu secara eksplisit pada kedua ruas, yang artinya laju perubahan sistem pada waktu sekarang $\rho(t)$ tidak dipengaruhi oleh waktu-waktu sebelumnya, $t' < t$. Akibatnya, dalam aproksimasi ini lingkungan tidak menyimpan memori jejak interaksi dengan lingkungan. Persamaan ini cukup sederhana dan terbukti sangat berguna untuk banyak bidang riset, mulai dari *quantum optics*, *quantum information*, *quantum cosmology*, sampai dengan *quantum biology*.

2.3 APLIKASI SISTEM TERBUKA PADA TRANSPOR KUANTUM

Telah dijelaskan bagaimana peran dari lingkungan pada sebuah sistem kuantum realistik. Berikutnya adalah bagaimana formalisme tersebut diterapkan untuk menelaah fenomena penting dalam kuantum dan fisika secara umum. Salah satu fenomena fundamental dalam sebuah sistem, baik klasik maupun kuantum, adalah transpor partikel dan energi. Fenomena transpor mendasari perancangan divais klasik maupun kuantum, seperti komponen elektronika: semikonduktor, resistor, dll., sampai dengan termoelektrik dan mesin kalor. Perbedaan mendasar di antara transpor klasik dan kuantum adalah, pada transpor klasik partikel keberadaannya bersifat terlokalisasi dan bergerak secara balistik, sementara pada

transpor kuantum partikel bersifat gelombang, yang posisinya tidak pasti. Teori kuantum memberikan distribusi probabilitas persebaran posisi partikel. Puncak dari fungsi probabilitas inilah yang secara klasik kita sebut sebagai “partikel”. Namun jumlah dari puncak ini tidak dibatasi, dapat lebih dari satu, yang artinya partikel dapat berada di banyak tempat (sebelum diukur/diganggu lingkungan).

- 1 Sifat gelombang inilah yang membuat transpor kuantum bersifat distributif. Akibatnya, partikel kuantum, yang direpresentasikan dalam fungsi probabilitas, dapat bergerak lebih cepat dan memenuhi tempat yang lebih besar dibandingkan dengan partikel klasik yang bergerak dalam sebuah sistem. Kuantitas yang dapat dipakai untuk menentukan kualitas transpor misalnya arus partikel dan konduktivitas.
- 2 Contoh dari transpor partikel secara klasik dapat ditemukan pada elektron yang berdifusi dalam sebuah resistor, atau untuk kasus transpor energi (kalor), pada bak pemandian air panas. Sementara untuk transpor kuantum, misalnya pada transistor elektron tunggal (*single electron transistor*). Pada sistem-sistem transpor tersebut, umumnya energi atau partikel dipasok pada satu ujung dan dikeluarkan pada ujung lainnya. Hal ini menimbulkan sebuah arus tunak yang bersifat nonequilibrium. Arus inilah yang mengkarakterisasi sebuah sistem transpor.
- 3 Secara teoretis, fenomena transpor kuantum dapat dimodelkan dalam teori sistem kuantum terbuka, yakni deskripsi untuk sistem kuantum yang berinteraksi dengan sebuah atau beberapa lingkungan (yang bersifat kuantum juga). Sistem transpor dapat dimodelkan dengan beberapa sistem dua-keadaan (qubit)—sistem kuantum paling sederhana—yang saling terhubung. Beberapa dari qubit tersebut dihubungkan dengan lingkungan eksternal berupa tandon partikel atau tandon termal. Dari sini dapat dihitung arus nonequilibrium baik secara analitik maupun numerik.

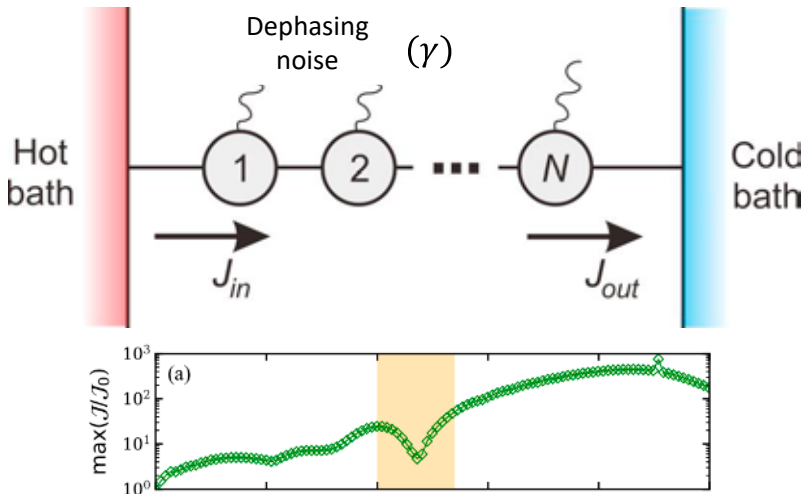
2.3.1 Efektivitas Noise dalam Meningkatkan Transpor Kuantum

Menariknya, pada sistem kuantum gangguan derau (*noise*) akibat fluktuasi, yang berasal dari interaksi sistem-lingkungan, tidak selalu berdampak buruk. Pada beberapa keadaan dengan kekuatan kopling

menengah *noise* justru dapat meningkatkan performa sistem. Contohnya pada proses fotosintesis: tanaman dan alga diduga menjalankan eksitasi situs kromofor (dipicu oleh cahaya matahari) secara koheren, bersifat gelombang dan terdelokalisasi dengan ukuran beberapa situs alih-alih seperti partikel klasik [3]. Pada sistem tersebut gangguan lingkungan amat besar karena suhu operasinya di atas temperatur ruangan—*warm, wet, noisy* [4]. *Noise* dari fluktuasi energi (*dephasing*) pada sistem ini justru meningkatkan efisiensi transpor eksitasi tersebut dan secara teoretis dapat mencapai hampir 100% [5]. Fenomena ini disebut dengan transpor kuantum dibantu-lingkungan (*environment-assisted quantum transport/ENAQT*). Sebagai catatan, sekarang status dan utilitas dari eksitasi koheren pada fotosintesis masih menjadi perdebatan secara eksperimen [6]. Walau demikian, fenomena naiknya efisiensi akibat *noise* ini sangat bermanfaat dan telah didemonstrasikan secara eksperimen [7]. Fenomena dan mekanisme ENAQT dapat membantu pengembangan simulasi kuantum, yaitu memakai eksperimen kuantum (perangkat yang sama dengan yang digunakan untuk simulator kuantum) untuk menyimulasikan sistem lain yang kompleks yang tidak dapat diakses secara komputasional ataupun eksperimental.

- 1 Mekanisme apakah yang mengizinkan *noise* untuk meningkatkan kualitas transpor pada ENAQT? Sifat dari sebuah sistem kuantum yang adalah osilasi koheren antara suatu keadaan eksitasi dengan keadaan dasarnya, atau dalam kasus transpor pada kisi, osilasi antara situs awal dengan situs tetangganya. Dalam kisi yang mengandung ketidakteraturan energi (*disorder*), osilasi ini tertahan akibat fenomena lokalisasi Anderson. Lokalisasi ini dapat dipandang sebagai interferensi destruktif yang menahan probabilitas partikel untuk bergerak bebas dalam sistem. Tentunya hal ini berdampak negatif untuk transpor; pada keadaan ekstremnya partikel tidak bergerak sama sekali sehingga tidak ada transpor. Salah satu *noise* kuantum, yakni hilangnya koherensi fasa gelombang partikel atau *dephasing*, dapat memecah lokalisasi ini dan membuat partikel berjalan. Hal inilah yang mendasari ENAQT. Namun, *noise* yang terlalu tinggi akan berakibat peluruhan pada koherensi kuantum yang ekstrim sehingga sistem kehilangan “kekuantumannya” yang menjadi

- aset unggulnya sebuah transpor kuantum dibandingkan dengan transpor klasik.
- 2 Walau demikian, ENAQT juga masih mungkin bahkan untuk sistem “bersih” tanpa *disorder* [8]. Keberadaannya sangat bergantung dengan topologi sistem, situs tempat bermula, dan situs tujuan transpor. Oleh karena itu, mekanisme yang telah dinyatakan sebelumnya tidak berlaku umum. Kemudian ditemukan bahwa penjelasan yang lebih umum untuk ENAQT adalah kemampuan *dephasing noise* untuk meratakan probabilitas partikel pada seluruh sistem. Pemerataan maksimum berkorelasi dengan efisiensi ENAQT maksimum [9].

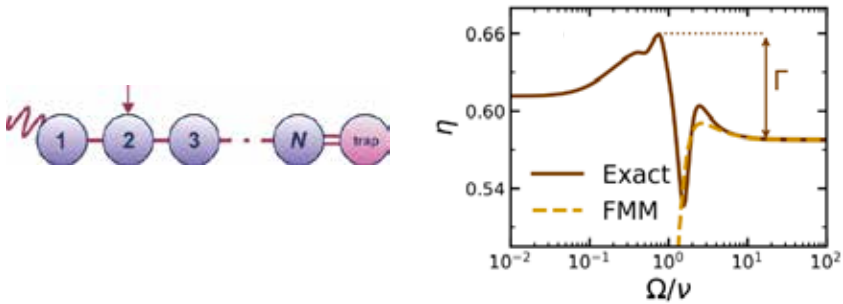


Gambar 2.3 (Atas) skema transpor kuantum dibantu *dephasing noise* dengan arus keluar J_{out} sebagai kuantitas transpor energi.

Skema ini juga bisa menjadi mesin termodinamis kuantum sederhana. (Bawah) hasil penguatan ENAQT maksimum (vs. parameter *disorder* pada sumbu- x) yang dapat mencapai sekitar 400 kali dibandingkan dengan tanpa *dephasing* [10].

Oleh karena itu, aspek penting yang kami rasa menarik untuk dikaji pada sistem transpor ini adalah pengaruh dari *disorder* tersebut pada ENAQT. Selain itu, terdapat juga fenomena penting pada kisi dengan potensial *disorder*: lokalisasi yang bergantung energi. Misalnya, untuk partikel berenergi tinggi sifatnya akan terlokalisasi dan ketika energinya berkurang sampai menyentuh suatu ambang,

sifatnya akan menyebar (delokalisasi). Ambang energi ini disebut dengan *mobility edge* (ME). Kami menemukan bahwa keberadaan ME ini dapat menguatkan transpor secara signifikan, dan dengan keberadaan *dephasing*, ENAQT dapat diperkuat hingga ratusan kali lipat [10]; lihat Gambar 2.3. Penemuan ini penting untuk desain simulasi kuantum dan divais kuantum yang bersangkutan dengan fenomena transpor energi dan partikel.

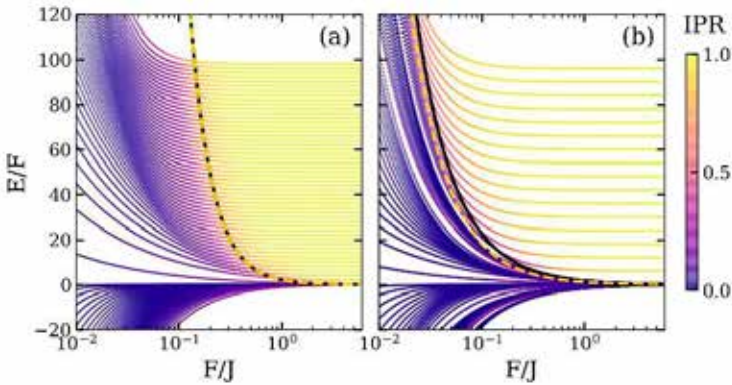


Gambar 2.4 (Kiri) skema sistem transpor kuantum dibantu oleh medan periodik eksternal; eksitasi dimulai pada qubit 2 dan ditangkap oleh situs *trap*. (Kanan) efisiensi η vs. frekuensi gaya luar Ω

Nampak terdapat keuntungan efisiensi sebanyak Γ akibat penerapan gaya luar yang periodik pada sistem qubit. Namun, efisiensi juga bisa lebih rendah pada frekuensi lainnya [11]. Selain itu, kami juga meninjau aspek lain yang signifikan dalam rekayasa kuantum, yakni kebergantungan waktu. Umumnya jika kita ingin mengontrol sebuah sistem kuantum, diperlukan sebuah medan periodik (misalnya laser) yang diterapkan pada sebagian dari sistem. Ternyata keberadaan medan periodik dapat meningkatkan efisiensi sistem dalam konteks ENAQT, bahkan tanpa keberadaan *dephasing* [11]. Implikasi dari fenomena ini sangat penting karena dengan menerapkan suatu medan eksternal yang periodik pada sebagian kisi saja, kita dapat mengontrol kecepatan dari transpor partikel. Namun, tidak hanya menaikkan efisiensi, medan eksternal juga dapat menurunkannya pada ranah frekuensi medan yang lain; lihat Gambar 2.4. Tentunya hal ini tidak selalu harus diartikan buruk karena pada banyak kasus rekayasa kuantum, diperlukan kemampuan untuk mengontrol kecepatan transpor partikel.

2.4 MODEL BARU UNTUK KISI DENGAN *DISORDER*

Ketika menelaah fenomena transisi lokalisasi (keberadaan ME) pada sistem kisi kuantum dengan *disorder*, muncul sebuah pertanyaan: apakah keberadaan *disorder* merupakan “resep” yang harus ada untuk memunculkan transisi lokalisasi bergantung energi pada sebuah sistem kuantum? Kami menemukan bahwa jawabannya adalah tidak dengan cara mengonstruksi sebuah model baru tanpa *disorder* yang nyatanya dapat memunculkan transisi lokalisasi dan ME [12].



Gambar 2.5 Mobility edge (ME) pada model rujukan [12] yang dapat dihasilkan tanpa disorder

Model ini sangat sederhana, yakni sebuah sistem kisi 1 dimensi yang bersih (tanpa *disorder*) yang dikenakan dengan sebuah gaya eksternal konstan. Gaya ini bisa berasal dari medan listrik seperti pada kasus efek Stark. Namun gaya ini hanya diterapkan pada tempat-tempat tertentu saja, yakni pada setiap κ buah kisi-kisi seperti ini disebut dengan kisi mozaik. Pada model ini muncul ambang energi ME (Gambar 2.5), yang membatasi antara keadaan partikel terlokalisasi dan ergodik (delokalisasi).

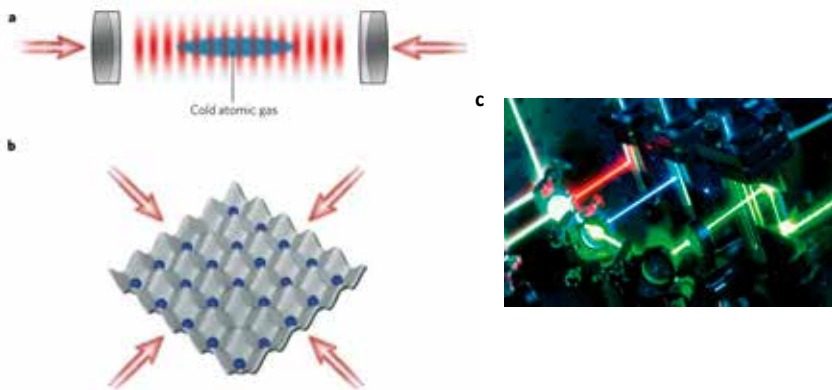
Model ini dapat direalisasikan dengan berbagai cara pada simulator kuantum, misalnya dengan menggunakan spin-spin sebagai rantai qubit dan medan yang sensitif dengan keadaan spin tertentu, sehingga yang terkena gaya hanya *spin* tertentu saja. Dapat pula dengan menggunakan *superlattice* (kisi kristal dengan lebih dari satu material pada tiap titiknya) di mana salah satu material penyusunnya tidak bermuatan listrik (netral).

2.4.1 Realisasi Eksperimen: Simulator Kuantum

Richard P. Feynman pada dekade 1980 telah mengemukakan bahwa untuk menyimulasikan sistem kuantum secara efektif kita perlu komputer atau aparatus yang bersifat kuantum juga—dengan kalimatnya yang tenar “*there’s plenty of room at the bottom*” (masih banyak ruang di dunia [kuantum] di bawah sana yang sangat besar). Idenya telah mulai diejawantahkan sejak awal abad ke-21 ini sebagai simulator kuantum.

Terdapat 2 klasifikasi simulator kuantum: digital, yaitu komputer kuantum, dan analog, yaitu sebuah sistem kuantum artifisial yang dibuat di lab dan memiliki derajat kontrol yang tinggi. Simulator analog dapat menyimulasikan sistem kuantum lain yang lebih kompleks atau yang tidak dapat diakses langsung dengan parameter sistem dan lingkungan yang dapat diatur. Contoh kegunaannya, adalah merevolusi kimia kuantum dalam mensimulasikan dinamika molekul—simulasi molekul yang ada sekarang umumnya terbatas untuk keadaan dengan aproksimasi tertentu pada kimia kuantum untuk sistem banyak partikel.

Fenomena transpor dan banyak fenomena kuantum lainnya sekarang telah dapat direalisasikan secara eksperimen. Sejak awal abad ke-21, ide Feynman tentang simulator kuantum telah berhasil direalisasikan pada beberapa eksperimen lab dengan ketelitian dan derajat kontrol yang luar biasa. Contoh dari simulator kuantum yang telah direalisasikan, di antaranya, adalah rantai atom suhu ultrarendah (sub-miliKelvin), perangkap ion, rangkaian *quantum dots*, rangkaian pandu gelombang, dan sirkuit superkonduktor. Semua simulator kuantum ini pada prinsipnya sama yaitu merealisasi beberapa *qubit* yang saling terhubung dan melakukan operasi-operasi kuantum. Sejak adanya simulator kuantum, peneliti di bidang ini, baik eksperimental maupun teoretis, dapat bekerja sama secara efektif dan kecocokan antara perhitungan teoretis dan simulasi numerik dengan eksperimen sangat mencengangkan.



Gambar 2.6 (a) skema simulator kuantum berbasis *ultra-cold atoms* pada kisi optik 1 dimensi yang dibentuk oleh superposisi laser. (b) dengan menambahkan laser pada arah lainnya, kisi optik 2 dimensi dapat dibentuk. (c) contoh perangkat eksperimen optika kuantum yang dapat digunakan untuk merealisasikan *ultra-cold atoms* [14].

Salah satu platform simulator kuantum yang sangat menjanjikan adalah *ultra-cold atoms*, yaitu atom pada suhu rendah ekstrem (sub-miliKelvin) pada kisi optis yang dibentuk oleh laser (Gambar 2.6). Sistem ini dapat menyimulasikan dinamika kuantum untuk sistem *spin*, *fermion*, dan *boson* (model Bose- atau Fermi-Hubbard). Karena fleksibelnya sebuah kisi optis dalam menggunakan medan periodik dan *superlattice*, simulasi yang canggih dapat direalisasikan, misalnya simulasi dari *lattice gauge theory*.

Fenomena ENAQT dan kebergantungannya pada medan periodik, *disorder*, dan ME pun dapat direalisasikan pada *ultra-cold atoms*. Kita dapat melihat bagaimana kesesuaian antara prediksi teoretis dan hasil eksperimen. Lebih jauh lagi, pada simulator kuantum kita dapat mengamati fenomena yang terlalu berat untuk disimulasikan bahkan dengan superkomputer (yang tentunya belum komputer kuantum), yakni pengaruh interaksi antarpartikel atau *many-body physics*. Seperti yang telah dipaparkan di atas, untuk meninjau dinamika sistem kuantum secara eksak, kompleksitasnya meningkat secara eksponensial seiring penambahan partikel. Namun, dengan simulator kuantum, hal ini dapat diatasi secara eksperimen. Akan tetapi, akurasi dan derajat kontrol dari simulator ini sampai saat ini masih menjadi topik riset yang sangat berkembang.

Tentunya negara kita perlu bersumbangsih tidak hanya pada ranah teori dan simulasi numerik, tetapi juga pada eksperimennya.

Memang eksperimen kuantum suhu rendah dan vakum sangat mahal, tetapi masalah sumberdaya ini tidak bisa dijadikan alasan karena terdapat juga realisasi sistem kuantum lain yang tidak membutuhkan suhu rendah. Misalnya dengan menggunakan *defect* kristal seperti *Nitrogen-vacancy center* sebagai realisasi *qubit* yang bahkan dapat dikerjakan pada suhu ruang.

2.4.2 Prospek Teknologi Masa Depan: Mesin Termodinamika Kuantum

Layaknya evolusi industri yang dimulai dengan mesin termodinamis seperti mesin uap, komunitas kuantum kini tengah mengembangkan cara untuk mengekstrak sumberdaya termodinamis dari koherensi kuantum. Hal ini memunculkan sebuah bidang ilmu baru yaitu termodinamika kuantum. Berbeda dengan termodinamika klasik, pada kuantum terdapat keadaan (*state vector*) dan operator dan masalah pengukurannya untuk mengekstrak informasi kuantum. Termodinamika berbicara tentang sistem banyak partikel dan kemunculan dari besaran makroskopik yang diakibatkan dari dinamika subsistem partikel mikroskopik penyusunnya. Hubungan antara keduanya pada sistem kuantum masih menjadi masalah terbuka sejak awal kemunculan teori kuantum sampai sekarang. Terutama dengan terealisasinya simulator kuantum pada masa kini, integrasi antara teori dan eksperimen membuat riset ini lebih menarik lagi dan dapat berkembang ke arah-arrah yang tidak terprediksi sebelumnya.

Kesuksesan termodinamika dalam menjelaskan sistem skala besar adalah menjelaskan fenomena kesetimbangan (*equilibrium*) dan keadaan tunak (*steady state*) dengan sedikit parameter seperti suhu dan jumlah partikel. Munculnya keadaan setimbang dalam kuantum secara makroskopik didasari oleh sebuah konjektur termalisasi, yaitu *eigenstate thermalisation hypothesis* (ETH) [15]. Setelah waktu yang sangat lama, besaran lokal pada lokasi manapun di sistem tidak terbedakan dengan keadaan setimbang pada termodinamika—berlaku untuk sistem yang besar. Namun untuk beberapa sistem, ETH dapat dilanggar sehingga sistem tidak pernah berada pada keadaan setimbang. Contohnya adalah pada fenomena *many-body localization*, yaitu sistem akan terus terlokalisasi, misal,

akibat adanya *defect* atau medan luar periodik. Sistem-sistem yang dikenai medan periodik, sistem kuantum dapat menjaga keadaan nontermal tersebut untuk waktu yang sangat lama, bahkan sepadan dengan umur alam semesta. Contoh lainnya adalah pada sistem-sistem yang hampir integrabel (memiliki solusi eksak).

Dari fenomena termalisasi pada termodinamika kuantum terdapat banyak pelajaran yang dapat diambil untuk rekayasa mesin kuantum. Di samping itu, sebuah mesin harus dapat mengekstrak usaha dan daya pada setiap siklusnya. Namun pendefinisian usaha itu sendiri pun, dan berapa limit usaha yang dapat diekstrak dari sebuah sistem, masih menjadi topik riset yang hangat pada termodinamika kuantum. Tentunya ini menjadi peluang besar bagi kita untuk berpartisipasi pada kajian tersebut.

2.5 TERMODINAMIKA LUBANG HITAM

Setelah membahas lebih dalam tentang termodinamika pada sistem kuantum, kita juga bisa membahas termodinamika pada sistem lain, yaitu pada lubang hitam. Keberadaan benda masif yang sangat rapat di alam semesta ini memberikan kunci penting bagi kita untuk mempelajari teori gravitasi kuantum karena sifatnya yang sangat ekstrem. Setelah ditelaah lebih lanjut oleh Bekenstein dan Hawking, lubang hitam memiliki entropi dan temperatur. Dalam sistem termodinamika biasa, entropi menghitung jumlah derajat kebebasan yang dapat kita akses. Pertanyaan berikutnya yang muncul adalah, dalam sistem lubang hitam ini, derajat kebebasan apa yang dihitung oleh entropi lubang hitam? Upaya untuk menjawab pertanyaan tersebut menjadi sangat penting karena perlu melibatkan aspek kuantum dari teori gravitasi Einstein (teori relativitas umum) yang menjelaskan tentang lubang hitam.

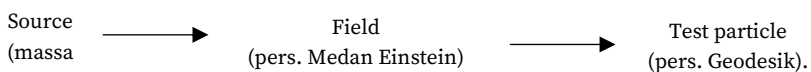
2.5.1 Pengantar Singkat Teori Relativitas Umum

Berangkat dari prinsip ekuivalensi, pada tahun 1916, Albert Einstein merumuskan teori relativitas Umum untuk menjelaskan fenomena yang kita alami sehari-hari, yaitu gravitasi. Prinsip ekuivalensi menyatakan bahwa pengamat yang berada di kerangka jatuh bebas di bawah pengaruh medan gravitasi itu ekuivalen/sama dengan

pengamat yang berada di kerangka diam di ruang hampa. Di sisi lain, pengamat yang berada di dalam kerangka yang dipercepat dengan percepatan $a = g$ ke atas itu ekuivalen/sama dengan pengamat yang diam di atas permukaan bumi dengan percepatan gravitasi g ke arah bawah. Apabila ditelaah lebih jauh lagi, konsekuensi dari prinsip ekuivalensi adalah teori gravitasi menggambarkan struktur kelengkungan geometri ruang-waktu (3 dimensi koordinat ruang dan 1 dimensi koordinat waktu). Geometri yang melengkung ini merupakan geometri non-Euclidean, berbeda dengan geometri Euclidean yang menjelaskan ruang datar 3 dimensi.

Dalam teori relativitas umum, geometri ruang-waktu yang melengkung tersebut terbentuk akibat adanya massa yang berperan sebagai sumber (*source*). Kemudian, partikel yang berada di ruang-waktu tersebut akan bergerak mengikuti lintasan yang bentuk lintasannya ditentukan oleh geometri ruang-waktu tadi. Partikel yang bergerak jatuh bebas (tanpa adanya pengaruh dari gaya luar lain) akan mengikuti lintasan terpendek di antara dua titik, atau yang disebut sebagai lintasan geodesik. Dalam geometri non-Euclidean, lintasan terpendek antara dua titik bukanlah garis lurus. Sebagai contoh, suatu benda yang sangat masif seperti Matahari dapat menjadi sumber yang melengkungkan ruang-waktu di sekitarnya. Kemudian, benda yang ukurannya jauh lebih kecil seperti planet-planet dalam tata surya bergerak mengikuti lintasan geodesik yang dibentuk oleh kelengkungan ruang-waktu tersebut. Dalam kasus ini, planet-planet bergerak mengitari Matahari (gerak revolusi planet).

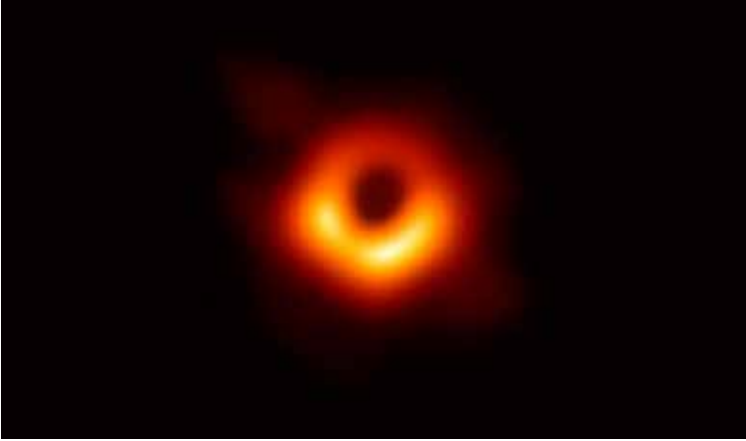
Bentuk geometri ruang-waktu yang melengkung (biasa disebut metrik) merupakan solusi dari persamaan medan Einstein yang menghubungkan bagian materi (massa sumber) dengan bagian geometri (kelengkungan) ruang-waktu. Kemudian, seperti yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya, geometri ruang-waktu menentukan lintasan partikel yang bergerak di ruang-waktu tersebut. Apabila dirumuskan, kita dapat menggambarannya dengan kerangka berikut:



Mengutip pernyataan John Wheeler, “Matter tells spacetime how to curve, Spacetime tells matter how to move”. Prinsip fundamental yang membedakan antara teori gravitasi Einstein (teori relativitas umum) dengan teori gravitasi Newton adalah, pada teori gravitasi Newton, interaksi gravitasi antara benda bermassa terjadi secara simultan atau serentak, sehingga melanggar prinsip kausalitas atau prinsip sebab akibat. Sedangkan, berdasarkan teori relativitas, seharusnya kecepatan paling tinggi (termasuk kecepatan interaksi antar benda bermassa) haruslah kecepatan cahaya. Dalam teori relativitas umum, prinsip kausalitas tetap terjaga dengan baik.

2.5.2 Lubang Hitam sebagai Salah Satu Solusi pada Teori Relativitas Umum

Dalam teori relativitas umum, geometri kelengkungan ruang-waktu diperoleh dari mencari solusi persamaan medan Einstein. Solusi untuk geometri yang memiliki simetri bola dan statik (tidak berotasi) ditemukan oleh Schwarzschild pada tahun 1916, tidak lama setelah Einstein memublikasikan teori relativitas umum. Solusi Schwarzschild dapat dengan baik menjelaskan geometri ruang-waktu di sekitar (di luar) objek masif yang berbentuk bola, seperti contohnya bintang. Dalam solusi tersebut, terdapat kondisi aneh yang memungkinkan adanya singularitas, atau nilai tak-berhingga pada suatu daerah atau lokasi tertentu. Kondisi ini dipenuhi oleh suatu objek yang memiliki kerapatan yang sangat tinggi, melebihi batas Chandrasekar, dan jauh lebih rapat dari objek-objek astronomi lainnya seperti bintang neutron sekalipun. Nilai singular yang muncul dari solusi Schwarzschild berada pada suatu radius tertentu yang dinamakan radius Schwarzschild atau *event horizon* (horizon/cakrawala peristiwa). Di dalam radius ini, seluruh objek (termasuk cahaya) akan selalu bergerak menuju titik pusat dan tidak bisa keluar kembali. Oleh karena itu, objek tersebut tidak dapat memancarkan cahaya sehingga dinamakan “lubang hitam”. Foto lubang hitam pertama berhasil didapatkan oleh kolaborasi Event Horizon Telescope (EHT) pada tahun 2019 [16], yang merupakan foto lubang hitam yang berada di pusat galaksi M87 (lihat Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Foto lubang hitam yang berada pada pusat galaksi M87

Solusi lubang hitam Schwarzschild dikarakterisasi penuh oleh massa dari lubang hitam tersebut. Selain itu, terdapat solusi lain yang menggambarkan solusi lubang hitam yang tidak hanya dikarakterisasi oleh massanya, tetapi juga oleh muatan (listrik atau magnet). Solusi tersebut dinamakan solusi Reissner-Nordström yang dirumuskan sekitar tahun 1916-1918, yang menggambarkan solusi lubang hitam bermuatan. Kemudian, objek fisis lainnya adalah solusi lubang hitam yang berotasi, yang ditemukan oleh Roy Kerr pada tahun 1963. Dalam solusi Kerr, lubang hitam dikarakterisasi oleh massa dan momentum sudutnya. Untuk lubang hitam yang berotasi dan bermuatan sekaligus, solusinya dinamakan solusi Kerr-Newman (1965). Terdapat teorema yang menyatakan bahwa lubang hitam sepenuhnya hanya dapat dikarakterisasi oleh ketiga besaran tersebut, yaitu massa, muatan, dan momentum sudutnya. Teorema ini dinamakan sebagai *no-hair theorem*. Seluruh solusi lubang hitam ini memiliki daerah *event horizon* yang memerangkap seluruh objek (bahkan termasuk cahaya) untuk bisa keluar kembali dari daerah tersebut. Karena keunikannya, event horizon memegang peran yang sangat penting dalam mempelajari lubang hitam, khususnya ketika nanti membahas tentang termodinamika lubang hitam.

Perbedaan antara lubang hitam Schwarzschild, Reissner-Nordström, dan Kerr atau Kerr-Newman, selain pada besaran yang mengkarakterisasinya, adalah pada jumlah *event horizon* lubang hitam tersebut. Sebelumnya sudah dibahas bahwa solusi

Schwarzschild memiliki satu *event horizon*. Dalam solusi Reissner-Nordström dan Kerr, terdapat dua *event horizon*, yaitu *event horizon* luar dan dalam. Pada lubang hitam Schwarzschild, *event horizon* merupakan pemisah daerah “biasa” yang berada di luar lubang hitam (disebut sebagai daerah *timelike*), dengan daerah yang berada di dalam lubang hitam. Di dalam *event horizon*, seluruh partikel (baik bermassa maupun tak-bermassa) tidak dapat bergerak kembali ke luar dan hanya bisa bergerak menuju titik pusat dan daerah ini disebut daerah *spacelike*. Pada lubang hitam Reissner-Nordström dan Kerr yang memiliki dua *event horizon*, kasusnya lumayan berbeda dengan lubang hitam Schwarzschild. Kedua lubang hitam tersebut memiliki *event horizon* luar (dengan jari-jari yang lebih besar) atau *outer horizon* dan *event horizon* dalam (dengan jari-jari yang lebih kecil) atau *inner horizon*. Daerah di luar *outer event horizon* bersifat *timelike*, yang artinya nuansanya tidak berbeda dengan alam semesta yang kita huni sekarang dan daerah di luar *horizon* lubang hitam Schwarzschild. Setelah memasuki *outer event horizon*, daerahnya menjadi *spacelike* dan seluruh partikel yang berada di sana hanya dapat bergerak menuju *inner event horizon* dan tidak dapat kembali ke luar (menuju *outer horizon*). Akan tetapi, setelah memasuki *inner horizon*, daerahnya kembali bersifat *timelike*, yang artinya partikel dapat bergerak menuju ke titik singularitas di pusat, atau bahkan kembali lagi ke luar *inner horizon*. Apabila partikel memilih untuk bergerak kembali ke luar *inner horizon*, partikel memasuki daerah *spacelike* yang mengharuskan ia tetap bergerak menuju *outer horizon*, dan akhirnya keluar dari lubang hitam tersebut.

Sampai saat ini, tidak ada yang tahu apakah daerah di luar *outer horizon* setelah kita kembali ke luar dari dalam lubang hitam dengan dua *horizon* tersebut sama dengan alam semesta yang kita huni sebelum memasuki lubang hitam, atau alam semesta yang berbeda (paralel). Yang pasti adalah, kita (atau partikel) kembali berada di daerah yang bersifat *timelike*. Hal menarik lainnya dari geometri lubang hitam adalah, secara matematis, geometri lubang hitam dapat diperluas menjadi dua daerah yang bersifat *timelike* dan terpisah oleh *horizon* lubang hitam. Menariknya, apabila digambarkan, geometri tersebut berbentuk seperti suatu lubang yang sering disebut sebagai lubang cacing atau *wormhole*. Sebut saja kedua daerah yang terpisah

tadi dinamakan daerah A dan B. Kedua daerah tersebut terpisah secara kausal sehingga tidak ada komunikasi yang dapat dilakukan oleh pengamat yang berada di daerah A dengan daerah B.

2.5.3 Termodinamika Lubang Hitam

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, secara klasik, tidak ada partikel yang dapat keluar dari dalam lubang hitam setelah melintasi *horizon*, karena daerah tersebut bersifat *spacelike*. Akan tetapi, apabila kita meninjau efek kuantum yang terjadi di sekitar lubang hitam (seperti efek *tunneling*), ternyata partikel bisa keluar dari lubang hitam dalam bentuk radiasi. Fenomena ini pertama kali dirumuskan oleh Hawking pada tahun 1975 [17] dan sampai sekarang terkenal sebagai fenomena radiasi Hawking. Karena lubang hitam meradiasikan emisi, maka kita juga dapat menghitung temperatur dari lubang hitam tersebut. Hawking menunjukkan bahwa temperatur lubang hitam berbanding terbalik dengan massanya. Artinya, semakin besar lubang hitam, justru temperaturnya semakin rendah, begitu pula sebaliknya. Sebelumnya, Bekenstein pada tahun 1972 [18] menunjukkan bahwa ternyata kita dapat memperoleh persamaan yang mirip dengan persamaan Hukum I Termodinamika yang menjelaskan tentang kekekalan energi dan menghubungkan besaran-besaran seperti entropi, temperatur, dan energi (massa). Dari perumusannya tersebut, diperoleh entropi lubang hitam yang ternyata sebanding dengan luas permukaan *event horizon*, dengan simbol “BH” berarti entropi “Bekenstein-Hawking” dan G_N merupakan konstanta gravitasi universal Newton. Pada awalnya, penemuan ini cukup membingungkan karena sejatinya, entropi pada termodinamika merupakan besaran ekstrinsik dan sebanding dengan volume dari sistem yang sedang ditinjau, bukan luas permukaannya.

$$S_{BH} = \frac{\text{Area of Horizon}}{4G_N},$$

Sampai dengan saat ini, pembahasan terkait entropi dan termodinamika lubang hitam masih menjadi pembahasan yang sangat penting dan merupakan topik hangat penelitian di bidang fisika teori. Sebab, mempelajari entropi lubang hitam dapat menjadi kunci krusial dalam mempelajari teori gravitasi kuantum, yang sampai

sekarang masih belum terpecahkan sepenuhnya. Dalam termodinamika dan mekanika statistik, secara mikroskopik, entropi merupakan suatu besaran yang menghitung jumlah *microstate* yang dapat diakses (dalam skala logaritmik). Hal yang merupakan pertanyaan besar dalam termodinamika lubang hitam adalah: “*microstate* apa yang dihitung oleh entropi lubang hitam secara mikroskopik?”. Beberapa upaya untuk menjawab pertanyaan tersebut telah dikemukakan oleh fisikawan dalam kurun waktu 3 dekade terakhir. Akibat entropi yang sebanding dengan area (satu dimensi lebih rendah dari volume), muncul teori hologram atau holografi yang menjelaskan reduksi dimensi tersebut [19,20]. Teori ini kemudian dikembangkan dan dirumuskan secara eksplisit oleh Maldacena pada tahun 1997 [21] yang disebut sebagai korespondensi *Anti-de Sitter* dan *Conformal Field Theory* atau AdS/CFT. Korespondensi tersebut menjelaskan bahwa teori medan konformal (teori medan kuantum yang invarian terhadap transformasi konformal) dengan dimensi d sama dengan teori gravitasi dengan kurvatur negatif (*Anti-de Sitter*) dengan dimensi $d+1$.

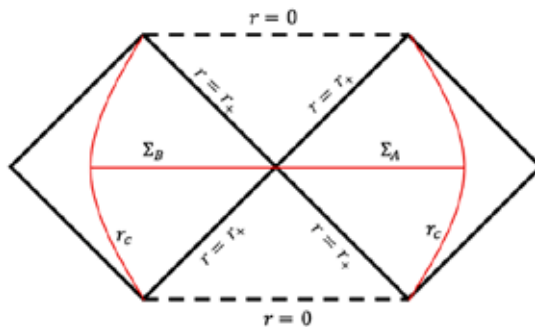
Dari teori holografi tersebut, diduga bahwa entropi lubang hitam menghitung jumlah *microstate* yang dapat diakses pada suatu teori kuantum yang dimensinya satu dimensi lebih rendah (karena area pada dimensi $d+1$ merupakan volume pada dimensi d). Hal ini ditunjukkan secara eksplisit oleh Solodukhin pada tahun 1999 [22] pada lubang hitam Schwarzschild dengan menunjukkan bahwa di daerah di sekitar horizon terdapat simetri konformal dan apabila diasosiasikan dengan suatu teori medan konformal dan dihitung entropinya, hasilnya sama dengan entropi Bekenstein-Hawking. Kemudian, tinjauan tersebut diperluas untuk lubang hitam berotasi atau Kerr, yang disebut sebagai korespondensi Kerr/CFT [23]. Upaya untuk menjelaskan entropi lubang hitam secara mikroskopik memberikan wawasan yang menarik tentang aspek kuantum dari teori gravitasi.

2.5.4 Entropi Entanglement dan Holografi

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa entropi yang menghitung derajat kebebasan yang dapat diakses pada suatu teori medan kuantum (CFT) dapat digunakan untuk menjelaskan entropi lubang hitam. Namun, ternyata entropi lubang hitam yang sebanding

dengan luas permukaan dapat ditinjau lebih jauh lagi dan dikaitkan dengan besaran entropi lainnya, yaitu entropi *entanglement*. Fenomena *entanglement* merupakan suatu fenomena yang muncul pada fisika kuantum dan tidak ada padanan klasiknya. Misalkan terdapat dua sistem kuantum A dan B yang saling terikat atau *entangled* dan kita sebagai pengamat hanya punya akses ke salah satu sistem, katakanlah sistem A, karena A dan B terpisah secara kausal. Entropi muncul karena adanya *ignorance* terhadap sistem B yang tidak dapat diakses. Entropi tersebut dinamakan entropi *entanglement* dan nilainya positif apabila sistem A dan B terikat atau *entangled*, dan nilainya nol apabila sistem A dan B tidak *entangled*. Oleh karena itu, entropi *entanglement* dapat digunakan untuk mengukur *entanglement* pada suatu sistem.

Menghitung entropi *entanglement* untuk suatu sistem kuantum merupakan pekerjaan yang sangat rumit, apalagi ketika sistem kuantum tersebut memiliki derajat kebebasan yang sangat besar. Akan tetapi, Ryu dan Takayanagi [24,25] menunjukkan bahwa ternyata entropi *entanglement* dapat dihitung dengan menggunakan korespondensi AdS/CFT dan memberikan hitungan yang secara signifikan lebih sederhana dengan menggunakan metode yang dinamakan “trik replika”. Menariknya lagi, entropi *entanglement* pada korespondensi AdS/CFT sebanding dengan suatu luas permukaan pada geometri Anti-de Sitter. Hal ini mengingatkan kita pada entropi lubang hitam (Bekenstein-Hawking) yang juga sebanding dengan suatu luas permukaan. Penemuan ini menimbulkan pertanyaan menarik, yaitu apakah entropi lubang hitam sebenarnya mengukur derajat *entanglement* dari suatu sistem kuantum?



Gambar 2.8 Ilustrasi diagram lubang hitam Schwarzschild

Bagian kanan adalah daerah A dan bagian kiri adalah daerah B. Garis hitam silang di tengah merupakan lokasi $r = r_+$ atau horizon yang memisahkan daerah A dan B. Garis $r = 0$ menggambarkan titik singularitas.

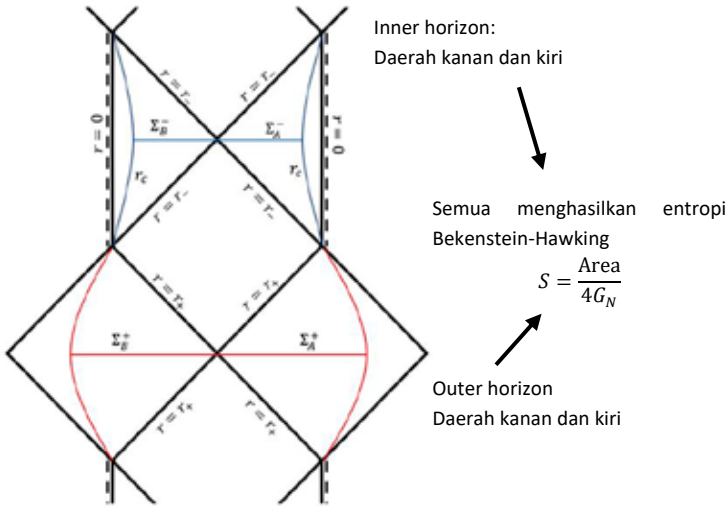
2.5.5 Lubang Hitam dan Entropi Entanglement

Untuk melihat *entanglement* pada geometri lubang hitam, kita perlu meninjau geometri lubang hitam sebagai suatu “medan kuantum” yang dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah A dan daerah B yang saling terikat atau *entangled*. Meskipun kita tidak bisa mengatakan bahwa latar belakang geometri tersebut sebagai suatu medan kuantum karena belum ada teori gravitasi kuantum sampai saat ini, kita dapat menggunakan asumsi bahwa dalam limit klasik, teori gravitasi kuantum dapat dijelaskan oleh teori relativitas umum Einstein. Berita baiknya adalah, seperti yang sudah dibahas sebelumnya, geometri lubang hitam dapat dipandang sebagai dua daerah *timelike* A dan B yang terpisah secara kausal (lihat Gambar 2.8). Dari tinjauan tersebut kita bisa menganggap bahwa kedua daerah tersebut merupakan dua daerah pada suatu teori medan kuantum yang *entangled*, dan dapat dihitung entropi *entanglement*-nya. Dengan menggunakan trik replika, entropi *entanglement* pada latar belakang geometri lubang hitam tersebut dapat dihitung. Menariknya lagi adalah, hasil hitungan entropi *entanglement* tersebut memberikan entropi yang sama persis dengan entropi lubang hitam Bekenstein-Hawking, yaitu entropi yang sama dengan luas permukaan lubang hitam, dibagi dengan $4G_N$ [26]. Dari tinjauan ini dapat ditarik kesimpulan bahwa kemungkinan entropi lubang hitam merupakan besaran yang mengukur *entanglement* pada geometri lubang hitam.

Entropi lubang hitam Schwarzschild yang dikarakterisasi oleh massa sudah banyak dipelajari sisi mikroskopisnya, termasuk perhitungan entropi *entanglement*-nya. Namun, bagaimana dengan lubang hitam yang lebih umum seperti lubang hitam bermuatan Reissner-Nordström dan lubang hitam berotasi Kerr? Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, lubang hitam Reissner-Nordström memiliki dua *horizon*, yaitu *outer horizon* dan *inner horizon*. Oleh karena itu, terdapat dua luas permukaan *horizon* yang dapat diasosiasikan dengan entropi *entanglement*. Pembagian daerah A dan

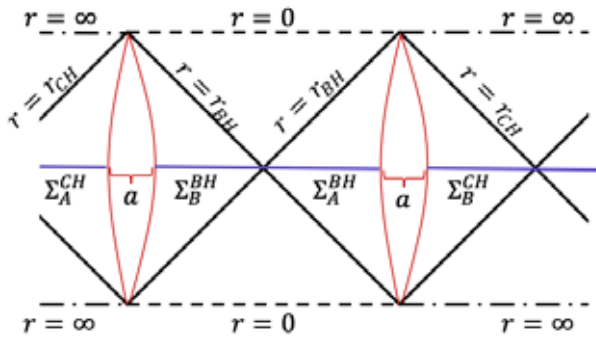
B seperti pada kasus Schwarzschild mengharuskan daerah yang dibagi tersebut merupakan daerah yang bersifat *timelike*. Sehingga, dalam lubang hitam Reissner-Nordström, daerah yang terbagi berada di luar *outer horizon* dan di dalam *inner horizon* (lihat Gambar 2.9). Dari perhitungan dengan menggunakan trik replika dan asumsi limit klasik dari teori gravitasi kuantum diperoleh bahwa daerah A dan B pada *outer* dan *inner horizon* membentuk *entanglement* dan entropinya masing-masing yang besarnya sebanding dengan area dari *outer* dan *inner horizon* [27].

Lubang hitam statis dan memiliki simetri bola lainnya adalah solusi Schwarzschild-de Sitter, yaitu solusi persamaan medan Einstein dengan konstanta kosmologi yang bernilai positif. Solusi vakum dari persamaan medan Einstein dengan konstanta kosmologi menggambarkan solusi geometri ruang-waktu yang memiliki kurvatur konstan. Dalam geometri 3 dimensi, diketahui bahwa terdapat tiga geometri dengan kelengkungan konstan, yaitu bola (dengan kurvatur positif), ruang datar (dengan kurvatur nol) dan geometri pelana kuda atau hiperbolik (dengan kurvatur negatif). Sedangkan dalam ruang-waktu 4 dimensi seperti dalam teori relativitas umum Einstein, solusi dengan kurvatur konstan adalah geometri de Sitter (dengan kurvatur positif), geometri datar Minkowski (dengan kurvatur nol) dan geometri Anti-de Sitter (dengan kurvatur negatif). Solusi Schwarzschild-de Sitter adalah solusi lubang hitam yang dikarakterisasi oleh massa, tetapi berada di latar belakang geometri dengan kurvatur konstan yang bernilai positif. Dalam geometri ini, terdapat dua horizon, yaitu horizon lubang hitam seperti pada geometri Schwarzschild dan *cosmological horizon* yang radiusnya lebih besar (lihat Gambar 2.10). Meskipun sama-sama memiliki dua horizon, tetapi dalam kasus ini, daerah *timelike* berada di antara horizon lubang hitam dengan *cosmological horizon*. Oleh karena itu, terdapat fungsi korelasi pada entropi *entanglement* yang menggambarkan hubungan antara entropi lubang hitam dengan entropi *cosmological horizon*. Namun, suku terbesarnya tetap didominasi oleh entropi yang memiliki bentuk yang sama dengan entropi Bekenstein-Hawking [27].



Gambar 2.9 Ilustrasi diagram lubang hitam Reissner-Nordstrom dengan dua horizon

Garis berwarna biru menggambarkan dua daerah A dan B yang terpisah oleh *inner horizon*, sedangkan garis berwarna merah menggambarkan dua daerah A dan B yang terpisah oleh *outer horizon*.



Gambar 2.10 Geometri lubang hitam Schwarzschild-de Sitter dengan cosmological horizon (CH) dan horizon lubang hitam (BH)

Dalam kasus ini, daerah *timelike* berada di antara CH dan BH sehingga perlu didefinisikan *cut-off* (a) untuk memisahkan keduanya. Hal ini memberikan fungsi korelasi pada entropi *entanglement* yang menggambarkan hubungan antara BH dan CH.

Dengan mempelajari kaitan antara entropi lubang hitam dengan entropi *entanglement*, tanda-tanda bahwa teori gravitasi (yang

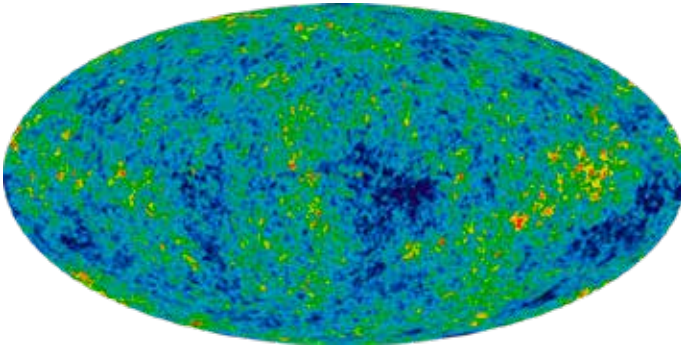
digambarkan oleh kelengkungan geometri ruang-waktu) juga dapat dijelaskan oleh fisika kuantum semakin terlihat. Dari tinjauan tersebut muncul bahwa entropi lubang hitam, yang merupakan besaran geometris, dapat menggambarkan fenomena *entanglement* yang hanya muncul pada teori kuantum. Meskipun belum ada teori gravitasi kuantum yang memadai sampai saat ini, pencarian tanda-tanda atau *signature* dari keberadaan teori gravitasi kuantum tersebut sangatlah penting.

2.6 SIGNATURES KUANTUM DI AWAL ALAM SEMESTA

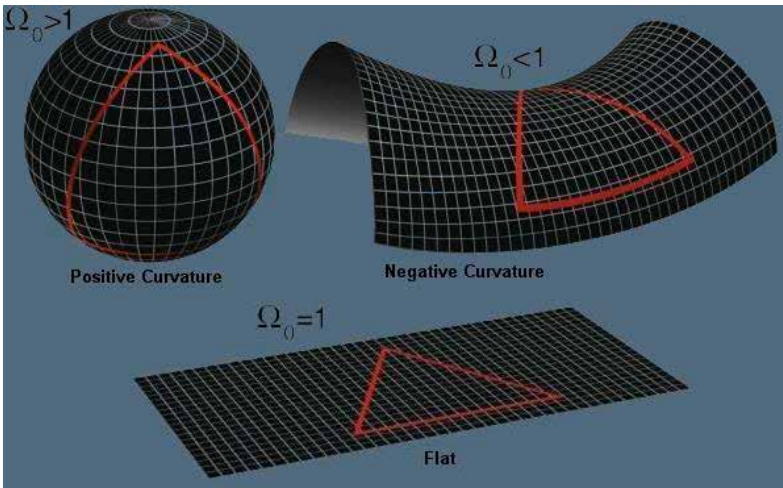
Teori *Big Bang* adalah teori yang diyakini mampu menjelaskan evolusi dari alam semesta ketika awal permulaan hingga saat ini (berkisar 13 miliar tahun yang lalu). Terbentuknya teori ini didasari oleh beberapa hal. Secara teoretis dikembangkan berdasarkan teori relativitas umum dari Albert Einstein dan A. Friedmann pada tahun 1920. Selain itu secara observational terdapat tiga hal yang mendasari teori tersebut. Pertama, adalah fakta bahwa alam semesta mengembang, yang ditemukan oleh Edwin P. Hubble pada tahun 1930. Yang kedua adalah keberadaan partikel cahaya yang relatif berlimpahan akibat reaksi nuklir pada helium, deuterium, dan lithium. Fenomena tersebut terjadi di awal alam semesta sesaat setelah Big Bang, dengan kondisi alam semesta yang beribu-ribu kali lebih panas dari pada inti matahari. Bukti observasi ketiga adalah latar belakang gelombang mikro kosmik (CMB, Gambar 10) yang ditemukan oleh Arno A. Penzias dan Robert W. Wilson yang merupakan sisa pancaran cahaya dari Big Bang dalam bentuk spektrum radiasi benda hitam (didefinisikan hanya dengan temperatur). Radiasi ini dipancarkan ketika temperatur dari alam semesta sudah berkurang sehingga mampu membentuk atom netral dan foton mulai memisahkan diri dari materi. Hasil dari observasi ini memperkuat gagasan teori Big Bang sebagai teori yang menjelaskan terbentuknya alam semesta.

Namun, hasil observasi-observasi tersebut tidak serta merta hanya memperkuat gagasan dari teori Big Bang terdapat beberapa hal yang tidak mampu dijelaskan oleh teori ini. Salah satunya adalah hasil

observasi latar belakang gelombang mikro kosmik yang memunculkan beberapa masalah, yaitu temperatur pada keseluruhan wilayah alam semesta yang teramati hampir sama untuk setiap arah artinya materi yang ada di awal alam semesta (dalam hal ini foton) menyebar ke seluruh daerah untuk mendistribusikan panasnya. Namun berdasarkan teori Big Bang, karena kecepatan cahaya yang terbatas pada 300.000 km per detik, maka tidaklah mungkin bagi cahaya untuk mampu menjangkau jarak terjauh dari alam semesta (*Horizon*). Permasalahan ini umumnya dikenal sebagai *horizon problem*.



Gambar 2.11 Hasil pengamatan latar belakang gelombang mikro kosmik yang menunjukkan bahwa persebaran panas di awal alam semesta pada temperatur sebesar 3 derajat Kelvin bersifat isotropik

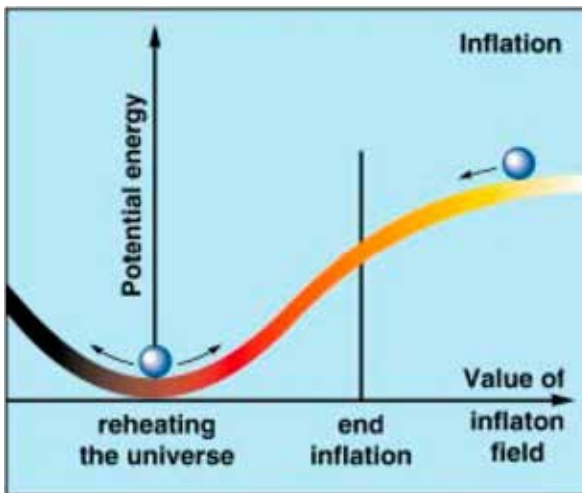


Gambar 2.12 Tiga geometri alam semesta yang dimungkinkan berdasarkan teori relativitas umum

Selain permasalahan horizon terdapat permasalahan lain, yaitu permasalahan yang dikenal sebagai *flatness problem*. Pokok utama dari permasalahan ini adalah geometri dari alam semesta. Berdasarkan hasil pengamatan WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) milik NASA menunjukkan bahwa geometri alam semesta berbentuk datar. Padahal secara umum terdapat tiga kemungkinan geometri alam semesta seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12, yaitu alam semesta tertutup, terbuka, dan datar. Pada alam semesta tertutup, materi yang terdapat di alam semesta cukup banyak sehingga gravitasi akan mampu menghentikan ekspansi di alam semesta. Geometri alam semesta seperti ini memiliki kurvatur yang bernilai positif. Sementara untuk alam semesta terbuka, banyaknya materi yang terkandung tidak cukup untuk menyebabkan ekspansi dari alam semesta terhenti. Alam semesta seperti ini akan memiliki kurvatur bernilai negatif. Untuk alam semesta datar massa jenis dari materi akan berada pada kondisi seimbang artinya ekspansi dari alam semesta tidak akan pernah melambat ataupun terhenti seiring dengan bertambahnya waktu. Kurvatur dari geometri ini akan bernilai nol. Unikny dari hasil pengamatan WMAP diperoleh hasil bahwa geometri alam semesta berbentuk sangat datar artinya massa jenis materi di alam semesta harus berada dalam kondisi seimbang dan berdasarkan teori Big Bang tidak ada penjelasan yang sesuai untuk menjelaskan fenomena ini.

Pada tahun 1980 untuk menjelaskan permasalahan-permasalahan tersebut beberapa peneliti Alan H. Guth, Andrei D. Linde, dan lainnya [28-32], mengembangkan suatu teori yang kemudian dikenal sebagai inflasi kosmologi. Pada teori ini, sepersekian detik di saat permulaan alam semesta akan mengalami suatu periode pengembangan secara *exponential* yang dipicu oleh medan skalar yang kemudian dikenal sebagai inflaton. Sehingga sebelum terjadinya inflasi, dimungkinkan untuk wilayah yang pada akhir inflasi berjarak sangat jauh (horizon) secara kausal terhubung dan menyebabkan temperaturnya menjadi tersebar secara merata ke seluruh wilayah. Selain itu, pengembangan alam semesta secara *exponential* ini juga memungkinkan untuk alam semesta dengan kondisi awal geometri bersifat tertutup mengembang sehingga terbentuk alam semesta datar. Untuk mudahnya, fenomena pengembangan ini dapat

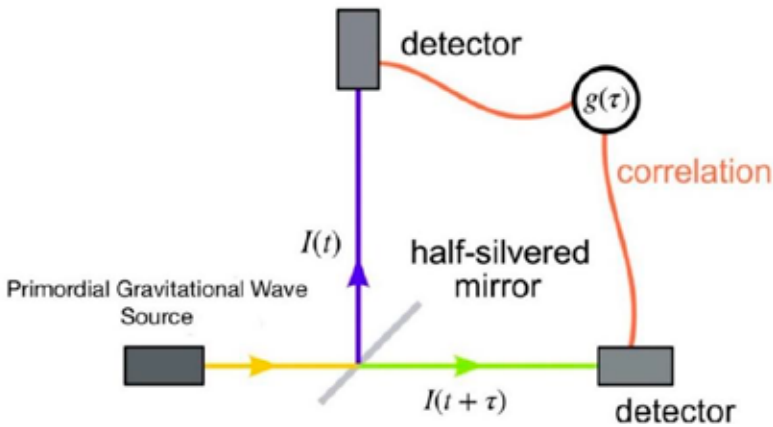
dibayangkan sebagai sebuah balon yang sedang ditiupkan di mana jika dimisalkan terdapat seseorang pada salah satu titik dari balon tersebut sebagai pusat pengembangan, maka setiap titik di sekitarnya akan semakin menjauh. Medan inflaton sebagai pemicu inflasi dapat direpresentasikan sebagai sebuah bola yang menuruni bukit seperti Gambar 2.13. Selama inflasi berlangsung, energi densitas di approximasikan konstan memicu terjadinya ekspansi yang sangat cepat di alam semesta. Ketika bola sampai di dasar bukit, maka bola akan mulai berosilasi, inflasi berakhir dan energi dari inflasi akan runtuh menjadi partikel.



Gambar 2.13 Representasi dari medan inflasi yang diibaratkan sebagai bola yang sedang menuruni bukit

Dalam fisika modern, partikel-partikel elementer akan direpresentasikan ke dalam bentuk medan kuantum. Sebagai contoh cahaya yang dapat diasosiasikan sebagai medan elektromagnetik. Dalam kasus inflasi, medan inflaton juga merupakan suatu medan kuantum. Sehingga banyak ilmuwan yang meyakini bahwa kondisi awal dari alam semesta merupakan suatu keadaan dalam kerangka mekanika kuantum. Lebih spesifik keadaan original tersebut biasanya diekspresikan dalam bentuk keadaan kuantum vakum yang disebut sebagai *Bunch-Davies vacuum*. Kondisi original dari alam semesta yang berupa keadaan kuantum menjadi sangat menarik dimata para ilmuwan. Dikarenakan jika kondisi original ini benar adanya, maka

inflasi kosmologi merupakan suatu fenomena yang dapat menghubungkan dua teori besar pada fisika modern yang selama ini berseberangan, yaitu teori kuantum dan teori gravitasi (relativitas umum). Adanya hubungan tersebut dapat menjadi petunjuk keberadaan dari teori gabungan keduanya (teori kuantum gravitasi). Namun sayangnya meskipun teori inflasi meyakini bahwa kondisi original dari alam semesta berupa keadaan kuantum, tetapi pembuktian dari keadaan tersebut masih belum terdeteksi sampai saat ini, meskipun beberapa pekerjaan untuk mencari *signature* kuantum dan *entanglement* pada teori inflasi telah dilakukan [33,34].



Gambar 2.14 Skema interferometer Hanbury Brown-Twiss (HBT)

Beberapa mekanisme pernah diajukan untuk mendeteksi keadaan kuantum tersebut, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh S. Kanno dan J. Soda [35-37]. Pada penelitiannya sifat kuantum akan dicari dari gelombang gravitasi yang dihasilkan di awal alam semesta (gelombang gravitasi primordial). Gelombang gravitasi sendiri merupakan suatu fenomena yang diprediksi oleh teori relativitas umum. Pada tahun 2015 fenomena ini berhasil dideteksi oleh observasi gelombang gravitasi menggunakan Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) [38], yang mana fenomena ini merupakan riak ruang dan waktu yang dihasilkan akibat adanya suatu fenomena berenergi besar di alam semesta. Riak pada ruang dan waktu tersebut akan menjalar menjauhi sumber dengan kecepatan cahaya menuju segala arah. Beberapa sumber dari

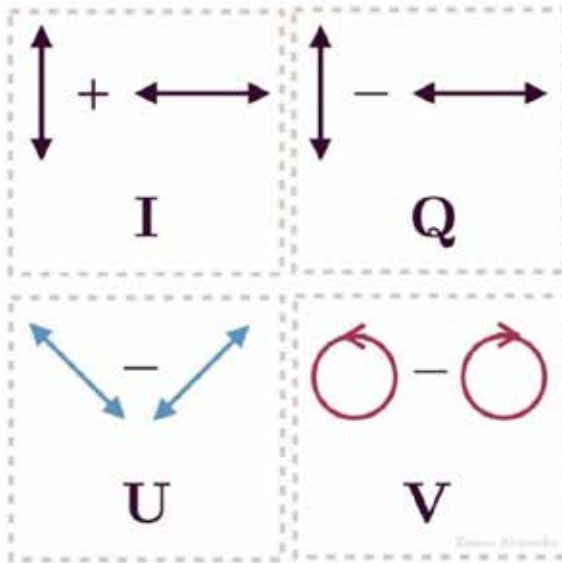
gelombang gravitasi di antaranya adalah objek-objek astrofisika seperti tumbukan antara bintang neutron dan lubang hitam. Sementara untuk gelombang gravitasi primordial dihasilkan akibat adanya dinamika dari inflasi atau ekspansi di awal alam semesta. Karena inflasi bersumber dari keadaan kuantum maka seharusnya sifat kuantum tersebut akan termuat dalam gelombang gravitasi primordial. Dalam bentuk medan kuantum gelombang gravitasi disebut sebagai graviton.

Mekanisme yang diajukan oleh S. Kanno dan J. Soda untuk mendeteksi sifat kuantum dari gelombang gravitasi primordial adalah dengan mengkaji graviton statistik menggunakan metode eksperimen interferometri Hanbury Brown-Twiss (HBT) [39]. Metode ini umumnya dijumpai pada kuantum optik untuk mengkaji distribusi statistik dari foton. Karena graviton berperilaku sama seperti cahaya maka metode ini juga efektif jika digunakan pada kasus graviton. Secara prinsip interferometri HBT adalah eksperimen untuk mengukur hubungan korelasi antar-dua intensitas cahaya yang terpisah melalui *beam splitter* seperti Gambar 2.14. Secara matematis hubungan korelasi ini dapat diungkapkan sebagai fungsi dari Fano faktor. Pada kuantum optik Fano faktor merupakan perbandingan antara varians terhadap nilai rata-rata dari foton atau graviton yang diujikan. Sifat kuantum akan dapat dijumpai jika besarnya Fano faktor bernilai kurang dari 1. Kondisi ini dapat terpenuhi salah satunya jika keadaan kuantum dari foton atau graviton merupakan keadaan *squeezed coherent*. Dalam penelitiannya S. Kanno dan J. Soda menunjukkan bahwa keadaan kuantum di awal alam semesta dapat memenuhi kondisi tersebut. Keadaan *squeezed* akan terpenuhi akibat inflasi kosmologi yang memaksa potensial osilator harmonik dari keadaan original melebar sehingga keadaan kuantumnya akan teremas dan menghasilkan keadaan *squeezed*. Sementara keadaan *coherent* dapat terpenuhi jika terjadi interaksi anatara graviton dengan medan skalar klasik. Dengan menggunakan metode HBT, maka frekuensi untuk bisa mendeteksi sifat nonklasik dari gelombang gravitasi primordial dapat diketahui. Sifat nonklasik dapat terdeteksi pada frekuensi lebih dari 10 KHz. Besar nilai tersebut masih berada dalam cakupan dari frekuensi yang mampu dideteksi oleh detektor LIGO.

Uniknya sifat kuantum pada Penelitian dari S. Kanno dan J. Soda akan muncul jika graviton berinteraksi dengan medan skalar klasik. Tentu hal ini memancing suatu pertanyaan, bagaimana jika graviton berinteraksi dengan sistem kuantum lainnya? Apakah hanya dengan berinteraksi dengan sistem klasik sifat kuantum akan bisa dideteksi? Untuk menjawab pertanyaan tersebut kami melakukan penelitian untuk memperluas penelitian dari S. Kanno dan J. Soda [40]. Di mana dalam penelitian kami keadaan kuantum origin dari alam semesta dimisalkan tidak harus berada dalam keadaan vakum, yaitu dengan memisalkan keadaan origin ini berupa keadaan minimal ketidakpastian Heisenberg dari gekombang gravitasi yang dihasilkan. Dalam mekanika kuantum akurasi pengukuran dari suatu sistem akan dibatasi oleh ketidakpasian Heisenberg [41] dengan keadaan minimalnya disebut sebagai keadaan minimal ketidakpastian. Hanya beberapa keadaan kuantum yang dapat memenuhi kondisi minimal ini. Kami berasumsi bahwa kondisi minimal tersebut merupakan konidisi minimal yang bisa dihasilkan dari suatu pengukuran yang merepresentasikan polarisasi dari gelombang gravitasi (Stoke operator [42]). Di mana secara umum gelombang gravitasi dapat memiliki bentuk polarisari yang bersifat linier atau lingkaran. Untuk mendeteksi jenis polarisasi yang dihasilkan oleh suatu sumber akan digunakan perhitungan Stoke operator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Kondisi minimal ketidakpastian Heisenberg dari Stoke operator ini memungkinkan keadan origin dari alam semesta berupa keadaan kuantum *entanglement* antara dua jenis polarisasi. Artinya dengan menggunakan metode HBT, yang mana jika interferomernya hanya mampu untuk mendeteksi salah satu dari jenis polarisasi, maka akan terdapat interaksi kuantum terhadap graviton.

Merupakan sebuah parameter yang digunakan untuk meninjau jenis polarisasi yang dihasilkan dari suatu sumber cahaya ataupun gelombang gravitasi. Parameter I merepresentasikan total polarisasi sementara Q, U, adalah parameter untuk polarisasi linear dan V adalah parameter untuk polarisasi lingkaran.

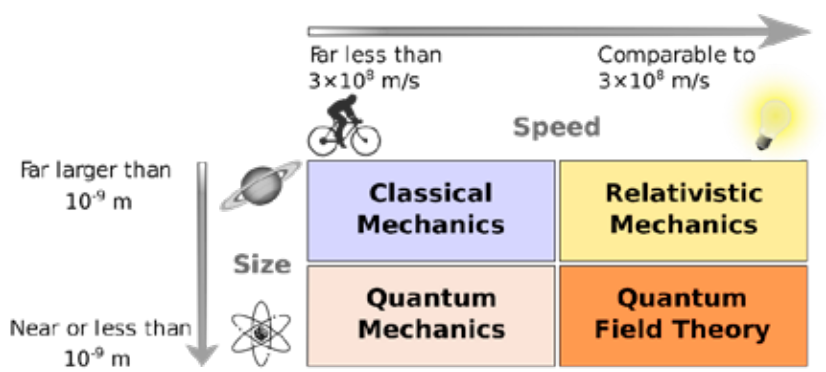
Stokes Parameters (Operator)



Gambar 2.15 Operator Stoke

Dari hasil penelitian yang kami lakukan apabila keadaan origin tersebut berupa keadaan *entanglement* seperti yang disebutkan diatas, maka sifat kuantum yang bisa dideteksi oleh interferometer berada dalam cakupan yang lebih luas. Bahkan sifat kuantum yang bisa dideteksi dapat mencakup seluruh frekuensi di bawah frekuensi *cut off* (frekuensi tertinggi dari gelombang gravitasi primordial) meskipun sistem tidak berinteraksi dengan medan skalar klasik sifat kuantum tersebut masih mungkin untuk dideteksi. Namun hal tersebut hanya berlaku jika total partikel dari keadaan *entanglement* aslinya berjumlah banyak (minimal lebih dari dua). Untuk keadaan *entanglement* dengan jumlah partikel kurang dari dua frekuensi di mana sifat kuantum dapat terdeteksi berada dalam cakupan yang berkisaran sama dengan keadaan origin vakum. Dikarenakan selain keadaan *entanglement*, keadaan minimal ketidakpastian juga dipenuhi oleh keadaan vakum, maka keadaan origin dapat direpresentasikan dalam bentuk superposisi antara keadaan *entanglement* dan keadaan vakum. Menggunakan keadaan ini, maka untuk total graviton kurang dari dua, frekuensi yang mampu menghasilkan gelombang gravitasi

dengan sifat kuantum adalah seluruh frekuensi di bawah frekuensi *cut-off*. Artinya apabila keadaan kuantum di awal alam semesta berupa keadaan minimal ketidakpastian, maka sifat kuantum dari gelombang gravitasi primordial akan dapat dideteksi dengan menggunakan metode interferometri HBT pada salah satu jenis polarisasi dengan cakupan frekuensi yang lebih luas. Jika hal tersebut terjadi maka keyakinan dari para ilmuwan bahwa kondisi origin dari alam semesta adalah keadaan kuantum akan tervalidasi.



Gambar 2.16 Pembagian teori fisika menurut kecepatan dan ukuran objeknya

Unifikasi Teori Kuantum dan Relativitas Umum

Teori dalam fisika dapat dibagi menurut kecepatan dan ukurannya (Gambar 2.15): pada dunia sehari-hari, mekanika klasik kecepatan rendah ($v \ll c$) dan ukuran besar ($l \gg 10^{-9}$ m); untuk kecepatan mendekati cahaya dan ukuran besar, berlaku teori relativitas khusus; untuk kecepatan rendah dan ukuran kecil, digunakan mekanika kuantum; dan untuk tinggi dan ukuran kecil maka dimanfaatkan mekanika kuantum relativistik (teori medan kuantum). Ketiga gaya fundamental, elektromagnet, nuklir kuat, dan nuklir rendah, telah berhasil disatukan dalam *Grand Unified Theory* (GUT) pada 1974. Tersisa satu gaya lagi, gaya gravitasi, yang belum bisa diunifikasi sampai sekarang.

Masalah utama pada unifikasi teori kuantum dengan gravitasi (*quantum gravity*) adalah gagalnya renormalisasi untuk medan *gravity*. Renormalisasi berarti mencegah kuantitas tak hingga yang muncul dalam perhitungan integral perturbatif. Salah satu kandidat unifikasi berikutnya adalah teori *string*. Dalam teori *string*, konstituen

fundamental alam semesta bukanlah partikel melainkan string (dawai) yang bergetar dan menghasilkan energi sesuai frekuensi getarnya. Teori string dapat memecahkan masalah singularitas dan unrenormalisability dari gravitasi kuantum. Alih-alih disusun oleh partikel titik, teori string berspekulasi bahwa penyusun alam semesta adalah benang, mode vibrasi dari benang ini menjadi yang kita ketahui sebagai partikel. Namun konsekuensinya, dibutuhkan jumlah dimensi alam semesta yang sangat besar, 26 dimensi untuk bosonic string, 11 dimensi untuk teori-M, dan 10 dimensi untuk superstring.

Dimensi yang sangat besar tersebut tentu menjadi masalah fenomenologis yang besar dalam teori string. Problem secara fenomenologi maupun secara teori adalah bagaimana teori yang multidimensi tersebut dapat diamati (diukur) pada ruang waktu 4-dimensi tempat dunia kita berada, selain partikel yang diprediksi teori ini belum terdeteksi sampai saat ini. Di samping itu teori *superstring* memprediksi sejumlah partikel tambahan yang diperlukan untuk melengkapi model standar, tetapi belum satu pun yang berhasil ditemukan hingga kini.

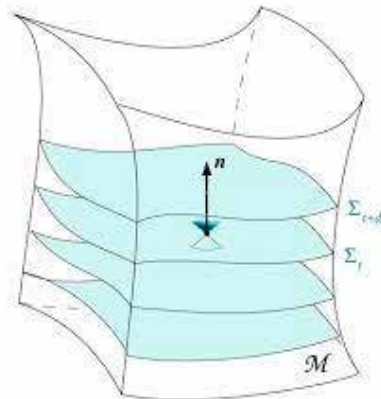
2.7 KUANTISASI MEDAN GRAVITASI

Untuk membawa teori relativitas ke dalam ranah kuantum, maka perlu dilakukan proses kuantisasi (pengkuantuman). Masalahnya relativitas umum sebagai teori gravitasi adalah teori yang kovarian, yakni meletakkan waktu dan ruang pada kedudukan yang sama, sementara formulasi kuantum standar (kanonik) menerapkan ruang dan waktu yang mutlak (seperti pada fisika klasik). Sebagai langkah pertama kuantisasi, diperlukan formalisme Arnowitt-Deser-Misner (ADM) untuk relativitas umum, yang memisahkan 3 koordinat ruang dan 1 sumbu waktu. Dalam formalisme ADM, lembaran-lembaran ruang pada waktu yang berbeda tegak lurus dengan arah normal ($\vec{n}$), vektor N , sebagai evolusi waktu (Gambar 2.16).

Dari formalisme ADM, diperoleh bentuk *Hamiltonian density* (total densitas energi) sebagai berikut:

$$\mathcal{H} = \omega_0 \mathcal{G}_i + NC + N^a C_a = 0$$

dengan ω_0^i holonomi pada dimensi 3. Untuk menjelaskan gravitasi, perlu ada kendala (*constraint*), yang membuat persamaan di atas sama dengan nol. Sehingga kita peroleh 3 kendala: $G_i = 0$, *Gauss constraint*, $C = 0$, *Hamiltonian constraint*, dan $C_i = 0$, *diffeomorphism* (akan dijelaskan pada bagian berikutnya) *constraint*. Untuk mempromosikan ke teori kuantum, kita perlu mengenakan kendala-kendala ini pada sebuah keadaan $|\psi\rangle$, dan membuat $\mathcal{H}$ menjadi operator, $\hat{\mathcal{H}}$, sehingga $\hat{\mathcal{H}}|\psi\rangle = 0$ (persamaan Wheeler-DeWitt). Di kuantum, Hamiltonian (operator energi) adalah operator evolusi waktu sistem, pernyataan sama dengan nol pada persamaan Wheeler-DeWitt menyebabkan tidak adanya dinamika (*trivial*)! Ini merupakan masalah besar yang dihadapi teori gravitasi kuantum manapun. *Loop quantum gravity* adalah satu upaya untuk mengatasi masalah ini, yakni dengan membuang ketergantungan pada waktu itu sendiri (karena evolusi waktu menjadi kendala sama dengan nol, seperti tercermin pada *Hamiltonian constraint*) Kendala-kendala inilah yang nantinya akan mendeksripsikan dinamika dari *loop quantum gravity*. Teori ini bermula dari formulasi Ashtekar [43] untuk relativitas umum, yang mendefinisikan variabel baru untuk menyatakan kendala-kendala di atas dalam bentuk yang lebih sederhana.



Gambar 2.17 Lembaran-lembaran ruang (3D) dan arah waktu n pada formulasi ADM

Loop Quantum Gravity

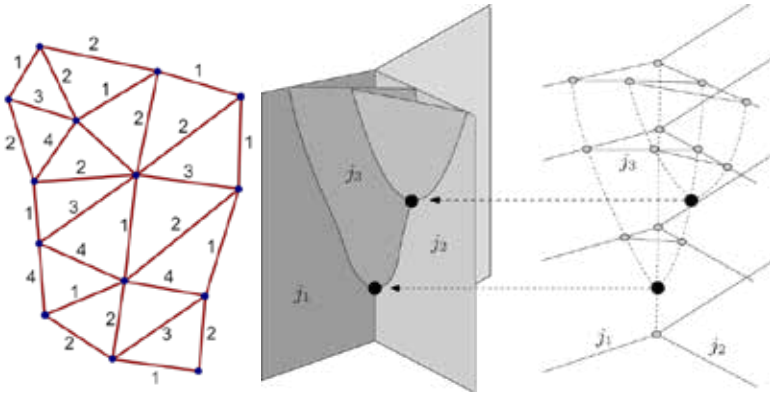
Loop quantum gravity (LQG) merupakan kandidat lain dari unifikasi gravitasi dan kuantum. Dari sudut pandang teori Einstein, percobaan

unifikasi dengan memperlakukan gravitasi sebagai gaya seperti ketiga gaya lainnya telah gagal misalnya pada teori medan kuantum gravitasi. Dalam relativitas umum gravitasi bukanlah gaya, melainkan kelengkungan ruang waktu itu sendiri. LQG adalah suatu upaya untuk mengembangkan teori kuantum dari gravitasi berdasarkan *formulasi geometrik* gravitasi Einstein. Untuk melakukan ini, LQG melakukan kuantisasi pada ruang waktu itu sendiri [44-49]. Kuantisasi ini memiliki konsekuensi bahwa ruang waktu itu sendiri bersifat diskrit, dan terdapat skala ukuran di mana suatu kuantitas terkecil yang menjadi ukuran “pecahan” dari ruang waktu tersebut. Lebih kecil dari ukuran ini, segala kuantitas fisis kehilangan arti, misalnya, jarak terkecil yang dapat memiliki arti fisis adalah panjang Planck, $l_P \sim 10^{-35}$ m.

Berbeda dengan teori *string* yang masih memerlukan adanya ruang waktu yang menjadi latar belakang tempat beradanya sebuah *string*, LQG tidak memerlukan keberadaan ruang waktu ini secara *a priori*; faktanya, ruang waktu itu sendiri yang dikuantisasi pada LQG. Teori ini memberikan prediksi fisis pada skala Planck. Misalnya, LQG berhasil mereproduksi entropi Bekenstein-Hawking pada radiasi lubang hitam.

LQG didasari oleh formulasi Ashtekar untuk relativitas umum, atau dikenal juga sebagai formulasi *holonomy* (ukuran perubahan arah vektor ketika dijalankan pada ruang lengkung). Dengan menggunakan formulasi Ashtekar, kendala dari persamaan Wheeler-DeWitt dapat diformulasikan sedemikian rupa sehingga antarsesama kendala bersifat kompatibel (komutatif); hal teknis ini perlu dalam formulasi kuantum. Dari sini, dilakukan kuantisasi, yang mengakibatkan ruang waktu menjadi diskrit, dan diperoleh sebuah observabel yang disebut *Wilson loop*, yang menjadi basis baru untuk formulasi LQG pada ruang Hilbert (ruang vektor dengan sifat yang diperlukan kuantum). Dengan basis tersebut, keadaan kuantum dari medan gravitasi direpresentasikan oleh simpul (*knot*) yang bersifat invarian secara topologi. Pemetaan antara simpul-simpul yang sama secara topologi disebut difeomorfisme dan inilah yang menjadi inti formulasi LQG. *Wilson loop* pada formulasi Ashtekar menyelesaikan kendala waktu (*Hamiltonian constraint*) atau persamaan Wheeler-DeWitt. Difeomorfisme adalah ide yang sama pada relativitas umum,

di mana tidak ada kerangka acuan yang universal; keterhubungan antar-objek tetap terjaga meskipun mengalami transformasi koordinat. Pada LQG, informasi yang menjadi karakterisasi sebuah jaringan *spin network* (yakni jaringan yang tersusun dari objek kuantum paling sederhana: sistem 2-keadaan, *spin up/down*, yang merekam informasi tentang lengkungan ruang waktu atau gravitasi) adalah struktur keterhubungan dan simpulnya (*knot*). Evolusi dari jaringan ini menghasilkan dinamika ruangwaktu yang kita kenal, sesuai kaidah difeomorfismenya.



Gambar 2.18 (Kiri) *Spin network* pada LQG (2 dimensi), (tengah) *spin foam*, dan (kanan) evolusi *spin network*-nya pada (2+1) dimensi

Formulasi sistem pada LQG dapat dibagi menjadi permasalahan kinematik dan dinamik. Kinematikanya telah disinggung secara singkat pada paragraf sebelumnya, tetapi dinamikanya, yang menggambarkan evolusi waktu, jauh lebih rumit. Ini karena pada formulasi LQG tidak ada waktu secara eksplisit, lantas bagaimana teori ini dapat memprediksi evolusi partikel dan interaksinya, sebagaimana teori fisika lainnya? Evolusi dari suatu keadaan *spin network* ke keadaan *spin network* lainnya dapat diformulasikan melalui penjumlahan semua kemungkinan (*sum over histories/path integral*). Struktur geometris yang merepresentasikan *path integral* ini disebut *spin foam*, yang memiliki 1 dimensi lebih tinggi dari *spin network* (digambarkan sebagai garis dan titik persimpangan pada Gambar 2.17). Cara lain memandang evolusi dari *spin network* ini adalah sebagai solusi dari ketiga kendala yang disebutkan pada bagian kuantisasi medan gravitasi.

2.8 KESIMPULAN

Telah dipaparkan beberapa aplikasi dari sistem kuantum terbuka pada fenomena transpor kuantum. Perbedaan mendasar dengan transpor klasik adalah adanya koherensi kuantum yang dapat dimanfaatkan sebagai sumberdaya untuk meningkatkan performa dari sistem. Sifat-sifat dari transpor dapat diatur dengan mengendalikan parameter *disorder* dan gangguan *noise* kuantum dari lingkungan, yang bahkan dapat memperkuat arus energi transpor. Informasi dapat meradiasi keluar dari dalam lubang hitam melalui *entanglement* kuantum dengan partikel di luar lubang hitam. Hal ini menunjukkan bahwa lubang hitam memiliki sifat termodinamik, yang entropinya berbanding lurus dengan luas permukaannya. Hal ini unik karena biasanya entropi bergantung pada seluruh volume sistem, dan mengindikasikan adanya korespondensi antara teori kuantum pada permukaan dan relativitas umum pada volume; prinsip holografi. Dengan prinsip ini, kita dapat meninjau efek kuantum pada inflasi di awal mengembangnya alam semesta serta fenomena gelombang gravitasi primordial, salah satunya dengan trik replika. Saling terhubungnya antara kuantum dan relativitas umum ini menandakan adanya sinergi antara bidang-bidang yang pada awalnya dikaji secara terpisah dalam fisika. Fenomena yang terjadi pada lubang hitam misalnya, memiliki korespondensi dengan superkonduktor suhu tinggi. Keduanya memiliki sifat *entanglement* yang serupa, dan simulator kuantum dapat mengkajinya secara eksperimen dengan nilai-nilai parameter yang terkontrol. Terakhir adalah bagaimana teori kuantum dan gravitasi, yang berlaku pada skala yang jauh berbeda, dapat diunifikasi dengan *loop quantum gravity*. Kinematika teori ini dijelaskan oleh *spin network*, sementara evolusi dinamikanya oleh *path integral* dari semua kemungkinan bentuk jejaring, yang membentuk *spin foam*.

REFERENSI

- [1] Lindblad, G. (1976). On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in Mathematical Physics*, **48**(2), 119-130.
- [2] Gorini, V., Kossakowski, A., Sudarshan, E. C. G. (1976).

- Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. Journal of Mathematical Physics*, **17**(5), 821-825.
- [3] Engel, G. S., Calhoun, T. R., Read, E. L., Ahn, T. K., Mančal, T., Cheng, Y. C., ... & Fleming, G. R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, **446**(7137), 782-786.
 - [4] Mohseni, M., Omar, Y., Engel, G. S., Plenio, M. B. (Eds.). (2014). *Quantum effects in biology*. Cambridge University Press.
 - [5] Mohseni, M., Rebentrost, P., Lloyd, S., Aspuru-Guzik, A. (2008). Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer. *The Journal of Chemical Physics*, **129**(17), 11B603.
 - [6] Duan, H. G., Prokhorenko, V. I., Cogdell, R. J., Ashraf, K., Stevens, A. L., Thorwart, M., Miller, R. D. (2017). Nature does not rely on long-lived electronic quantum coherence for photosynthetic energy transfer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**(32), 8493-8498.
 - [7] Maier, C., Brydges, T., Jurcevic, P., Trautmann, N., Hempel, C., Lanyon, B. P., ..., Roos, C. F. (2019). Environment-assisted quantum transport in a 10-qubit network. *Physical Review Letters*, **122**(5), 050501.
 - [8] Kassal, I., Aspuru-Guzik, A. (2012). Environment-assisted quantum transport in ordered systems. *New Journal of Physics*, **14**(5), 053041.
 - [9] Zerah-Harush, E., Dubi, Y. (2018). Universal origin for environment-assisted quantum transport in exciton transfer networks. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **9**(7), 1689-1695.
 - [10] Dwiputra, D., Zen, F. P. (2021). Environment-assisted quantum transport and mobility edges. *Physical Review A*, **104**(2), 022205.
 - [11] Dwiputra, D., Kosasih, J. S., Sulaiman, A., Zen, F. P. (2020). Driving-assisted open quantum transport in qubit networks. *Physical Review A*, **101**(1), 012113.
 - [12] Dwiputra, D., Zen, F. P. (2022). Single-particle mobility edge without disorder. *Physical Review B (Letter)*, **105**(8), L081110.
 - [13] Bloch, I. (2008). Quantum coherence and *entanglement* with ultracold atoms in optical lattices. *Nature*, **453**(7198), 1016-1022.
 - [14] Gambar disadur dari Center for Quantum Engineering and

- Photonics Technologies, Sharif University of Technology, Iran.
 Web: <http://quantum.sharif.edu> (diakses 2021).
- [15] Rigol, M., Dunjko, V., & Olshanii, M. (2008). Thermalization and its mechanism for generic isolated quantum systems. *Nature*, **452**(7189), 854-858.
 - [16] The Event Horizon Telescope Collaboration (April 10, 2019). "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole". *The Astrophysical Journal Letters*. **875** (1): L1.
 - [17] Hawking, S. W. (1975). Particle creation by black holes. *Communication in Mathematical Physics*, **43**, 199–220
 - [18] Bekenstein, J. D. (1972). Black holes and the second law. *Lettere Al Nuovo Cimento Series 2*, **4**(15).
 - [19] Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics*, **36**(11).
 - [20] 't Hooft, G. (1993). Dimensional Reduction in Quantum Gravity. Essay dedicated to Abdus Salam. *Preprint: arXiv:gr-qc/9310026*
 - [21] Maldacena, J. (1997). The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. *International Journal of Theoretical Physics*, **38**, 1113–1133.
 - [22] Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics*, **36**(11).
 - [23] Guica, M., Hartman, T., Song, W., & Strominger, A. (2009). The Kerr/CFT correspondence. *Physical Review D*, **80**(12), 1–9.
 - [24] Ryu, S., & Takayanagi, T. (2006a). Aspects of holographic entanglement entropy. *Journal of High Energy Physics*, **2006**(8).
 - [25] Ryu, S., & Takayanagi, T. (2006b). Holographic Derivation of Entanglement Entropy from the anti--de Sitter Space/Conformal Field Theory Correspondence. *Physical Review Letters*, **96**(18), 181602.
 - [26] Fursaev, D. V. (2008). *Entanglement* entropy in quantum gravity and the Plateau problem. *Physical Review D*, **77**(12).
 - [27] Prihadi, H. L., Zen, F. P., Ariwahjoedi, S., Dwiputra, D. (2022). Replica trick calculation for entanglement entropy of static black hole spacetimes. Submitted to *Nuclear Physics B*.
 - [28] Guth, A. H. (1981). *Physical Review D*, **23**, 347.
 - [29] Linde, A. D. (1982). *Physics Letters B*, **108**, 389.

- [30] A. Albrecht & P. J. Steinhardt, *Physical Review Letters*, **48**, 1220 (1982).
- [31] Garcia-Bellido, J. (2003). *The Evolution of The Universe*. World Scientific.
- [32] Kokkotas, K. D. (2002). *Gravitational Wave Physics*. Encyclopedia of Physical Science and Technology 3rd Edition, Academic Press.
- [33] Prihadi, H. L. & Zen, F. P. (2022). Possible signature of *entanglement* in null-energy-condition-violating inflation. *Journal of Physics Conference Series*, **2243**, 012093.
- [34] Trenggana, A. & Zen, F. P. (2022). The relative entropy of one graviton creation in early universe. *Journal of Physics Conference Series*, **2243**, 012098.
- [35] Kanno, S. & Soda, J. (2019). *Physical Review D*, **99**(8), 084010.
- [36] Kanno, S. (2019). *Physical Review D*, **100**(12), 123536.
- [37] Kanno, S. & Soda, J. (2020). *Symmetry*, **12**(4), 672.
- [38] Abbott, B. P. *et al.* [LIGO Scientific and Virgo] (2016). *Physical Review Letters* **116**(6), 061102.
- [39] Gerry, C. C. & Knight, P. L. (2005). *Introductory Quantum Optics*, Cambridge University Press.
- [40] Trenggana, A. & Zen, F. P. Nonclassical Primordial Gravitational Wave from The Minimal Uncertainty Initial Model. Manuscript in preparation.
- [41] Zettili, N. (2009). *Quantum Mechanics Concepts and Applications Second Edition*. John Wiley & Sons.
- [42] Stokes, G. G. (1852). *Trans. Camb. Phil. Soc.* **9**, 399.
- [43] Ashtekar, A. (1986). New variables for classical and quantum gravity. *Physical Review Letters*, **57**(18), 2244.
- [44] Ariwahjoedi, S., Kosasih, J. S., Rovelli, C., & Zen, F. P. (2015). How many quanta are there in a quantum spacetime?. *Classical and Quantum Gravity*, **32**(16), 165019.
- [45] Ariwahjoedi, S., Kosasih, J. S., Rovelli, C., & Zen, F. P. (2015). Curvatures and discrete Gauss-Codazzi equation in (2+1)-dimensional loop quantum gravity. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, **12**(10), 1550112.
- [46] Ariwahjoedi, S., Husin, I., Sebastian, I., Zen, F.P. (2019), Review on hermiticity of the volume operators in Loop Quantum Gravity, *General Relativity and Gravitation*, **51**(5), 58.

- [47] Sebastian, I., Husin, I., Ariwahjoedi, S., Zen, F.P. (2019). Spectral Analysis of Volume Operators in Loop Quantum Gravity for Kinematical Case, *Journal of Physics: Conference Series*, **1245**(1), 012086.
- [48] Husin, I., Sebastian, I., Ariwahjoedi, S., Zen, F.P. (2019), Triangular inequality for 3d Euclidean simplicial complex in loop quantum gravity, *Journal of Physics: Conference Series*, **1245**(1), 012091.
- [49] Zen, F.P., Ariwahjoedi, S. (2019). A Brief Review on Canonical Loop Quantum Gravity: The Kinematical Part. *Journal of Physics: Conference Series*, **1354**(1), 012002.

SEKILAS REVOLUSI KUANTUM

Andriyan Bayu Suksmono

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi
Bandung, Indonesia

Abstrak

Teknologi kuantum generasi baru melahirkan revolusi kuantum yang kedua, di mana satuan dasar dari informasi bukan lagi bit, melainkan qubit (*quantum bit*). Komputasi kuantum memungkinkan perhitungan yang jauh lebih cepat dari komputasi klasik dan berakibat pada runtuhnya sistem persandian yang dipakai secara luas saat ini. Hal ini mendorong diciptakannya persandian kuantum atau lebih luas lagi, yaitu komunikasi kuantum. Di samping ancaman yang ditimbulkan, komputasi kuantum bermanfaat untuk mendesain material baru untuk baterai yang lebih baik, penemuan obat (*drug discovery*) yang lebih cepat, dan produksi bahan kimia yang lebih ramah lingkungan. Paparan ini akan menjelaskan sekilas perkembangan teknologi informasi dari klasik hingga kuantum, sekilas revolusi kuantum kedua dan perbedaannya dari revolusi kuantum pertama, beberapa contoh penelitian yang telah dilakukan, ancaman yang ditimbulkan, dan peluang-peluang yang tercipta.

3.1 PENDAHULUAN

Semesta Informasi: Informasi mulai ada sejak bermulanya ruang dan waktu. Setelah dentuman besar, ketika alam semesta mulai dingin; materi mengalami transisi fasa dari acak menjadi teratur hingga menjadi lebih terorganisir. Proses swa-organisasi pada lingkungan yang tepat memungkinkan terjadinya kehidupan. Bermula dari bentuk yang paling sederhana hingga menjadi makhluk hidup yang lebih kompleks. Rancang bangun kehidupan tercetak sebagai kode di dalam gen yang diwariskan dari generasi ke generasi. Kode ini berevolusi seiring berjalannya waktu; melalui proses adaptasi dari individu dengan lingkungannya. Pewarisan sifat dari generasi ke generasi adalah proses pengiriman informasi yang ada di dalam kode genetika.

Pada zaman prasejarah, manusia menunjukkan keberadaannya dengan membuat gambar-gambar pada dinding gua tempat mereka tinggal. Hal ini merupakan salah satu bentuk paling primitif dari proses penyimpanan informasi. Bentuk ini berubah menjadi simbol-simbol dan abjad seiring tuntutan efisiensi dan efektivitas dari penyampaian informasi. Media penyimpanan dan pertukaran informasi juga berkembang seiring dengan perubahan peradaban.

3.2 TEKNOLOGI INFORMASI DAN KETERBATASANNYA

Pada mulanya pengolahan informasi dilakukan secara mekanis. Sempoa atau abakus merupakan bentuk pengolah informasi mekanis yang paling sederhana. Alat ini berkembang menjadi kalkulator mekanik dan kemudian menjadi mesin hitung elektronik. Perhitungan dalam skala besar dapat dicapai ketika peralatan sistem pengolah elektronik mulai menggantikan alat hitung mekanik. Tuntutan penghematan ruang membuat miniaturisasi menjadi tidak terhindarkan lagi, yang terbantu oleh kemampuan transistor untuk menggantikan fungsi dari lampu tabung di dalam mesin penghitung elektronik.

Perkembangan ke arah rangkaian terintegrasi (IC-*Integrated Circuit*) memungkinkan lebih banyak unit pengolah elektronik yang bisa ditampung per satuan wilayah pada papan rangkaian. Komputer

canggih saat ini bahkan dilengkapi dengan prosesor yang memiliki fungsi-fungsi khusus; seperti prosesor paralel pada komputer super, prosesor pengolah grafik, dan prosesor kecerdasan buatan (AI-*Artificial Intelligent*).

Sejalan dengan perkembangan mesin pengolah data, manusia semakin paham akan esensi dari informasi. Salah satu tonggak sejarahnya terjadi saat Claude Shannon merumuskan teori matematika dari informasi pada makalahnya: “*The Mathematical Theory of Communications*”, di mana untuk pertama kalinya informasi dapat dikuantifikasi dan satuan dari informasi ini diberi nama *bit* [1]. Teori Shannon memungkinkan informasi dapat disampaikan melalui saluran yang berderau, yang menjadi dasar komunikasi digital yang saat ini kita pakai pada perangkat elektronik, seperti komputer dan telepon genggam (*Smart Phone*).

Secara garis besar, perangkat dalam teknologi informasi dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu: alat pengolah informasi, alat penyimpan atau perekam informasi, dan alat komunikasi. Termasuk dalam alat pengolah informasi adalah berbagai macam komputer dan prosesor yang ada di dalam peralatan elektronik. *Compact Disk*, *flash memory*, dan *hardisk* termasuk kedalam alat penyimpan informasi; sedangkan radio, televisi, dan telepon dikategorikan sebagai alat komunikasi. Saat ini, ketiga jenis peralatan tersebut dapat berada pada satu perangkat, misalnya telepon genggam atau komputer jinjing.

Sebagian besar alat pengolah informasi, atau komputer, yang ada saat ini bekerja berdasarkan prinsip yang sama, yang dapat dimodelkan sebagai *Mesin Turing*. Hal ini diformulasikan kedalam *Extended Church-Turing Thesis* yang menyatakan bahwa semua proses komputasi (yang realistik) dapat dimodelkan sebagai *Mesin Turing* (probabilistik) [2, 3, 4].

Meskipun sebagian besar permasalahan sehari-hari dapat ditangani oleh komputer berbasis *Mesin Turing*, ada sekelompok permasalahan yang tidak dapat dipecahkan dalam waktu yang realistis, yaitu masalah yang tergolong sebagai *hard problems* [5]. Ini adalah masalah-masalah yang pertumbuhan kompleksitasnya sangat cepat-lebih cepat dari fungsi polinomial, yakni yang tumbuh secara eksponensial atau faktorial. Contoh permasalahan yang demikian

antara lain adalah TSP (*Traveling Salesman Problem*), pemfaktoran bilangan bulat, dan simulasi kuantum (*quantum simulation*). Bahkan, sulitnya memfaktorkan bilangan bulat akhirnya dimanfaatkan untuk menyandikan pesan rahasia yang hingga kini dipakai secara luas, yaitu sistem kriptografi kunci publik RSA (*Rivest-Shamir-Adleman*) [6]. Ketidakmampuan dari komputer klasik untuk melakukan simulasi kuantum membuat Richard Feynman menyarankan agar simulasi kuantum itu juga dilakukan oleh suatu perangkat yang bekerja secara kuantum [7]. Saran dari Feynman ini membuat peneliti mulai memikirkan suatu komputer yang prinsip kerjanya berbeda dari komputer klasik yang berbasis Mesin Turing, yaitu komputer kuantum.

3.3 SEKILAS FISIKA KUANTUM

Fisika Kuantum lahir karena adanya fenomena-fenomena fisika yang tidak dapat dijelaskan dengan konsep-konsep Fisika Klasik, antara lain: radiasi benda hitam, efek fotolistrik, spektrum radiasi atom, stabilitas atom, dan peluruhan inti atom (radioaktivitas).

Fenomena tersebut hanya bisa dijelaskan jika energi (radiasi) terkuantisasi, adanya sifat dualitas partikel-gelombang, dan berlakunya prinsip ketidakpastian. Teori kuantum juga dipakai untuk menjelaskan gejala superkonduktivitas, superfluiditas, spin partikel, penerobosan kuantum, dan emisi terstimulasi.

Pemahaman yang baru pada dunia fisis ini memberi perubahan besar pada kehidupan manusia. Berbagai teknologi baru yang berbasis Fisika Kuantum terlahir, yaitu: transistor, dioda/LED, laser, superkonduktor, spektroskopi NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*), sistem pencitraan MRI, kamera digital, mikroskop elektron, dan jam atom. Perubahan besar ini disebut sebagai revolusi (teknologi) kuantum yang pertama.

3.4 REVOLUSI KUANTUM KEDUA

Di dalam sebuah komputer kuantum, peran dari bit klasik digantikan oleh bit kuantum atau qubit. Jika bit klasik hanya dapat bernilai “0” atau “1” pada suatu saat, sebuah qubit bisa berada dalam kondisi superposisi dari bit “0” dan bit “1” di saat yang bersamaan. Dengan

komputer kuantum, maka simulasi kuantum dapat dilakukan dengan lebih efisien. Demikian pula permasalahan pada *hard problems* dapat dipecahkan dengan jauh lebih cepat. Komputer kuantum yang ada saat ini dapat berupa *universal quantum logic gate* atau *quantum annealer*.

Pada tahun 2019, laboratorium Google mengumumkan bahwa Sycamore; sebuah komputer kuantum universal gate yang memiliki 53 qubit, berhasil menyelesaikan satu jenis perhitungan hanya dalam waktu 200 detik untuk suatu permasalahan yang oleh superkomputer tercepat saat itu pun perlu waktu sekitar 10.000 tahun [8]. Peristiwa ini, yang disebut sebagai Supremasi Kuantum, menjadi tonggak sejarah dalam perkembangan komputasi. Supremasi kuantum ini menyanggah keberlakuan Tesis *Extended Church-Turing*.

Pada tahun 1994 Peter Shor menemukan algoritma kuantum untuk memfaktorkan bilangan bulat yang secara teoretis jauh lebih cepat dari algoritma pemfaktoran klasik [9]. Suatu komputer kuantum yang dapat mengimplementasikan algoritma Shor akan sanggup memecahkan kunci penyandian RSA dengan sangat mudah. Hal ini mengancam keamanan dari data-data tersandi. Dengan demikian, sistem penyandian baru; yaitu sistem penyandian pasca-kuantum, harus dikembangkan untuk menjaga keamanan informasi pada pesan rahasia. Dua di antara berbagai macam komunikasi kuantum atau QKD (*Quantum Key Distribution*), yang juga memanfaatkan fisika kuantum, adalah sistem BB84 yang ditemukan oleh Bennet-Brassard [10] dan sistem E91 yang ditemukan oleh Artur Ekert [11]. Sistem BB84 bekerja berdasarkan prinsip *non-cloning theorem* dari suatu qubit, sedangkan E91 memanfaatkan sifat keterbelitan (*entanglement*) dari pasangan partikel.

Kemampuan memanipulasi satu unit kuantum dan pemanfaatan *entanglement* antar-qubit memungkinkan lahirnya teknologi baru yang berbeda dari teknologi kuantum sebelumnya. Berbagai perangkat kuantum yang bekerja berdasarkan paradigma baru akan lahir. Inilah yang disebut sebagai revolusi teknologi kuantum kedua, yang mencakup bidang-bidang: komputasi kuantum, komunikasi kuantum, dan penginderaan kuantum. Komputasi kuantum memungkinkan perhitungan untuk memecahkan berbagai permasalahan *hard-problems*. Komunikasi atau enkripsi kuantum

menjamin keamanan data; di mana kerahasiaan data dijamin oleh Hukum Fisika. Penginderaan kuantum memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat dari beberapa besaran fisis, seperti kuat medan magnet dan kuat medan gravitasi.

3.5 PERKEMBANGAN TERKINI

Berbagai perusahaan IT dunia telah terjun langsung untuk terlibat dalam pengembangan teknologi kuantum; antara lain: AT&T, Google, IBM, Microsoft, Intel, dan Alibaba. Dalam pelaksanaannya, perusahaan-perusahaan tersebut berkolaborasi dengan berbagai perguruan tinggi, misalnya: AT&T-Caltech, Alibaba-Chinese Academy of Sciences, Fujitsu/NEC-Univ.Tokyo, Nokia/Bell Labs-Oxford University, Raytheon-MIT, Toshiba-Univ Cambridge, dan Spectral-NUS. Bahkan, pengembangan teknologi kuantum telah menjadi prioritas nasional di beberapa negara, misalnya: Amerika Serikat, RRC, Inggris, Uni Eropa, dan Australia. Pada di awal 2020 yang lalu, pemerintah India mengalokasikan miliaran dolar dana khusus untuk memacu perkembangan Komputasi Kuantum di negaranya.

Di Indonesia, teknologi kuantum mulai menjadi perhatian di kalangan peneliti dan akademisi. Penelitian secara mandiri di STEI-ITB telah dimulai pada pertengahan tahun 2010-an, mulai dari pengembangan algoritma kuantum untuk memecahkan permasalahan optimasi [12]. Salah satu contoh masalah ini yang memiliki kaitan langsung dengan bidang keilmuan STEI adalah pencarian kode ortogonal, khususnya sekumpulan kode biner yang membentuk matriks Hadamard [13]. Matriks ini memiliki aplikasi luas pada bidang komunikasi sebagai bagian dari sistem komunikasi CDMA (*Code Division Multiple Access*) dan juga dipakai dalam sistem kode pengoreksi kesalahan (*ECC-Error Correcting Code*) untuk komunikasi wahana antariksa dengan Bumi.

Pendekatan yang dipakai pada pencarian matriks Hadamard tersebut adalah optimisasi dengan *Quantum Annealing* [14]. Hasil awal dari penelitian ini dipublikasikan pada tahun 2019 dan mendapat perhatian cukup banyak dari komunitas kuantum [15]. Realisasi algoritma pada *quantum annealing processor*, yaitu *D-Wave*, saat itu baru berhasil menemukan matriks Hadamard berukuran kecil, yaitu 2x2 dan 4x4.

Pada publikasi terbaru tahun 2022, telah dikembangkan algoritma baru yang merupakan hasil kuantisasi dari metode-metode klasik dari pencarian matriks Hadamard [16]. Realisasi pada *D-Wave* dari algoritma ini berhasil menemukan matriks berukuran jauh lebih besar dari sebelumnya, yaitu di atas 100x100. Salah satunya bahkan merupakan matriks Hadamard berukuran 92x92 yang pernah menjadi buruan peneliti, hingga akhirnya ditemukan di era 1960-an oleh tiga ilmuwan JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) dengan menggunakan komputer tercanggih saat itu, yaitu IBM/7090 *Mainframe* [17]. Diharapkan beberapa tahun ke depan algoritma ini semakin berkembang hingga dapat menemukan matriks Hadamard yang belum berhasil ditemukan oleh komputer klasik. Jika hal ini terjadi, maka kita ikut berkontribusi dalam pengembangan komputasi kuantum secara signifikan karena berhasil mendemonstrasikan supremasi kuantum dalam ranah terapan; suatu langkah berikutnya dari supremasi kuantum yang dicapai oleh Lab Google di tahun 2019.

3.6 PENUTUP

Kita berada di suatu masa dimana suatu paradigma kuantum yang berbeda dari sebelumnya mulai dapat dimanfaatkan dan memberikan solusi yang tidak terbayangkan. Keterlibatan dari dunia industri dan negara-negara maju dalam mengembangkan teknologi ini akan berpengaruh besar pada kehidupan manusia. Kita tidak boleh tinggal diam sebagai penonton dari kemajuan yang terjadi akibat Revolusi Kuantum Kedua. Teknologi ini harus bisa kita kuasai, teliti, dan kembangkan agar kita tidak semakin tertinggal dari negara lain.

DAFTAR PUSTAKA

Shannon, Claude Elwood. "A Mathematical Theory of Communication." *Bell System Technical Journal*, vol.27, no. 3, 1948, pp.379–423.

- [1] Church, Alonzo. "An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory." *American Journal of Mathematics*, vol.58, no.2, 1936, pp.345–363.
- [2] Turing, Alan Mathison. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." *Proceedings of*

- the London Mathematical Society, vol.2, no. 42, 1936, pp.230–65.
- [3] Bernstein, Ethan, and Vazirani, Umesh. "Quantum Complexity Theory." *SIAM Journal on Computing*. vol. 26, no. 5, 1997, pp.1411–1473.
 - [4] Karp, Richard Manning. "Reducibility Among Combinatorial Problems." *Complexity of Computer Computations*, edited by Raymond E. MillerJames W. ThatcherJean D. Bohlinger. 1972, pp. 85–103.
 - [5] Rivest, Ron et al. "A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems". *Communications of the ACM*, vol.21, no. 2, 1978, pp.120–126.
 - [6] Feynman, Richard Phillips. "Simulating physics with computers." *International Journal of Theoretical Physics*, No.21, 1982, pp.467–488.
 - [7] Arute, Frank et al. "Quantum supremacy Using a Programmable Superconducting Processor." *Nature*, no. 574, 2019, pp.505–510.
 - [8] Shor, Peter Williston. "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring." *Proc. 35th Ann. Symp. on Found. of Computer Science*, 1994, pp.124–134.
 - [9] Bennett, Charles Henry, and Brassard, Giles. "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing." *Proc. of IEEE Int. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing*, Vol. 175, 1984, pp.8.
 - [10] Ekert, Artur Konrad. "Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem." *Physical Review Letters*. Vol.67, no. 6, 1991, pp. 661–663.
 - [11] Suksmono, Andriyan Bayu. "Finding a Hadamard Matrix by Simulated Quantum Annealing." *Entropy*, vol.20, no. 2, 2018, pp.141.
 - [12] Sylvester, James Joseph. "Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tessellated Pavements in Two or More colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-work, and the Theory of Numbers." *Philosophical Magazine*, no. 34, 1867, pp.461–475.
 - [13] Kadowaki, Tadashi, and Nishimori, Hidetoshi. "Quantum annealing in the transverse ising model." *Physical Review E*, vol. 58, no.5, 1998, pp.5355–5363.

- [14] Suksmono, Andriyan Bayu, and Minato, Yuichiro. "Finding Hadamard Matrices by a Quantum Annealing Machine." Scientific Reports, no.9, 2019, pp.14380.
- [15] Suksmono, Andriyan Bayu, and Minato, Yuichiro. "Quantum Computing Formulation of Some Classical Hadamard Matrix Searching Methods and Its Implementation on a Quantum Computer." Scientific Reports, no.12, 2022, pp.197.
- [16] Baumert, Leonard Daniel et al. "Discovery of An Hadamard Matrix of Order 92." Bulletin of the American Mathematical Society, vol.68, no.3, 1962, pp.237-238.



METaverse AND VIRTUAL LAB FOR HIGHER EDUCATION: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES

Yusep Rosmansyah

EduTex Research Team, Bandung Institute of Technology

Abstract

Metaverse regains popularity recently due to a public announcement made by a social media giant. Practically, it can be viewed as a superset of various virtual environments, including simulators and virtual laboratories (labs), which have been popular long before. This article discusses how the metaverse and virtual labs bring potential advantages for higher education, what opportunities and challenges are, and how universities can incorporate them into learning curricula in stages. Implementing the virtual labs, integrated with or by adopting important necessary features of the metaverse, opens up transformative opportunities for higher education. They are immersive, engaging, interactive, more accessible than traditional lab, collaborative, risk-free environment for experimentation, cost-effective for accommodating larger student populations, and intrinsically supporting experiential learning. However, these opportunities come with challenges that need addressing for successful implementation, such as infrastructure and technology provision, pedagogy and content development, faculty training, information security, and equity issues. It becomes obvious that universities should adopt these technologies wisely by including them in their digital transformation plan and implementation strategies.

4.1 INTRODUCTION

In this article, the metaverse is not a brand name announced by a social media giant. Rather, summarizing from Stephenson (1992), Ball (2020), Rosedale (2018), Davidson & Eagleman (2018), and also Zuckerberg (2021), we define it as a virtual shared environment where users can interact with each other and with digital objects immersively and in real-time. It is a virtual reality that goes beyond individual experiences and aims to create a comprehensive virtual world that simulates reality. The metaverse can encompass various applications, platforms, and experiences, including social interactions, gaming, commerce, and education.

As a precursor to the metaverse, a virtual laboratory (lab) refers to a simulated environment that replicates a physical laboratory or work field setting (Chaturvedi, 2013; Kwiatkowski, 2010; Smith, 2007)). It allows students to engage in laboratory or field work activities, conduct experiments, and explore scientific concepts in a digital format. Virtual labs offer a range of interactive features, such as simulated experiments, data collection and analysis, and virtual instruments, enabling students to gain practical skills and knowledge in a controlled and accessible environment.

The metaverse is a broader concept that encompasses diverse virtual environments. The virtual lab, in contrast, can be a more specific computer-based virtual world that focuses on providing simulated laboratory experiences and field activities, which can be integrated into a metaverse. In other words, the virtual lab can be viewed as a subset or a component of the broader metaverse.

Scope of discussion in this article will be limited to the metaverse features that are shared with virtual lab for the benefit of learning and other educational purposes. For simplicity, we will refer to them collectively as “virtual lab”. Further, the virtual lab can be part of a metaverse or as an independent unit. Its most important characteristic is that it can serve as a platform where students can access virtual lab resources, collaborate with peers and instructors, and engage in realistic scientific simulations. The more advance version of it can enhance the virtual lab experience by providing a broader context, social interactions with diverse multiculture

worldwide, and opportunities for cross-disciplinary collaborations.

When both are integrated and harmonized, the metaverse and virtual lab offer a powerful combination for immersive and interactive learning experiences. They provide students with opportunities to explore and experiment in virtual environments, overcoming limitations of physical spaces, fostering collaboration, and facilitating access to resources and expertise from around the world. The integration of the metaverse and virtual lab can enhance the authenticity, accessibility, and effectiveness of laboratory-based education in the digital age.

It is worth mentioning that neither the metaverse nor the virtual lab can replace the real field and actual lab. It can only help student better prepare before conducting experiments and activities in the real field and actual lab. Think of a flight simulator as a training and practice tool for a prospective pilot to familiarize themselves with flying and navigating an actual aircraft from the cockpit.

4.2 RATIONALES

Incorporating the metaverse and virtual lab into higher education brings numerous opportunities. It offers immersive and engaging learning experiences by providing interactivity, realism, accessibility, collaboration, visualization, and personalization. These elements can be combined to create a dynamic and interactive learning environment that captivates students' attention, promotes active participation, and enhances their engagement and understanding of complex topics. Elaborated further, a few important reasons why virtual labs and the metaverse offer promising advantages for higher education include:

- 1 **Interactivity and Hands-on Learning.** Virtual labs and the metaverse allow students to actively engage with the learning materials and concepts. Instead of passively observing or reading about a topic, students can interact with simulations, manipulate variables, conduct experiments, and observe the outcomes in real-time. This hands-on approach promotes active learning, critical thinking, and deeper understanding.
- 2 **Realistic and Dynamic Environments.** These technologies provide realistic and dynamic environments that simulate real-world

scenarios. Virtual labs replicate physical laboratory settings, complete with equipment, materials, and procedures, allowing students to practice and develop practical skills. The metaverse creates immersive virtual worlds with rich visuals, sounds, and interactive elements, enhancing the sense of presence and engagement.

- 3 Accessibility and Flexibility. Virtual labs and the metaverse overcome limitations of physical space and time, making education more accessible and flexible. Students can access virtual labs or metaverse platforms from anywhere and at any time, eliminating the constraints of physical proximity to on-campus facilities. This accessibility enables students to engage in learning activities at their own pace and convenience, accommodating diverse schedules and learning styles.
- 4 Collaboration and Global Connections. Virtual labs and the metaverse facilitate collaboration among students and foster global connections. Students can work together on experiments, problem-solving activities, or projects in virtual environments, regardless of their physical locations. This collaborative nature encourages peer learning, teamwork, and cross-cultural understanding as students interact with diverse perspectives and experiences.
- 5 Visualization and Simulation: These technologies offer visualization tools and simulations that enhance comprehension of complex concepts. Visual representations can make abstract or intricate ideas more tangible and understandable. Simulations allow students to observe cause-and-effect relationships, conduct experiments with variables, and explore different scenarios, promoting deeper comprehension and critical thinking.
- 6 Personalized and Adaptive Learning. Virtual labs and the metaverse have the potential to offer personalized and adaptive learning experiences. Through data analytics and AI algorithms, these technologies can track students' progress, identify areas of strength or weakness, and provide customized feedback or recommendations. This personalized approach supports individualized learning pathways, addressing the diverse needs and learning styles of students.

- 7 These promising advantages definitely require resourceful effort and time to plan, develop and implement. With the advancement of computing and ICT (information and communication technology), and the availability of more investors, experts and developers, these potentials will soon become reality.

4.3 OPPORTUNITIES

In this section, we will explore the myriad of opportunities that virtual labs and the metaverse bring to higher education, focusing on their potential to improve learning engagement, enhance learning outcomes, foster collaboration, promote accessibility, and prepare students for the future.

4.3.1 Improved Student Engagement

These technologies offer immersive and engaging learning experiences that surpass traditional methods, enhancing student engagement and understanding. By leveraging interactive simulations, virtual field trips, collaborative problem-solving, and augmented reality, these technologies enable students to actively participate in their education, explore complex concepts, and develop practical skills in a dynamic and interactive manner. In the following there are some examples and use cases that illustrate how these technologies enhance student engagement and understanding:

- 1 **Virtual Science Experiments.** Virtual labs allow students to conduct realistic and interactive science experiments in a digital environment. For example, in a biology class, students can virtually dissect animals, observe cell structures, or simulate ecological processes. They can manipulate variables, collect data, and analyze results, providing a hands-on experience that enhances their understanding of scientific concepts.
- 2 **Interactive Simulations.** The metaverse offers a platform for interactive simulations that engage students in experiential learning. For instance, in a physics course, students can participate in a virtual simulation of building and launching rockets. They can experiment with different designs, measure the impact of variables like thrust and angle, and observe the

- outcomes, enabling them to grasp principles of physics in a practical and engaging way.
- 3 Virtual Field Trips. With the metaverse, students can take virtual field trips to explore diverse locations and environments. For instance, in a geography class, students can virtually visit natural wonders like the Grand Canyon or historical sites like the pyramids of Egypt. They can navigate through 3D representations, interact with artifacts, and engage in guided tours or educational activities, providing a rich and immersive learning experience.
 - 4 Collaborative Problem Solving. The metaverse enables collaborative problem-solving among students. In a computer science course, for example, students can work together in a virtual coding environment to solve programming challenges. They can simultaneously edit code, share ideas, and debug programs in real-time, fostering teamwork, critical thinking, and communication skills.
 - 5 Augmented Reality (AR) Experiences. The combination of virtual labs and the metaverse can incorporate augmented reality to enhance learning. For instance, in a chemistry class, students can use AR-enabled devices to overlay virtual chemical reactions onto physical objects, allowing them to visualize and interact with molecular structures in real-time. This hands-on approach deepens their understanding of complex chemical processes.
 - 6 Virtual Internships and Workshops. The metaverse can provide opportunities for virtual internships and workshops, connecting students with industry professionals and experts worldwide. For example, students pursuing a business degree can participate in a virtual internship program where they collaborate with professionals, work on real-world projects, and gain practical skills and industry insights.

4.3.2 Improved Accessibility

The metaverse and virtual labs promote accessibility, breaking barriers of physical space and time by providing education remotely to diverse learners. By leveraging technology, these tools break down barriers of physical distance, overcome resource limitations, and

create inclusive learning environments, making education more accessible and equitable for all. Here are some examples and use cases that illustrate how these technologies enable education to reach diverse learners, globally:

- 1 Remote Learning. The metaverse and virtual labs allow learners to access educational resources and participate in learning activities remotely. Students can engage in virtual classrooms, attend lectures, collaborate on projects, and access course materials from anywhere in the world. This flexibility enables individuals who may not have access to traditional educational institutions or who face geographical or logistical constraints to pursue their education.
- 2 Inclusive Education. These technologies promote inclusivity by accommodating learners with diverse needs and abilities. Virtual labs can provide adaptive features, such as adjustable difficulty levels or alternative representations, to support learners with different learning styles or disabilities. The metaverse can create inclusive virtual environments where students can navigate, interact, and learn without physical barriers or discrimination.
- 3 Global Learning Communities. The metaverse facilitates the formation of global learning communities. Learners from different countries and cultural backgrounds can come together in virtual spaces to exchange ideas, collaborate, and learn from each other. This multicultural interaction fosters cross-cultural understanding, promotes diversity, and exposes learners to different perspectives and experiences.
- 4 Professional Development and Lifelong Learning. Virtual labs and the metaverse offer opportunities for professionals to engage in continuous learning and professional development. Through virtual workshops, simulations, and skill-building activities, individuals can acquire new knowledge and enhance their expertise without the need for physical attendance at conferences or training programs. This flexibility allows professionals to stay updated and relevant in their fields.
- 5 Access to Specialized Equipment and Resources. Virtual labs provide access to expensive or specialized equipment and resources that may be otherwise inaccessible to learners. For

- example, in fields such as engineering or healthcare, virtual labs can simulate the use of sophisticated machinery or medical procedures. This enables learners to gain hands-on experience and practice without the need for physical equipment or facilities.
- 6 **Language and Cultural Learning.** The metaverse offers opportunities for language and cultural learning through immersive experiences. Learners can engage in language immersion programs where they interact with virtual environments that replicate real-world cultural contexts. They can practice language skills, engage in conversations with virtual characters, and explore cultural nuances, enhancing their language proficiency and cultural competence.
 - 7 **Distance Education and Open Education.** Virtual labs and the metaverse support distance education initiatives and open educational resources. Institutions can create virtual lab platforms or metaverse-based learning environments that provide access to courses, lectures, and educational content on a global scale. Learners can enroll in online courses, access learning materials, and engage in interactive activities, regardless of their location or institutional affiliation.

These examples demonstrate how the metaverse and virtual labs promote accessibility by providing education remotely to diverse learners, globally. The technologies can help overcome the limitations of physical distance and resource availability, creating more inclusive learning environments that are accessible to all.

4.3.3 Collaborative Learning

The metaverse and virtual lab have the power to facilitate collaborative learning and create global networks, allowing students to collaborate with peers and experts from around the world, fostering cross-cultural understanding. Here are some examples and use cases that illustrate how these technologies foster collaboration:

- 1 **Virtual Group Projects.** Students can collaborate on virtual group projects within the metaverse or virtual lab. They can work together, regardless of their physical locations, to solve problems, conduct experiments, or create virtual artifacts. This

- collaborative approach promotes teamwork, communication, and the exchange of ideas among students from different cultural backgrounds.
- 2 **Cross-Institutional Collaboration.** The metaverse and virtual labs provide platforms for cross-institutional collaboration. Students from different universities or educational institutions can connect and work together on shared projects or research initiatives. This collaboration enhances diversity, as students bring unique perspectives, expertise, and cultural insights to the collaborative process.
 - 3 **International Expertise and Guest Lectures.** Through the metaverse, institutions can invite experts and guest lecturers from different parts of the world to deliver virtual lectures or participate in discussions. Students can benefit from the expertise and perspectives of these global experts, gaining insights and knowledge that go beyond their local context.
 - 4 **Virtual Conferences and Symposiums.** The metaverse can host virtual conferences, symposiums, or academic events where students and researchers from various countries can come together to present their work, engage in discussions, and share insights. These virtual gatherings provide a platform for cross-cultural exchange, fostering mutual understanding and collaboration among participants.
 - 5 **Language Exchange Programs.** The metaverse can facilitate language exchange programs where students from different language backgrounds can engage in language learning activities together. They can practice conversational skills, provide language support to each other, and gain cultural insights while building cross-cultural friendships.
 - 6 **Collaborative Research and Innovation.** Virtual labs provide opportunities for students to engage in collaborative research and innovation projects. They can work together on scientific experiments, data analysis, or the development of virtual prototypes. Collaboration in virtual labs allows students to leverage the expertise and perspectives of their peers from different parts of the world, leading to innovative and interdisciplinary outcomes.

- 7 **Peer Learning and Support.** The metaverse and virtual labs create environments where students can provide peer learning and support. They can engage in discussions, share resources, and provide feedback to each other. This peer-to-peer interaction enhances learning outcomes, as students learn from different perspectives and receive support from their peers across cultural boundaries.

These examples demonstrate how the metaverse and virtual lab foster collaborative learning and global networks. By connecting students from different cultural backgrounds, these technologies promote cross-cultural understanding, broaden perspectives, and create opportunities for students to learn from and with others. The collaborative nature of these platforms strengthens teamwork skills, communication abilities, and cultural competency, preparing students for a globally interconnected world.

4.3.4 Risk-Free Environment

The metaverse and virtual lab provide a risk-free environment for experimentation, allowing students to conduct experiments without physical constraints, enabling trial-and-error approaches and deeper learning. Here are some examples and use cases that illustrate how these technologies support risk-free experimentation and deeper learning:

- 1 **Simulations and Virtual Experiments.** Virtual labs provide simulated environments where students can conduct experiments virtually. They can manipulate variables, observe outcomes, and analyze data in a controlled and safe environment. For example, in a chemistry virtual lab, students can mix chemicals and observe the resulting reactions without the risk of accidents or the need for expensive laboratory equipment.
- 2 **Complex and High-Risk Experiments.** The metaverse and virtual labs allow students to engage in complex and high-risk experiments that may be impractical or dangerous to perform in a traditional laboratory setting. For instance, in a physics virtual lab, students can explore concepts such as astrophysics or particle

- physics, where experiments involving large-scale equipment or extreme conditions are not feasible in a physical lab.
- 3 **Iterative Learning and Feedback.** Virtual labs provide students with the opportunity to iterate their experiments and receive immediate feedback. They can adjust variables, observe outcomes, and modify their approach based on the results. This iterative process promotes a deeper understanding of the underlying principles and fosters critical thinking and problem-solving skills.
 - 4 **Exploration of Hypothetical Scenarios.** Virtual labs and the metaverse allow students to explore hypothetical scenarios and observe the consequences of their actions. For example, in a biology virtual lab, students can simulate the effects of environmental changes on ecosystems or study the impact of genetic modifications on organisms. These simulations enable students to engage in thought experiments and explore the boundaries of scientific knowledge.
 - 5 **Interdisciplinary Experiments.** The virtual environment of the metaverse and virtual labs enables students to engage in interdisciplinary experiments that integrate concepts from multiple fields. For instance, students can explore the intersection of biology and computer science by simulating the behavior of biological systems using computational models. This interdisciplinary approach fosters creativity, innovation, and a holistic understanding of complex phenomena.
 - 6 **Data Analysis and Visualization.** Virtual labs provide students with opportunities to analyze and visualize large datasets that may not be easily accessible in a traditional laboratory setting. They can learn data analysis techniques, manipulate data parameters, and gain insights from visual representations of the data. This enhances their skills in data interpretation and allows them to explore scientific phenomena from different angles.
 - 7 **Exploration of Inaccessible Environments.** The metaverse and virtual labs enable students to explore environments that are otherwise inaccessible, such as extreme weather conditions, outer space, or microscopic worlds. Through virtual simulations, students can study phenomena that are difficult to observe

directly, broadening their scientific understanding and expanding their knowledge beyond what is possible in the physical realm.

These examples demonstrate how the metaverse and virtual lab provide a risk-free environment for experimentation, enabling students to engage in hands-on learning, exploration, and deeper understanding. By removing physical constraints and offering safe spaces for trial-and-error approaches, these technologies empower students to take risks, make mistakes, and learn from them, fostering a culture of experimentation and discovery.

4.3.5 Cost-Effective

This specific opportunity should be taken with consideration. Developing a virtual lab and integrating it with the metaverse is by no means cheap. However, being digital, a virtual lab can be accessed by large number of users at the same time, which is not the case for the physical lab. Surely, there are cases where building physical lab maybe less expensive than developing a corresponding virtual lab. In general, implementing the metaverse and virtual lab can be cost-effective, as it reduces expenses associated with physical infrastructure and allows for accommodating larger student populations. In the following, there are some examples and use cases that illustrate how these technologies offer cost-effective solutions:

- 1 Reduction of Physical Infrastructure. Virtual labs and the metaverse reduce the number (not eliminate completely) of dedicated physical laboratory spaces, equipment, and maintenance. Instead of building and maintaining multiple identical physical labs, institutions can reduce the number of them and the fund is invested for developing virtual lab setups that can be accessed remotely by students. This reduces physical infrastructure costs, such as construction, equipment purchase, and facility maintenance.
- 2 Scalability and Flexibility. The metaverse and virtual labs provide scalable and flexible solutions for accommodating larger student populations. With virtual environments, multiple students can access the same lab simultaneously, allowing institutions to serve

- a greater number of students without the constraints of physical space limitations. This scalability eliminates the need for additional physical lab setups and associated costs.
- 3 **Accessibility for Remote and Diverse Learners.** Virtual labs and the metaverse enable institutions to reach remote learners and diverse student populations without the need for them to be physically present on campus. This reduces costs associated with student transportation, accommodation, and other logistics. Institutions can offer educational opportunities to a wider audience, including international students and those with physical or geographical limitations.
 - 4 **Cost Savings on Equipment and Supplies.** Virtual labs often simulate experiments and provide virtual equipment and materials, reducing the need for expensive laboratory equipment and supplies. Institutions can allocate resources more efficiently by investing in virtual software and tools, which can be shared among multiple students, rather than purchasing too many identical physical equipment for each student.
 - 5 **Extended Operating Hours.** Virtual labs and the metaverse can be accessible 24/7, allowing students to engage in experiments and learning activities at their convenience. This extended access eliminates the need for staff or instructors to be present during specific time slots, reducing labor costs associated with physical lab supervision.
 - 6 **Integration of Open Educational Resources.** Virtual labs and the metaverse can be integrated with open educational resources, including virtual experiment simulations, online textbooks, and educational videos. By leveraging freely available resources, institutions can reduce the costs of developing and maintaining proprietary learning materials, making education more affordable and accessible for students.
 - 7 **Long-Term Cost Savings.** While the initial setup of virtual labs and the metaverse may require a large sum of investment, the long-term cost savings can be significant. Institutions can update and improve virtual lab setups and software without incurring the high costs associated with updating physical equipment or renovating lab spaces.

These examples highlight how the implementation of the metaverse and virtual lab can be cost-effective for higher education institutions. By reducing physical infrastructure costs, accommodating larger student populations, and leveraging virtual resources, institutions can optimize their budget allocations, improve accessibility, and offer quality education at a lower overall cost.

4.3.6 Experiential Learning

The metaverse and virtual lab provide opportunities for experiential learning, enabling students to apply theoretical knowledge in practical contexts. This hands-on approach fosters critical thinking, problem-solving skills, and a deeper understanding of the subject matter. Here are some examples and use cases that illustrate how these technologies promote experiential learning:

- 1 Virtual Science Experiments. In a virtual lab, students can engage in science experiments by manipulating variables, conducting simulations, and analyzing data. For instance, in a physics virtual lab, students can explore the principles of motion by setting up different scenarios and observing the resulting outcomes. This experiential learning allows students to connect theoretical concepts with real-world applications.
- 2 Virtual Field Trips. The metaverse offers the opportunity for virtual field trips, where students can explore various environments and engage in interactive experiences without leaving the classroom. For example, in a ecotourism class, students can virtually visit different geographical locations, examine natural features, and analyze their impact on the environment. This experiential learning enhances their understanding of ecotourism concepts and promotes a deeper connection to the subject matter.
- 3 Virtual Simulations. Virtual simulations provide students with realistic and immersive experiences that simulate real-world scenarios. For instance, in a business management course, students can participate in a virtual business simulation where they make strategic decisions, analyze market trends, and experience the consequences of their choices. This experiential

- learning approach develops critical thinking, decision-making skills, and an understanding of business dynamics.
- 4 **Role-playing and Virtual Scenarios.** The metaverse allows for role-playing and interactive virtual scenarios that simulate real-life situations. For instance, in a psychology course, students can engage in virtual counseling sessions, where they take on the role of a counselor and interact with virtual clients facing various challenges. This experiential learning enables students to apply psychological theories and develop their communication and problem-solving skills.
 - 5 **Virtual Design and Prototyping.** Virtual labs offer opportunities for students to engage in design and prototyping activities in various disciplines. For example, in an engineering course, students can use virtual design software to create and test prototypes of complex structures or machines. This experiential learning allows students to apply engineering principles, iterate their designs, and gain practical skills in a virtual environment.
 - 6 **Collaborative Problem-Solving.** The metaverse and virtual labs support collaborative problem-solving activities where students work together to solve complex challenges. For instance, in a computer science course, students can collaborate in a virtual coding environment to develop software solutions, debug programs, and tackle programming challenges. This experiential learning approach enhances teamwork, communication, and critical thinking skills.
 - 7 **Virtual Internships and Work-Based Learning.** The metaverse provides opportunities for students to engage in virtual internships or work-based learning experiences. For example, in a business or marketing program, students can work on virtual projects, interact with virtual clients, and gain practical skills and industry insights. This experiential learning bridges the gap between theory and practice and prepares students for future careers.

These examples show how the metaverse and virtual lab promote experiential learning by providing students with hands-on, practical experiences. By engaging in simulations, virtual field trips, role-playing, and collaborative problem-solving activities, students can

apply theoretical knowledge, develop critical thinking skills, and gain a deeper understanding of the subject matter.

4.3.7 Self-Paced Exploration

The metaverse and virtual labs support self-directed learning, allowing students to explore concepts at their own pace. Students can access resources, simulations, and experiments as needed, enabling personalized learning experiences and catering to diverse learning styles. This promotes autonomy and self-motivated learning.

The metaverse and virtual labs have the potential to support self-directed learning, empowering students to take control of their educational journey and explore concepts at their own pace. Below are a few examples and use cases:

- 1 Flexibility in Learning Paths. Virtual labs and the metaverse provide students with the freedom to choose their learning paths and explore topics of interest. They can navigate through different modules or activities based on their individual needs and preferences. For instance, in a virtual physics lab, students can choose to focus on specific experiments or theories that align with their learning goals, allowing for personalized and self-directed exploration.
- 2 Interactive and Adaptive Learning Environments. These technologies offer interactive and adaptive learning environments that respond to students' actions and provide real-time feedback. For example, in a virtual language lab, students can engage in immersive language simulations and receive instant feedback on pronunciation and grammar. They can self-assess their performance, identify areas for improvement, and design their own learning strategies accordingly.
- 3 Access to Resources and References. The metaverse and virtual labs serve as repositories of resources and references, enabling students to access a wealth of information to support their self-directed learning. These resources can include interactive tutorials, e-books, videos, and simulations. For instance, in a virtual biology lab, students can access a database of specimens, articles, and multimedia materials to deepen their understanding of biological concepts.

- 4 Experimentation and Inquiry-Based Learning. Virtual labs and the metaverse promote experimentation and inquiry-based learning, allowing students to explore and discover knowledge independently. They can engage in virtual experiments, analyze data, and draw conclusions, fostering a sense of curiosity and critical thinking. For example, in a virtual chemistry lab, students can manipulate variables, observe chemical reactions, and draw conclusions based on their findings, promoting self-directed exploration and inquiry.
- 5 Reflection and Self-Assessment. The metaverse and virtual labs encourage students to reflect on their learning progress and self-assess their understanding. They can review their performance, track their achievements, and identify areas for improvement. For instance, in a virtual art studio, students can create and showcase their artwork, receive feedback from peers and instructors, and reflect on their artistic development, promoting self-directed growth and self-reflection.

These examples illustrate how the metaverse and virtual labs provide students with the tools and opportunities to take charge of their learning. By offering flexible learning paths, interactive environments, access to resources, and opportunities for experimentation and reflection, these technologies empower students to pursue self-directed learning and develop essential skills such as autonomy, critical thinking, and self-assessment.

4.3.8 Personalized Feedback

Belonging to modern information system in terms of analytic system, virtual labs generate data that can be analyzed to provide personalized feedback and insights into student performance. Educators can track progress, identify areas of improvement, and provide tailored guidance to individual students. This data-driven approach offers several benefits in terms of understanding student progress, identifying areas of improvement, and tailoring instruction to individual needs. Elaborated further, in the following there are examples and use cases:

- 1 **Performance Metrics and Progress Tracking.** Virtual labs capture various performance metrics as students engage in activities and experiments. These metrics can include completion time, accuracy, efficiency, and proficiency in specific skills or concepts. By tracking and analyzing these metrics, instructors can gain insights into each student's progress, identifying areas where they excel and areas that require further attention. For example, in a virtual programming lab, data on code completion, error rates, and time taken can be analyzed to assess a student's coding proficiency and track their improvement over time.
- 2 **Adaptive Learning Paths.** Virtual labs can use data analysis techniques to adapt the learning path for each student based on their performance and individual needs. By analyzing data on previous interactions and outcomes, the system can recommend specific activities, resources, or challenges that align with the student's skill level and learning objectives. For instance, in a virtual mathematics lab, the system can analyze a student's performance in solving algebraic equations and dynamically generate customized exercises to strengthen their weak areas.
- 3 **Intelligent Feedback and Remediation.** Data collected from virtual labs can enable intelligent feedback and remediation strategies. By analyzing a student's actions, responses, and outcomes, the system can provide targeted feedback that addresses specific misconceptions or errors. For instance, in a virtual chemistry lab, if a student consistently struggles with balancing chemical equations, the system can provide step-by-step guidance and explanations tailored to their specific mistakes, helping them overcome their challenges and improve their understanding.
- 4 **Learning Analytics and Visualization.** Virtual labs generate a wealth of data that can be visualized and analyzed using learning analytics techniques. This allows instructors to gain a comprehensive overview of class performance, identify patterns or trends, and make informed instructional decisions. For instance, learning analytics can reveal common misconceptions or difficult concepts that many students struggle with, prompting

- the instructor to provide additional support or modify teaching strategies accordingly.
- 5 Individualized Assessments. Virtual labs can generate individualized assessments based on a student's performance and learning trajectory. By analyzing data from previous interactions, the system can generate personalized quizzes, assignments, or simulations that align with the student's strengths and weaknesses. This tailored assessment approach ensures that students are challenged appropriately and receive feedback that aligns with their specific learning needs.
 - 6 These examples demonstrate how virtual labs generate and analyze data to provide personalized feedback and insights into student performance. By leveraging data-driven approaches, instructors can gain a deeper understanding of each student's progress, adapt instruction to individual needs, provide targeted feedback, and foster personalized learning experiences that enhance student outcomes.

4.4 CHALLENGES

The metaverse and virtual labs promise numerous opportunities and advantages. However, the good thing usually comes at a price, and in this case, they bring along challenges. They need to be addressed for successful implementation. These challenges include:

4.4.1 Technological Infrastructure

Implementing the metaverse and virtual laboratory requires robust technical infrastructure, including high-speed Internet access, powerful computing resources, and reliable virtualization platforms. Educational institutions need to ensure that their infrastructure can support the demands of these technologies to provide seamless and immersive experiences for students.

4.4.2 Content Development

Creating virtual lab's high-quality and engaging content that aligns with the curriculum and learning objectives is a significant challenge. Virtual lab simulations need to accurately replicate real-world

scenarios and provide meaningful learning experiences. Developing high-quality virtual lab content can be time-consuming and resource-intensive, requiring collaboration between subject matter experts, instructional designers, and technologists.

4.4.3 Pedagogical Design and Integration

Designing effective learning experiences in the metaverse and virtual laboratory and integrating it into existing curricula requires careful consideration of pedagogical approaches. Educators need to rethink instructional strategies, assessment methods, and student interaction models to maximize the benefits of these technologies. Balancing the immersive nature of virtual environments with educational goals and desired learning outcomes is essential.

4.4.4 Assessment and Evaluation

Assessing student performance and providing meaningful feedback in virtual environments can present challenges. Traditional assessment methods may need to be adapted or new assessment strategies developed to capture students' skills, competencies, and understanding within the metaverse and virtual laboratory. Ensuring valid and reliable assessment practices is crucial for maintaining academic rigor. Designing effective assessment methods that capture students' practical skills and understanding of concepts can be complex. Developing appropriate evaluation criteria, grading mechanisms, and feedback processes specific to virtual lab activities is necessary to ensure fair and accurate assessment.

4.4.5 Cost and Resource Allocation

Implementing and maintaining the metaverse and virtual laboratory can involve significant financial investments. Institutions need to allocate resources for infrastructure development, software licenses, content creation, technical support, and ongoing maintenance. It is crucial to assess the cost-effectiveness and sustainability of these technologies in the long term. From the student viewpoint, procurement of user devices and equipment can also be a big obstacle. As the time of writing (2023), the cheapest user device (virtual reality) is still over USD 700 and the most advanced one reaches USD 3,500.

(excluding the price of a computing device with appropriate graphics card, which is also over USD 1,000). Procuring and maintaining a large number of these devices incurs a large amount of fund.

4.4.6 Technical Support and Maintenance

Virtual labs integrated into the metaverse require ongoing technical support and maintenance. Addressing technical issues, ensuring system updates, and troubleshooting problems are critical for ensuring a smooth and uninterrupted learning experience. Educational institutions need to allocate resources for technical support personnel and establish effective processes for addressing technical concerns promptly.

4.4.7 Digital Literacy and Training

Faculty and teaching support need to develop digital literacy skills to effectively navigate and utilize the metaverse and virtual lab environments. Training programs should be implemented to familiarize educators with the tools, features, and best practices for engaging with virtual resources. Insufficient digital literacy can limit the potential benefits and hinder adoption of these technologies.

4.4.8 Privacy and Security

The metaverse and virtual labs involve the collection and storage of sensitive user data. Institutions must implement robust security measures to protect user privacy, prevent data breaches, and ensure compliance with relevant regulations. Safeguarding personal information, maintaining data integrity, and addressing privacy concerns are critical challenges in incorporating these technologies.

4.4.9 Integration with Existing Systems

Integrating the metaverse and virtual labs with existing learning management systems, student information systems, and other institutional platforms can be challenging. Ensuring seamless integration, data interoperability, and compatibility across various systems require careful planning and technical expertise.

4.4.10 Access and Equity

One of the challenges is ensuring equitable access to the metaverse and virtual laboratory for all students. Accessibility issues can arise due to variations in internet connectivity, device availability, and technological proficiency. Institutions need to consider how to bridge the digital divide and provide equal opportunities for all students to engage in virtual learning experiences.

4.4.11 Usability and User Experience

Virtual labs in the metaverse should provide an intuitive and user-friendly interface for students. Designing a seamless and immersive user experience that allows students to navigate and interact with the virtual lab environment effectively is essential. Ensuring that the virtual lab controls, tools, and functionalities are easy to understand and use is crucial for enhancing student engagement and learning outcomes.

4.4.12 Ethical Considerations

Incorporating the metaverse and virtual laboratory raises ethical considerations related to data privacy, security, and digital citizenship. Educational institutions must address issues such as data protection, user privacy, consent, and responsible use of virtual environments. Establishing clear policies and guidelines that safeguard the well-being and rights of students and instructors is essential.

Addressing these challenges requires collaborative efforts among top executive of the university, faculty, instructional designers, technology experts, and administrators. Institutions should engage in thorough planning, provide professional development opportunities, establish clear policies and guidelines, and continually assess and evaluate the effectiveness of these technologies in supporting learning outcomes. Overcoming these challenges can pave the way for a transformative learning experience by makin the opportunities and advantages offered by the metaverse and virtual labs into real benefit.

4.5 IMPLEMENTATION STAGES

Incorporating the metaverse and virtual lab for higher education is preferred to be aligned with the steps of digital transformation (when one is planned or ongoing). In the following subsections, the steps for incorporating these technologies and how they harmonize with the steps of digital transformation are briefly elaborated.

4.5.1 Vision and Strategy

- Define the vision and goals for incorporating the metaverse and virtual lab in higher education.
- Align the vision with the broader digital transformation goals of the institution, focusing on enhancing the learning experience and improving educational outcomes.

4.5.2 Leadership and Governance

- Establish leadership and governance structures to oversee the integration of the metaverse and virtual lab.
- Ensure that decision-making processes involve key stakeholders, including faculty, IT departments, and administration, to drive collaboration and alignment with the institution's digital transformation initiatives.

4.5.3 Infrastructure and Resources

- Assess and develop the necessary infrastructure and resources to support the metaverse and virtual lab.
- This includes investing in high-speed internet, robust server capabilities, virtual reality (VR) and augmented reality (AR) devices, and software platforms that facilitate virtual learning and experimentation.

4.5.4 Curriculum Design and Development

- Redesign and adapt the curriculum to incorporate the metaverse and virtual lab experiences.
- Identify courses and disciplines where virtual labs and immersive experiences can enhance student learning and engagement.

- Collaborate with faculty members to develop learning materials, simulations, and virtual scenarios that align with the curriculum objectives and leverage the capabilities of the metaverse and virtual lab.

4.5.5 Faculty Development and Support

- Provide faculty members with training and support to effectively integrate the metaverse and virtual lab into their teaching practices.
- Offer workshops, seminars, and resources that familiarize faculty with the technologies and pedagogical strategies for utilizing them.
- Foster a culture of continuous professional development to encourage faculty to explore innovative approaches and share best practices.

4.5.6 Student Engagement and Support

- Create opportunities for students to engage with the metaverse and virtual lab experiences.
- Offer orientations, workshops, and support services that help students navigate the technologies and maximize their learning outcomes.
- Foster a supportive environment where students can collaborate, experiment, and reflect on their experiences in the metaverse and virtual lab.

4.5.7 Assessment and Evaluation

- Establish assessment and evaluation mechanisms to measure the impact and effectiveness of the metaverse and virtual lab integration.
- Collect data on student engagement, learning outcomes, and satisfaction to identify areas of improvement and make informed decisions for continuous enhancement.
- Use both qualitative and quantitative methods, such as surveys, interviews, and performance assessments, to gather feedback from students and faculty.

These steps align with the broader steps of digital transformation in higher education, as they involve strategic planning, organizational alignment, technology infrastructure development, curriculum redesign, faculty and student support, and ongoing evaluation. By incorporating the metaverse and virtual lab within the framework of digital transformation, institutions can ensure a holistic and integrated approach to leveraging these technologies for enhanced teaching and learning experiences.

4.6 CONCLUSION

The rationales, opportunities, challenges, and stages on how to incorporate the metaverse along with the virtual labs have been elaborated and discussed. These technologies are still in early stages in terms of development and availability so that the challenges, particularly for universities in the developing countries where ICT infrastructure is still limited and purchasing power is low, remain immense. Nonetheless, strong commitment from top leader of the higher education will drive the inclusion, integration and implementation of the virtual labs and metaverse into the existing curricula, even when it is implemented in small steps at a time.

4.7 ACKNOWLEDGMENT

I thank my research students, the executives, and Professors' Forum of the Bandung Institute of Technology for the support. This article was co-written with ChatGPT and Google Bard.

REFERENCES

- [1] Stephenson, N. (1992). *Snow Crash*. Bantam Books.
- [2] Ball, M. (2020, July 16). The Metaverse: And How It Will Revolutionize Everything. Medium.
- [3] Rosedale, P. (2018, December 10). *What is the Metaverse?* Medium.
- [4] Davidson, A., & Eagleman, D. (2018). *The Sentient Machine: Enabling Human-Machine Collaboration*. Penguin Books.
- [5] Zuckerberg, M. (2021). *Building the Metaverse*. Facebook.
- [6] Chaturvedi, S. K. (2013). Virtual laboratories: A review of the

- literature. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 5(2), 119-139.
- [7] Kwiatkowski, M. J. (2010). Virtual laboratories: A review of the literature. *Journal of Computers in Education*, 3(1), 1-20.
- [8] Smith, J. M. (2007). Virtual laboratories: A review of the literature. *Journal of Educational Technology & Society*, 10(3), 12-21.

5

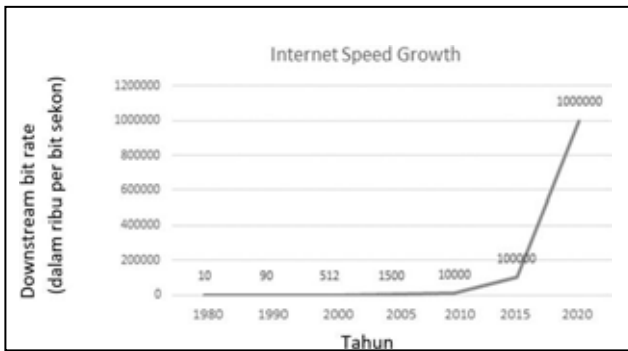
OPTIMASI LOD & MANAJEMEN ASET DALAM PENGEMBANGAN METAVERSE

Emir Mauludi Husni

Asyraf Atthariq Putra Gary

5.1 PENDAHULUAN

Perkembangan industri di dunia melaju dengan sangat pesat diiringi dengan hasrat manusia yang ingin selalu cepat dan instan. Salah satu yang mendukung perkembangan industri adalah perkembangan komunikasi yang begitu masif. Terlebih internet kini menjadi kebutuhan utama manusia dalam menjalankan aktivitasnya. Peningkatan kecepatan komunikasi sangat mendukung dalam perkembangan industri itu sendiri.



Gambar 5.1 Perkembangan kecepatan internet dari masa ke masa

Berdasarkan Gambar 5.1 [1], jika kita kembali ke awal tahun 2000, kecepatan internet yang digunakan masyarakat pada umumnya kurang mendukung untuk melakukan *virtual meeting*. Rekomendasi kecepatan internet untuk melakukan *virtual meeting* adalah 2Mbps [2]. Saat ini, hal yang tidak memungkinkan dilakukan pada awal tahun 2000, menjadi mudah saja dilakukan, mulai dari *virtual meeting*, *video call*, *streaming tanpa buffer*, *live streaming*, *game online* dan lain-lain. Dengan adanya teknologi 5G yang muncul di pasaran dan teknologi 6G yang sedang dikembangkan, masa depan interaksi manusia dengan komputer akan berkembang lebih jauh lagi.

Salah satu teknologi yang dapat kita gunakan saat ini adalah Metaverse. Metaverse berasal dari dua kata yaitu *meta* dan *verse* (*universe*). *Meta* berasal dari bahasa Yunani yang bertujuan untuk mengungkapkan rasa terima kasih atau dapat diartikan juga sebagai “ke depan (*beyond*)”. Maka Metaverse dapat diartikan sebagai “*beyond of universe*”. Selain itu, Metaverse dapat didefinisikan sebagai sebuah lingkungan virtual masif yang bergerak secara paralel dengan dunia

asli [3]. Hal tersebut disebabkan dalam Metaverse, manusia mendapatkan pengalaman baru dalam berinteraksi. Pada Metaverse yang ada saat ini, pengguna dapat melakukan aktivitas selayaknya yang dilakukan di dunia nyata. Mulai dari bekerja, mengadakan rapat, membeli properti dan lain-lain. Tidak menutup kemungkinan Metaverse akan menjadi cara baru manusia dalam mengakses internet.

Dalam mengembangkan Metaverse dibutuhkan kolaborasi dan lintas disiplin ilmu agar dalam pengembangannya dapat melihat dari berbagai sudut pandang. Menurut Ravin dan John [4], dengan kolaborasi disiplin ilmu dalam pengembangan suatu proyek dapat membuat proyek lebih baik. Salah satu kolaborasi lintas disiplin ilmu dalam pengembangan Metaverse adalah proyek *ITB Metaverse Ganesha Campus*. *ITB Metaverse Ganesha Campus* merupakan proyek kerja sama antara Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI), Fakultas Seni Rupa dan Desain (FSRD), Sekolah Arsitektur, Perencanaan, dan Pengembangan Kebijakan (SAPPK), dan Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian (FITB).

Pada pengembangan tahap awal, proyek *ITB Metaverse Ganesha Campus* akan berfokus melakukan *digital twin* pada beberapa bangunan ikonik ITB. Menurut S. Mihai [5] *digital twin* merupakan integrasi multifisik, multiskala dan simulasi probabilitas dari sebuah objek atau sistem yang menggunakan model fisik terbaik, untuk mencerminkan objek tersebut pada dunia virtual. Dengan demikian, *digital twin* dapat diinterpretasikan sebagai suatu replikasi objek di dunia nyata ke dunia virtual.

Bangunan ikonik yang menjadi fokus *twinning* pada tahap awal ini adalah Aula Timur, Plaza dan pintu utama atau pintu selatan kampus. Tahapan awal dalam pengembangan ini adalah melakukan pemindaian lingkungan yang akan dibangun menggunakan sensor *Light Detection and Ranging* (LiDAR) oleh pihak dari Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian (FITB). Hasil dari pemindaian menggunakan LiDAR berupa *point cloud*, akan dijadikan dasar untuk dimodelkan kembali oleh pihak Fakultas Seni Rupa dan Desain (FSRD) dan Sekolah Arsitektur, Perencanaan, dan Pengembangan Kebijakan (SAPPK). Hasil dari pemodelan tersebut akan diekspor ke dalam *game engine* untuk ditata kembali berdasarkan koordinat dari *point cloud*

yang telah diperoleh. *Game engine* merupakan sebuah framework perangkat lunak yang didedikasikan untuk pengembangan gim dan memuat library yang mendukung pengembangan gim tersebut [6].

Proyek Metaverse ITB Ganesha Campus sendiri akan dikembangkan dengan menggunakan *game engine* Unreal Engine 5 dan nantinya akan diekspor dalam bentuk platform Android dan PC. Unreal Engine 5 merupakan *game engine* yang dikembangkan oleh EpicGames yang meluncur pada awal 2022. Unreal Engine 5 dapat digunakan untuk berbagai macam model pengembangan gim seperti *open-world*, *first person shooter*, *role-play s*, *fighting games*, dan selain itu dapat digunakan untuk membuat video. Salah satu kelebihan dari Unreal Engine 5 adalah pengguna dapat memilih antara ingin mengembangkan gim berbasis skrip C++ atau menggunakan Blueprint. Dengan adanya Blueprint dapat memungkinkan pengguna mengembangkan gim tanpa perlu melakukan penulis skrip menggunakan C++. Faktor tersebut menjadi pertimbangan tersendiri dikarenakan tidak semua orang menguasai C++.

Setelah proyek tersebut dibangun menggunakan Unreal Engine 5, proyek *Metaverse ITB Ganesha Campus* akan diekspor untuk platform *mobile* Android dan PC. Pemilihan pengksporan untuk platform Android dengan pertimbangan bahwa hampir semua orang memiliki ponsel pintar dengan pengguna ponsel pintar di Indonesia mencapai 89% dari total penduduk [7] dan 89,81% dari total pengguna ponsel pintar di Indonesia menggunakan platform Android [8].

Pada hasil uji coba tahap awal pengembangan *ITB Metaverse Ganesha Campus* belum memungkinkan untuk didistribusikan dikarenakan berdasarkan pengujian tahap awal, *frame rate per second* (FPS) yang dihasilkan belum memenuhi kriteria layak dimainkan. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Hasil uji coba pengembangan Metaverse tahap awal

Perangkat	Chipset/CPU	GPU	RAM	FPS
Samsung S20	Exynos 990	Mali-G77 MP11	8GB	4
Poco M4 Pro	Helio G96	Mali-G57 MC2	6GB	2
Redmi 10s	Helio G95	Mali-G76 MC4	4GB	1
PC	Intel i7 8750H	GTX1050Ti	8GB	10

Berdasarkan Tabel 5.1 nilai FPS tertinggi yang diperoleh adalah 10 FPS untuk PC dan 4 FPS untuk Android. Sedangkan nilai minimum *frame rate per second* (FPS) yang dibutuhkan agar *frame* berbeda muncul sebagai gambar bergerak sehingga dapat dilihat dengan nyaman adalah 24 FPS [9]. Selain itu, file instalasi yang ada mencapai 2 GB dengan file *raw* mencapai lebih dari 300 GB. Berdasarkan permasalahan tersebut, akan diangkat menjadi topik penulisan buku ini yang bertujuan untuk mengoptimasi *Metaverse ITB Ganesha Campus* agar dapat digunakan lebih nyaman. Optimasi dapat dilakukan dengan berbagai cara beberapa di antaranya adalah manajemen aset dan pengaturan *Level of Details* (LOD). Pengaturan *Level of Details* (LOD) diperlukan dalam mengoptimasi sebuah gim dikarenakan hal tersebut berpengaruh pada tinggi atau rendahnya *frame rate per second* (FPS) yang diperoleh [10]. *Level of Details* (LOD) merupakan kumpulan poligon yang menentukan tingkat ketelitian dari sebuah objek. Fungsi dari pengaturan *Level of Detail* (LOD) adalah untuk mengurangi banyaknya poligon dan memperkecil detail dari suatu objek tertentu [11].

Selain pengaturan *Level of Detail* (LOD), cara yang akan dilakukan dalam pengoptimasian *Metaverse ITB Ganesha Campus* adalah dengan melakukan manajemen aset. Dalam pengembangan suatu aplikasi, manajemen menjadi salah satu aspek penting agar dalam pengembangan aplikasi tersebut dapat dilakukan seefisien mungkin [12]. Manajemen aset juga akan meliputi pembersihan file dari aset yang tidak diperlukan dalam pengembangan proyek agar ukuran file dapat dibuat sekecil mungkin [13].

Setelah melakukan optimasi dengan metode pengaturan *Level of Detail* (LOD) dan manajemen aset, aplikasi *Metaverse ITB Ganesha Campus* akan diuji ke beberapa segmen perangkat mulai untuk mengetahui performa dari aplikasi. Tujuan akhir dalam penulisan buku ini adalah mengoptimasikan *Metaverse ITB Ganesha Campus* agar dapat dimainkan secara nyaman dengan nilai rata-rata minimum *frame rate per second* (FPS) 24 FPS dan memiliki ukuran file lebih kecil dari sebelumnya.

5.2 METAVERSE

Kata *Metaverse* berasal dari novel bertajuk fiksi-sains oleh Snow Crash pada 1992 sebagai gabungan dari dua kata yaitu “*meta*” yang dalam Bahasa Yunani bermakna pasca, setelah, atau melampaui, dan “*universe*” yang dalam Bahasa Inggris bermakna semesta [14]. Pada buku tersebut digambarkan bahwa di masa depan, manusia pada nantinya mampu membangun objek tiga dimensi apapun di dunia virtual [3]. Metaverse sendiri merupakan suatu dunia paralel yang dapat menghubungkan ruang maya dengan dunia fisik [15].

Konsep utama dari Metaverse adalah sebuah dunia virtual di mana pengguna dapat saling berinteraksi dengan objek digital dan sesama pengguna lainnya secara langsung. Metaverse memiliki potensi merevolusi cara manusia berinteraksi dengan lingkungan digital dan hal tersebut telah diaplikasikan ke dalam berbagai bidang seperti *game*, pendidikan, dan hiburan [16]. Dalam bidang *game*, Metaverse dapat digunakan untuk menciptakan dunia virtual yang interaktif dan imersif, di mana pengguna dapat berinteraksi berinteraksi dengan objek digital dan sesama pengguna lainnya secara langsung [17]. Dalam bidang pendidikan, Metaverse dapat digunakan untuk membuat sebuah kelas virtual dan lingkungan pembelajaran daring, di mana pengguna dapat berinteraksi berinteraksi dengan objek digital dan sesama pengguna lainnya secara langsung [18]. Dalam bidang hiburan, Metaverse dapat digunakan untuk membuat sebuah kegiatan acara secara virtual, seperti konser dan pertandingan olahraga di mana pengguna dapat berinteraksi berinteraksi dengan objek digital dan sesama pengguna lainnya secara langsung [19].

Dalam beberapa tahun terakhir telah dilakukan pengembangan berbasis *blockchain* untuk pembuktian konsep kerja lebih lanjut dalam Metaverse sehingga memungkinkan ruang virtual dapat diarsipkan, dipetakan, dibagikan, dan digunakan kembali pada aplikasi lainnya secara *real-time* [20]. Pada tabel 5.2 ditunjukkan komparasi antar-aplikasi Metaverse yang telah ada.

Tabel 5.2 Komparasi plaform Metaverse

Nama	Pengembangan	Segmentasi pengguna	Platform	Mendukung VR	Model Avatar	Mendukung Transaksi
AltspaceVR	Microsoft	Umum	Windows , Android	Ya	Kartun	Tidak
Bigscreen	Bigscreen Inc.	Hiburan (Video, TV, Film)	Windows	Ya	Katun	Tidak
Cryptovoxels	Nolan Consulting	Umum	Windows , Mac, Linux, iOS, Android	Ya	Kartun	Ya
Engage	VR Education Holdings PLC	Pendidikan	Oculus, HTC Vive, Valve Index, Windows MR	Ya	Berbentuk manusia	Tidak
High Fidelity	Somnium Space	Bisnis / Bekerja Jarak Jauh	Windows , MacOS, Android, iOS	Ya	Berdasarkan hasil foto wajah	Ya
Rec Room	Against Gravity	Permainan	Windows , iOS	Ya	Kartun	Ya
vTime XR	vTime Ltd.	Ruang obrolan	Windows , iOS	Ya	Berbentuk manusia	Tidak

Berdasarkan Tabel 5.2 dapat dilihat bahwa Metaverse dapat digunakan untuk berbagai bidang dan beberapa dari aplikasi Metaverse telah mendukung kegiatan transaksional sehingga dapat meningkatkan nilai ekonomi dari aplikasi tersebut. Salah satu kunci kelebihan dari Metaverse adalah kemampuan untuk menciptakan lingkungan virtual yang interaktif dan imersif. Metaverse dapat digunakan untuk menciptakan sebuah dunia virtual yang sangat realistis dan memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan objek digital dan antar- pengguna dengan cara intuitif dan natural [21]. Selain itu, Metaverse dapat menjadi ruang luas yang mendukung berbagai macam pengalaman VR, seperti bermain, bersosialisasi, pendidikan dan bidang lainnya.

Kelebihan lainnya dari Metaverse adalah kemampuan membuat peluang bisnis baru. Sebagai contoh, suatu perusahaan dapat menggunakan Metaverse untuk membuat tur virtual, di mana

pengguna dapat berinteraksi dengan produk digital secara *real time*, atau menciptakan suatu pengalaman wisata baru, di mana pengguna dapat mengunjungi versi virtual dari suatu lokasi [22]. Metaverse juga dapat mendukung pengguna saling berkomunikasi dengan pengguna lain secara langsung [23].

Dengan kelebihan tersebut, Metaverse tetap memiliki beberapa tantangan yang harus dihadapi. Tantangan terbesar untuk Metaverse adalah standardisasi dan interoperabilitas [24,25]. Saat ini terdapat berbagai macam platform Metaverse yang sedang dikembangkan namun tidak saling interoperabilitas satu sama lain. Hal tersebut dapat menjadi penghalang bagi pengguna yang ingin mencoba mengakses dari satu Metaverse ke Metaverse lainnya. Selain itu, dibutuhkan standarisasi untuk saling berbagi data dan konten antar-platform Metaverse [25].

Tantangan lain yang dihadapi Metaverse adalah dibutuhkan keamanan terkait data sensitif, terutama dengan meningkatnya pengguna yang memasukkan data pribadi ke dalam Metaverse [26]. Untuk membangun sebuah kepercayaan agar pengguna mau menggunakan platform Metaverse, pengembang harus memastikan keamanan data pribadi dan melindungi privasi pengguna.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dibahas sebelumnya dapat disimpulkan beberapa inti terkait Metaverse, antara lain:

- 1 Interaksi sosial: Metaverse sering dilihat sebagai ruang di mana pengguna dapat berinteraksi satu sama lain dengan cara baru dan unik, baik melalui avatar atau representasi digital lainnya dari diri mereka sendiri.
- 2 Ekonomi virtual: Metaverse juga dilihat sebagai ruang di mana pengguna dapat membeli, menjual dan memperdagangkan barang dan jasa virtual, menciptakan ekonomi baru yang terpisah dari dunia fisik.
- 3 Identitas dan kepemilikan: Metaverse adalah ruang di mana pengguna dapat membuat dan mengontrol identitas dan aset digital.
- 4 Keamanan dan privasi: Dengan Metaverse sebagai ruang digital, keamanan dan privasi menjadi perhatian utama bagi pengembang Metaverse.

- 5 Interoperabilitas: Metaverse diharapkan menjadi jaringan dunia virtual berskala besar yang saling terhubung, yang membawa tantangan dalam hal interoperabilitas dan standardisasi.

5.3 DIGITAL TWIN

Digital twin merupakan representasi virtual dari sebuah objek fisik atau sistem yang dapat digunakan untuk menyimulasikan dan menganalisis suatu kebiasaan, memprediksi performa dan mengoptimasi desain [17]. Konsep dari *digital twin* sendiri telah ada dari beberapa dekade, tetapi terus mengalami pembaharuan dalam beberapa tahun terakhir sejalan dengan perkembangan teknologi khususnya pada bidang *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan, dan *cloud computing* [27].

Teknologi *Digital twin* telah diaplikasikan secara luas pada bidang industri, termasuk di dalamnya pada bidang manufaktur [28], penerbangan [29], konstruksi [30] dan kesehatan [31]. Contoh pengaplikasian *Digital twin* pada bidang manufaktur antara lain, dapat mengoptimasi proses produksi, mengurangi waktu produksi dan meningkatkan kualitas produk [28]. Dalam bidang penerbangan, *Digital twin* dapat diimplementasikan untuk mengoptimasi desain dan performa dari pesawat [29]. Dalam bidang konstruksi, *Digital twin* dapat digunakan untuk mengoptimasi desain dan konstruksi dari sebuah bangunan [30]. Dalam bidang konstruksi, *Digital twin* juga dapat digunakan untuk mengoptimasi desain dan konstruksi dari sebuah alat kesehatan [31].

Secara umum dalam pengaplikasiannya, teknologi *Digital twin* memiliki potensi untuk meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan, pemangkasan biaya dan meningkatkan efisiensi dari berbagai macam system [28]. Selain pengaplikasian dalam berbagai macam bidang, teknologi *Digital twin* juga memiliki hubungan yang beririsan dengan teknologi Metaverse. Salah satu hubungan dari kedua teknologi tersebut dapat dilihat pada bidang *virtual reality* (VR). Dalam bidang VR, Metaverse dapat dilihat sebagai sebuah dunia virtual di mana pengguna dapat saling berinteraksi dengan pengguna lain dan objek digital secara langsung. Sedangkan *Digital twin* dapat digunakan untuk menciptakan suatu representasi dari dunia fisik, seperti bangunan atau kota, yang kemudian digunakan dalam

Metaverse untuk membuat pengalaman yang interaktif dan realistik bagi pengguna [32].

Hubungan antara Metaverse dan *Digital twin* di bidang lainnya dapat dilihat pada bidang desain produk dan manufaktur. Pada bidang tersebut, *digital twin* dapat digunakan untuk mensimulasikan dan menganalisa suatu kebiasaan, memprediksi performa dan mengoptimasi desain suatu produk. Sedangkan di sisi lain, Metaverse dapat digunakan sebagai platform kolaborasi dan ko-kreasi, yang memungkinkan desainer, insinyur dan divisi lainnya untuk saling berinteraksi dan bekerja pada hasil *Digital twin* suatu produk dalam lingkungan virtual [33].

Dalam bidang lain seperti pengembangan kota pintar, hubungan antara Metaverse dan *digital twin* dapat diterapkan untuk meningkatkan proses pengambilan keputusan dan meningkatkan efisiensi sistem kota secara keseluruhan. *Digital twin* dapat digunakan untuk membuat representasi virtual dari infrastruktur kota, seperti sistem transportasi, bangunan dan energi. Kemudian dapat digunakan di Metaverse sebagai platform untuk kolaborasi dan kreasi bersama di antara perencana kota, pengembang dan warga, untuk meningkatkan keberlanjutan dan kelayakan hidup kota [34,35].

Bagaimana pun, terdapat tantangan untuk merealisasikan *Digital twin* secara keseluruhan. Salah satu tantangan tersebut adalah manajemen dan integrasi data. *Digital twin* memerlukan data dalam jumlah besar dari berbagai sumber yang akurat dan data tersebut perlu terintegrasi dan dikelola dengan efisien. Selain itu, kualitas dan akurasi data sangat penting agar teknologi *Digital twin* dapat digunakan dengan baik [36]. Tantangan lainnya adalah standarisasi dalam pembuatan dan penggunaan *Digital twin* di berbagai industri dan aplikasi [37].

Berdasarkan pembahasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa *Digital twin* merupakan bidang teknologi yang berkembang pesat dan memungkinkan mengubah cara manusia dalam mendesain, mengoptimalkan dan mengelola objek fisik atau sebuah system [18]. *Digital twin* juga berpotensi diintegrasikan dengan teknologi lain seperti Metaverse untuk memberikan pengalaman baru bagi pengguna dalam menggunakan komputer. Kedua konsep tersebut dapat diterapkan di berbagai bidang seperti VR, desain dan

manufaktur produk, serta kota pintar. Masih ada tantangan yang perlu diatasi sebelum potensi penuh Metaverse dan *digital twin* dapat direalisasikan, seperti standardisasi dan interoperabilitas [24,25].

5.4 UNREAL ENGINE

Unreal Engine adalah *game engine* 3D yang dikembangkan oleh Epic Games. *Unreal Engine* merupakan *tool* yang digunakan untuk mengembangkan gim dan telah digunakan dalam pengembangan berbagai jenis gim. Dalam beberapa tahun terakhir, *Unreal Engine* juga digunakan dalam pengembangan non-gim, seperti arsitektur, visualisasi produk dan pendidikan. Dalam bidang arsitektur, *Unreal Engine* digunakan untuk membuat visualisasi bangunan yang realistis dan interaktif yang dapat digunakan untuk kebutuhan desain, perencanaan pembangunan dan pemasaran. Selain itu, perancang produk juga dapat menggunakan *Unreal Engine* untuk memvisualkan produk yang berguna dalam hal promosi dan pemasaran.

Dalam bidang pendidikan *Unreal Engine* juga dapat digunakan dikarenakan dengan *Unreal Engine* memungkinkan pendidik menciptakan lingkungan belajar yang imersif dan menarik, selain itu tampilan antarmuka yang ramah pengguna membuat *Unreal Engine* dapat digunakan oleh pengguna dari berbagai tingkatan [38]. Dengan kelebihan tersebut, *Unreal Engine* dinilai dapat meningkatkan interaksi siswa dan kreativitas siswa, khususnya pada bidang sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM), serta pembelajaran linguistik [39]. Sehingga dengan peningkatan kreativitas dan interaksi siswa tersebut, dapat berimplikasi positif, yaitu meningkatnya minat siswa dan ketanggapannya dalam proses pembelajaran.

Fleksibilitas dan kemudahan penggunaan membuat *Unreal Engine* menjadi pilihan untuk membuat simulasi interaktif, lingkungan VR dan gim [40]. Kemudahan tersebut di antaranya pengguna dapat melakukan *visual scripting* dan berbagai macam sistem yang memudahkan pengguna untuk membuat animasi. Hal tersebut dapat mendukung pengguna untuk membuat lingkungan interaktif dan dinamis yang dapat digunakan dalam aplikasi gim maupun non-gim [13].

Salah satu yang menjadi kelebihan dari *Unreal Engine* adalah kemampuan untuk membuat grafis yang realistis dan berkualitas

tinggi. Hal tersebut dikarenakan *Unreal Engine* menggunakan *physically-based rendering* (PBR) *pipeline*, yang memungkinkan pengguna membuat material dan cahaya semirip mungkin dengan aslinya. Dengan hal tersebut, pengguna dapat membuat lingkungan yang imersif dan realistis yang dapat digunakan baik dalam pengembangan gim maupun non-gim [13].

Kelebihan lain yang dimiliki *Unreal Engine* adalah pada sisi fleksibilitas yang memungkinkan pengguna untuk membuat pengalaman yang unik secara tersuai. Hal tersebut juga didukung dengan adanya *source code* gratis di mana pengguna dapat melakukan ubahsuaian skrip kode tersebut berdasarkan kebutuhan dan juga terdapat bantuan komunitas berbentuk forum yang dapat saling membantu antar pengguna yang ingin mengembangkan gim menggunakan *Unreal Engine*.

Dengan kelebihan tersebut, *Unreal Engine* tetap memiliki beberapa keterbatasan. Keterbatasan tersebut antara lain dibutuhkan spesifikasi komputer yang tinggi untuk menjalankan *Unreal Engine*. Selain itu, jika ingin melakukan komersialisasi produk yang dikembangkan menggunakan , pengguna dikenakan biaya berupa royalti sebesar 5% dari nilai produk. Biaya tersebut baru akan ditagihkan jika produk yang dijual bernilai di atas satu juta dolar amerika serikat.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan *Unreal Engine* merupakan platform pengembangan gim dan juga telah digunakan di berbagai aplikasi non-gim. Kemampuan *Unreal Engine* untuk membuat grafik realistis berkualitas tinggi dan beragam alat dan fitur bawaan menjadikannya pilihan yang menarik bagi pengguna yang ingin menciptakan pengalaman interaktif yang imersif. Bagaimana pun, syarat spesifikasi komputer yang tinggi dan biaya royalti menjadi batasan yang perlu dipertimbangkan dalam menggunakan *Unreal Engine*.

5.4.1 Blueprint

Unreal Engine Blueprint merupakan *visual scripting* yang memungkinkan pengguna untuk membuat logika dan interaktivitas dalam gim tanpa menggunakan pemrograman tradisional. *Blueprint* pada dasarnya merupakan representasi visual dari kode yang berjalan

di belakang layer pada gim atau aplikasi. Pada gambar 2 merupakan contoh dari pengimplementasian *Blueprint* pada platform *Unreal Engine*.



Gambar 5.2 Implementasi Blueprint pada Unreal Engine

Salah satu kelebihan dari *Blueprint* adalah aksesibilitas terhadap pengguna yang memiliki minim pengalaman dengan bahasa pemrograman. *Blueprint* memungkinkan pengguna untuk membuat dan memanipulasi aset gim, kontrol alur dari gim dan membuat interaksi kompleks antar-objek dan karakter tanpa menggunakan menuliskan kode. Hal tersebut dapat mempermudah bagi perancang, artis dan anggota non-teknis lainnya untuk berkontribusi dalam proses pengembangan, sehingga membuat *Blueprint* menjadi pilihan yang baik untuk pembelajaran dalam pengembangan gim, khususnya bagi pengguna yang tidak atau sedikit memiliki pengalaman dalam menggunakan bahasa pemrograman [41].

Sifat *Blueprint* yang ramah pengguna membantu pengguna untuk membuat prototipe dan iterasi dari ide yang dimiliki dengan relatif lebih cepat. Dengan *visual scripting Blueprint*, memungkinkan pengguna untuk melakukan pengujian dan perbaikan mekanisme dan interaksi pada gim tanpa melakukan kompilasi ulang pada kode. Sehingga hal tersebut dapat mempercepat proses pengembangan dan mengoptimalkan sumber daya yang dimiliki [42].

Selain itu, *Blueprint* juga memungkinkan pengguna dapat mengintegrasikan dengan sistem lain, seperti kecerdasan buatan dan fisik. *Unreal Engine* memiliki berbagai node dan fungsi bawaan untuk

mengontrol perilaku AI dan simulasi fisik manusia, yang dapat dengan mudah diintegrasikan ke dalam *Blueprint*. Hal tersebut memungkinkan terciptanya karakter dan lingkungan yang lebih realistis dalam pengembangan gim atau animasi [13].

Namun dengan kelebihan tersebut, *Blueprint* juga memiliki beberapa keterbatasan, salah satunya adalah kurang efisien daripada kode yang ditulis secara manual, terutama untuk tugas yang kompleks. Selain itu, melakukan perbaikan dan pemeliharaan relatif lebih sulit jika diimplementasikan pada struktur yang kompleks, hal tersebut dikarenakan lebih sulit untuk memahami logika di balik skrip visual dibandingkan memahami kode yang ditulis secara manual.

Kesimpulannya, *Unreal Engine Blueprints* adalah sistem *scripting visual* yang memungkinkan *developer* untuk membuat mekanisme dan interaksi *gameplay* yang kompleks tanpa memerlukan pengetahuan pemrograman yang luas. Ini menawarkan aksesibilitas ke pengguna *non-programmer*, iterasi dan pembuatan prototipe yang lebih cepat, integrasi yang mudah dengan sistem lain dan banyak digunakan dalam industri gim. Namun, ia juga memiliki beberapa keterbatasan seperti efisiensi dan pemeliharaan *Blueprint* bisa lebih sulit daripada kode tradisional.

5.4.2 Epic Online Services

Epic Onlie Services (EOS) merupakan perangkat dan layanan yang disediakan Epic Games untuk membantu pengembang gim dalam membuat dan mengelola fungsionalitas daring dari gim yang dikembangkan. EOS dirancang untuk membantu pengembang gim membangun, mengoperasikan, dan menskalakan gim daring mereka dengan lebih mudah dan efisien. EOS menyediakan berbagai layanan termasuk pengelolaan akun pemain, *matchmaking*, penyimpanan data dan server gim berbasis *cloud*.

Salah satu fitur utama EOS adalah kemampuannya untuk mendukung berbagai macam platform, termasuk PC, konsol gim, dan gawai. Hal ini memungkinkan pengembang menjangkau pengguna yang lebih luas dan menghilangkan kebutuhan untuk mengembangkan dan memelihara layanan *online* terpisah untuk setiap platform. EOS juga menyediakan *plugin* yang memungkinkan

pengembang dengan mudah mengintegrasikan fitur *online* ke dalam gim mereka, seperti *matchmaking*, papan peringkat, serta obrolan suara dan teks. Hal ini dapat menghemat waktu dan sumber daya pengembang secara signifikan, karena mereka tidak perlu membangun dan memelihara fitur ini secara terpisah.

Fitur penting lainnya dari EOS adalah skalabilitasnya. Layanan dirancang untuk menangani pemain dalam jumlah besar dan dapat ditingkatkan atau diturunkan sesuai kebutuhan untuk mengakomodasi perubahan jumlah pemain. Ini memungkinkan pengembang untuk fokus membuat gim tanpa mengkhawatirkan infrastruktur yang mendasarinya. EOS juga menyediakan seperangkat alat analitik yang memungkinkan pengembang melacak dan menganalisis perilaku pemain, seperti pembelian dalam gim, keterlibatan dan retensi. Hal ini dapat membantu pengembang membuat keputusan berdasarkan data tersebut. Selain itu, EOS menyediakan serangkaian fitur keamanan untuk melindungi data pemain, seperti penyimpanan data yang aman dan enkripsi. Ini membantu memastikan bahwa informasi pribadi pengguna tetap aman dan terlindungi.

Secara keseluruhan, *Epic Online Services* adalah perangkat dan layanan yang dapat membantu pengembang gim membangun, mengoperasikan dan menskalakan gim daring mereka dengan lebih mudah dan efisien. Ini mendukung berbagai platform, menyediakan berbagai layanan dan dirancang agar dapat diskalakan serta aman.

5.5 OPTIMASI LEVEL OF DETAILS (LOD)

Level of Detail (LOD) adalah teknik penting untuk meningkatkan kinerja dan kualitas visual gim 3D. *Level of Details* (LOD) merupakan kumpulan poligon yang menentukan tingkat ketelitian dari sebuah objek. Fungsi dari pengaturan *Level of Detail* (LOD) adalah untuk mengurangi banyaknya poligon dan memperkecil detail dari suatu objek tertentu [43]. Pengoptimalan LOD digunakan untuk mengurangi jumlah poligon, tekstur, dan elemen grafis lainnya yang terlihat di layar pada waktu tertentu, yang membantu meningkatkan laju bingkai dan kinerja gim secara keseluruhan [44].

LOD digunakan untuk mengoptimalkan kinerja aplikasi 3D dengan mengurangi jumlah poligon dan tekstur yang digunakan untuk merender objek atau lingkungan saat kamera menjauh darinya.

Teknik ini memungkinkan aplikasi mempertahankan kualitas visual yang baik sekaligus mengurangi daya pemrosesan dan kebutuhan memori. Penggunaan sistem LOD dalam pengoptimalan 3D juga dapat digunakan untuk meningkatkan frekuensi gambar dan mengurangi latensi dalam aplikasi *real-time* seperti video gim [45]. Meskipun sistem LOD harus cukup untuk mengoptimalkan kinerja aplikasi 3D, tetap tidak boleh terlalu berlebihan, karena dapat menyebabkan hilangnya kualitas visual dan imersi [46].

LOD dalam pengembangan gim mengacu pada tingkat presisi dan kelengkapan dalam desain, serta implementasi elemen gim seperti karakter, lingkungan dan mekanisme *gameplay*. Hal tersebut dikarenakan LOD nantinya dapat memengaruhi performa gim, kualitas visual, dan pengalaman pemain. LOD dalam pengembangan gim digunakan untuk mengoptimalkan performa, menjaga keseimbangan antara kualitas visual dan performa. Dalam pengembangan gim, detail tingkat tinggi diperlukan untuk menciptakan lingkungan yang realistis dan imersif, tetapi juga dapat meningkatkan daya pemrosesan dan kebutuhan memori. Untuk menyeimbangkan performa dan kualitas visual, pengembang gim menggunakan LOD yang menyesuaikan jumlah detail tergantung jarak pemain dari objek [47].

Pengaturan LOD diperlukan dalam mengoptimasi sebuah gim dikarenakan hal tersebut berpengaruh pada tinggi atau rendahnya *frame rate per second* (FPS) yang diperoleh [10]. Dengan pengoptimalan LOD, kualitas visual gim 3D dan kinerja dari gim tersebut akan meningkat. Pengoptimalan LOD digunakan untuk mengurangi jumlah poligon, tekstur dan elemen grafis lainnya yang terlihat di layar pada waktu tertentu, yang membantu meningkatkan frekuensi gambar dan performa gim secara keseluruhan [48].

Berdasarkan beberapa kajian literatur tersebut dapat disimpulkan bahwa LOD merupakan kumpulan poligon yang menentukan tingkat ketelitian dari sebuah objek, semakin tinggi jumlah poligon maka akan meningkatkan ketelitian dari sebuah objek 3D. Namun dalam pengembangan gim, semakin tinggi tingkat poligon maka akan berpengaruh pada performa dan kinerja dari gim. Untuk itu dibutuhkan pengaturan LOD dalam mengoptimasi sebuah gim dikarenakan hal tersebut berpengaruh pada tinggi atau rendahnya

frame rate per second (FPS) yang diperoleh. Dengan pengoptimalan LOD, kualitas visual gim 3D dan kinerja dari gim tersebut akan meningkat. Pengoptimalan LOD digunakan untuk mengurangi jumlah poligon, tekstur dan elemen grafis lainnya yang terlihat di layar pada waktu tertentu, yang membantu meningkatkan frekuensi gambar dan performa gim secara keseluruhan.

5.6 MANAJEMEN ASET

Optimasi manajemen aset merupakan sebuah teknik dalam pengembangan gim untuk meningkatkan performa dengan mengurangi memori dan daya pemrosesan yang dibutuhkan untuk memuat, menyimpan dan menggunakan aset pada gim [13]. Aset gim tersebut meliputi model 3D, tekstur, berkas audio, dan sumber daya lain yang digunakan dalam gim.

Berdasarkan dokumentasi beberapa *game engine* [49,13], terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan untuk melakukan optimasi manajemen aset dalam pengembangan gim, antara lain:

- **Kompresi:** Mengompresi aset gim dapat secara signifikan mengurangi jumlah memori dan ruang penyimpanan yang diperlukan untuk menampungnya. Ini dapat membantu mengurangi waktu muat dan meningkatkan kinerja.
- **Streaming:** Aset *streaming*, seperti tekstur dan audio, dapat membantu mengurangi jumlah memori yang diperlukan untuk menyimpannya. Dengan melakukan *streaming*, dapat membantu mengurangi jumlah memori yang diperlukan untuk menjalankan gim dan meningkatkan performa.
- **Lazy loading:** *Lazy loading* adalah teknik yang memuat aset hanya saat dibutuhkan. Ini dapat membantu mengurangi jumlah memori yang diperlukan untuk menjalankan gim dan meningkatkan performa.
- **Caching:** *Caching asset* dalam memori dapat membantu mengurangi jumlah waktu yang diperlukan untuk memuatnya. Ini dapat membantu meningkatkan kinerja dan mengurangi waktu muat.
- **Bundling asset:** Mengelompokkan aset bersama dalam bundel dapat membantu mengurangi jumlah permintaan file yang perlu

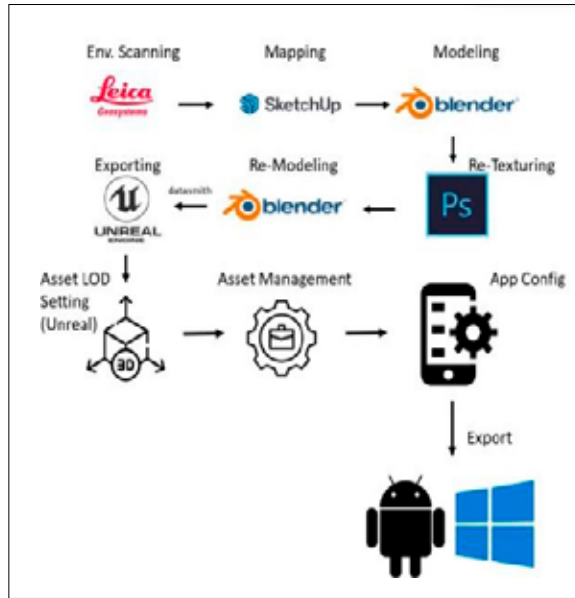
dibuat, yang dapat membantu meningkatkan waktu muat dan kinerja.

- **Mengoptimalkan tekstur:** Mengoptimalkan tekstur seperti mengurangi resolusi dan menggunakan format kompresi tekstur dapat membantu mengurangi penggunaan memori dan meningkatkan performa.
- **Penggunaan pemuatan aset dinamis:** Menggunakan pemuatan aset dinamis memungkinkan gim memuat aset sesuai permintaan, yang dapat membantu mengurangi penggunaan memori dan meningkatkan kinerja.

Namun pengoptimalan manajemen aset harus diimbangi dengan kualitas visual gim. Sehingga dalam pengembangan harus tetap memastikan bahwa gim tersebut masih terlihat bagus dan tidak merusak imersi pemain. Kesimpulannya, optimalisasi manajemen aset adalah teknik yang digunakan dalam pengembangan gim untuk meningkatkan performa dengan mengurangi jumlah memori dan daya pemrosesan yang diperlukan untuk memuat, menyimpan, dan menggunakan aset gim. Ada beberapa cara untuk mengoptimalkan pengelolaan aset untuk pengembangan gim, seperti kompresi, *streaming*, *lazy loading*, *caching*, penggabungan aset, optimalisasi tekstur, dan penggunaan pemuatan aset dinamis. Optimalisasi manajemen aset harus seimbang dengan kualitas visual gim dan tidak boleh merusak imersi pemain.

5.7 IMPLEMENTASI OPTIMASI LOD & MANAJEMEN ASET DALAM PENGEMBANGAN METAVERSE

Dalam buku ini penulis berfokus pada pengoptimasian aplikasi ITB Metaverse agar dapat dimainkan secara nyaman. Implementasi tersebut meliputi optimasi *Level of Detail* (LOD), melakukan manajemen aset agar performa dan kinerja dari *Metaverse ITB Ganesha Campus* dapat meningkat. Konfigurasi dapat dimainkan secara daring dan aplikasi dapat diekspor baik ke PC maupun Android. Tahapan pengembangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3.



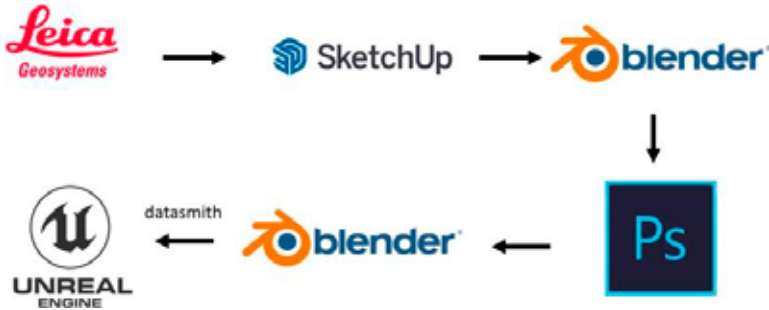
Gambar 5.3 Tahapan pengembangan

Berdasarkan Gambar 5.3 tahapan awal dimulai dengan pemindaian lingkungan dan dilanjut dengan pemodelan aset dan optimasi LOD menggunakan beberapa aplikasi. Hasil dari pemodelan tersebut akan dimasukkan ke *Unreal Engine* menggunakan datasmith. Aset yang telah masuk tersebut dikonfigurasi kembali untuk mendapatkan nilai LOD terbaik dan dilakukan manajemen aset untuk mereduksi kembali ukuran fail. Setelah hal tersebut dilakukan, langkah selanjutnya adalah mengonfigurasi beberapa hal agar aplikasi dapat digunakan secara daring pada Android dan PC. Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut terkait hal yang dilakukan.

5.7.1 Optimasi *Level of Detail* (LOD)

Pada tahap pengoptimasian LOD dilakukan dengan dua tahapan, yaitu tahap optimasi menggunakan aplikasi eksternal dan tahap optimasi menggunakan *Unreal Engine*. Pada pengoptimasian LOD eksternal dilakukan dengan kerja sama lintas disiplin ilmu khususnya pada bidang seni dan arsitektur. Dengan kolaborasi disiplin ilmu dalam pengembangan suatu proyek dapat membuat proyek lebih baik

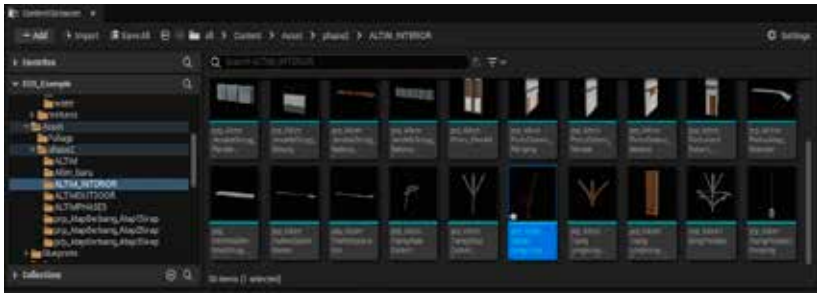
[50]. Mekanisme proses optimasi LOD eksternal dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Proses optimasi LOD eksternal

Berdasarkan Gambar 5.4, mekanisme awal dari optimasi LOD eksternal adalah memasukkan hasil pemindaian lingkungan menggunakan LiDAR berupa *point cloud* ke dalam aplikasi Sketchup untuk dilakukan pemetaan. Berdasarkan hasil pemetaan tersebut akan menjadi dasar dalam pemodelan tahap awal objek yang akan dibuat dengan aplikasi Sketchup. Setelah dilakukan pemodelan objek 3D, poligon pada objek tersebut dioptimasi menggunakan aplikasi Blender. Selain melakukan optimasi poligon, tekstur dari objek akan dikompresi dan diatur ulang menggunakan aplikasi Photoshop agar tekstur pada objek lebih ringan. Hasil dari pengaturan tekstur tersebut akan dimasukkan kembali ke Blender untuk diaplikasikan ke objek 3D. Selanjutnya, hasil dari optimasi yang telah dilakukan tersebut akan diekspor ke *Unreal Engine* menggunakan *Datasmith* agar objek dapat teroptimasi dengan baik.

Setelah dilakukan pengeksporan objek ke *Unreal Engine*, tahap selanjutnya adalah mengoptimasi objek menggunakan fitur yang disediakan oleh *Unreal Engine*. Optimasi dapat dilakukan dengan memasuki laman konfigurasi pada objek yang akan dioptimasi. Pada Gambar 5.5 hingga Gambar 5.9 menunjukkan langkah-langkah dalam melakukan optimasi LOD.



Gambar 5.5 Menu daftar aset Unreal Engine

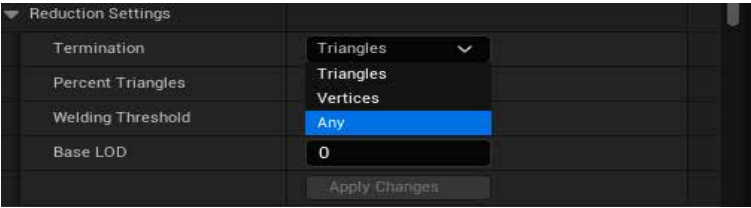
Gambar 5.5 menunjukkan menu daftar aset yang dimiliki oleh pengembang. Tahap pertama yang dilakukan adalah memilih aset yang ingin dilakukan pengoptimasian LOD kemudian menekan tombol *enter* hingga memunculkan menu pengaturan pada aset seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5



Gambar 5.6 Menu pengaturan aset

Pada Gambar 5.6 menunjukkan laman pengaturan aset. Pada laman tersebut, LOD objek dapat diatur dengan mengurangi jumlah poligon objek saat jauh dari kamera. Pengaturan LOD dapat diatur baik dengan mode otomatis maupun manual. Jika memilih pengaturan LOD secara otomatis, *Unreal Engine* dapat secara otomatis mengatur tingkat LOD berdasarkan jarak dari kamera. Sedangkan pengaturan LOD secara manual dapat dilakukan dengan memilih tingkat LOD yang diinginkan pada pilihan yang ditunjukkan oleh kotak berwarna kuning dan hijau. Pada menu tersebut LOD juga dapat disederhanakan dengan menurunkan persentase dengan memasuki

menu “Reduction Settings” dan mengganti “Termination” dari “Triangle” menjadi “Any” yang ditunjukkan pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Menu pengaturan aset

Setelah mengganti “Termination” dari “Triangle” menjadi “Any”, langkah selanjutnya adalah menurunkan nilai “Percent Triangles” dan “Percent Vertices” hingga mendapatkan konfigurasi yang cocok. Contoh konfigurasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Konfigurasi Reduction Settings

Selanjutnya, setelah menemukan pengaturan yang sesuai dengan kebutuhan pengembang, pengaturan tersebut dapat disimpan dan diaplikasikan dengan menekan tombol “apply change”. Dalam pengaturan LOD dalam *Unreal Engine*, semakin tinggi kategori LOD akan menurunkan tingkat detail suatu aset seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.9.

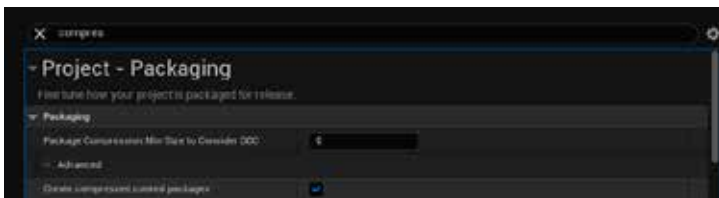


Gambar 5.9 Implementasi pengaturan LOD pada Unreal Engine (Uisco, 2022)

5.7.2 Optimasi Manajemen Aset

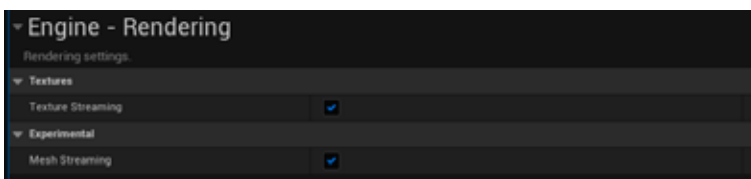
Setelah dilakukan optimasi LOD, tahap selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan manajemen aset. Manajemen aset dilakukan untuk meningkatkan performa dengan mengurangi memori dan daya pemrosesan yang dibutuhkan untuk memuat, menyimpan dan menggunakan aset pada gim [51]. Pada tahap ini meliputi pembersihan dari aset-aset objek 3D yang tidak digunakan dalam pengembangan gim dan memastikan tidak ada duplikasi aset sehingga dapat mengefisienkan ukuran fail.

Setelah melakukan penghapusan pada aset yang tidak diperlukan, tahapan selanjutnya yang dapat dilakukan adalah melakukan kompresi fail dengan cara masuk ke “*Project settings*” kemudian pada bagian “*Project*” pilih sub-menu “*Packaging*”. Pada bagian tersebut aktifkan pilihan “*Create compressed cooked packages*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.10.



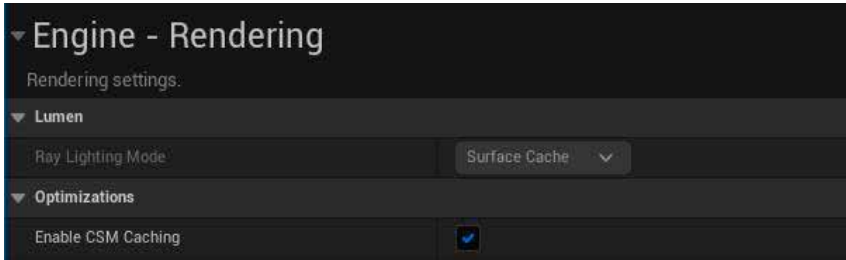
Gambar 5.10 Pengaktifan menu create compressed cooked packages

Setelah mengaktifkan menu tersebut, tahapan selanjutnya yang dapat dilakukan dalam manajemen aset adalah *Streaming*. *Streaming* dapat berguna untuk menampilkan tekstur maupun objek aset jika masuk dalam jangkauan pandangan sehingga mengurangi beban gim untuk memuat. Fitur tersebut dapat didapat dengan cara masuk ke “*Project settings*” kemudian pada bagian “*Engine*” pilih sub-menu “*Rendering*”. Pada bagian tersebut aktifkan pilihan “*Texture Streaming*” dan “*Mesh Streaming*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.11.



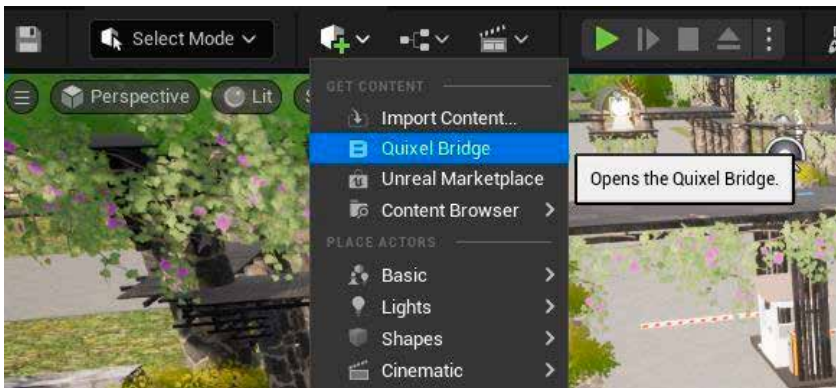
Gambar 5.11 Pengaktifan menu texture streaming dan mesh streaming

Masih pada sub-menu “*Rendering*”, tahapan selanjutnya adalah melakukan konfigurasi *Caching* yang bertujuan mengurangi waktu muat sehingga dapat meningkatkan performa. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengaktifkan pilihan “*Enable CSM Caching*” pada sub-menu “*Rendering*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Pengaktifan menu *Enable CSM Caching*

Pada tahap manajemen aset, hal yang perlu diperhatikan juga adalah pemilihan aset dan tekstur jika mengunduh aset dan tekstur dari *Marketplace*. Tekstur dapat diperoleh dengan mengunduh melalui *library* yang tersedia di *Unreal Engine* dengan menekan menu *Quixel Bridge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.13.



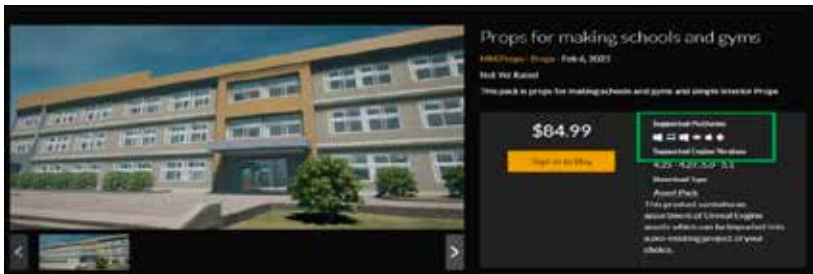
Gambar 5.13 Pilihan masuk ke menu *Quixel Bridge*

Setelah memasuki menu *Quixel Bridge*, tahap selanjutnya adalah memilih tekstur yang diinginkan beserta tingkat kualitas dari tekstur tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.14. Untuk pengembangan Android disarankan memilih tingkat kualitas *low* hingga *medium* agar tidak terlalu berat dijalankan.



Gambar 5.14 Pemilihan tekstur pada Quixel Bridge

Sedangkan pemilihan aset pada *Marketplace* dapat dilakukan dengan memperhatikan kompatibilitas pada aset yang ingin diunduh. Pada Gambar 5.15 menunjukkan cara untuk mengetahui kompatibilitas aset yang diunduh.

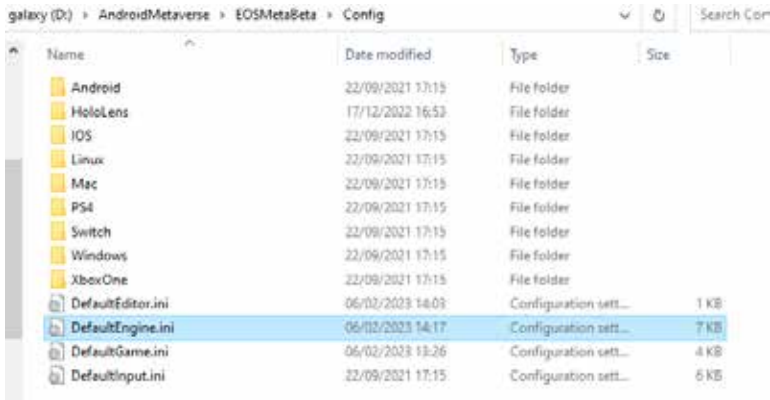


Gambar 5.15 Kompatibilitas aset pada

Berdasarkan Gambar 5.15 pada kotak berwarna hijau, dapat dilihat platform apa saja yang kompatibel dengan aset yang dipilih, dikarenakan penggunaan aset yang tidak kompatibel dapat berpengaruh pada penurunan performa gim pada platform yang dijalankan.

5.7.3 Implementasi *Epic Online Services (EOS)*

Agar dapat dijalankan secara daring, dibutuhkan konfigurasi lebih lanjut pada aplikasi Metaverse. Implementasi EOS dilakukan dengan melakukan instalasi EOS Core untuk *Unreal Engine* pada *Unreal Engine Marketplace*. Tahap pertama yang dilakukan adalah masuk *folder Config* pada direktori proyek dan buka fail *DefaultEngine.ini* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.16.



Gambar 5.16 Direktori DefaultEngine.ini

Setelah membuka fail DefaultEngine.ini, ganti skrip kode tersebut dengan skrip berikut.

```
[/Script/EngineSettings.GeneralProjectSettings]
ProjectID=81A85C0442C81EB379935BB5350D7BF8

[/Script/UnrealEd.ProjectPackagingSettings]
Build=IfProjectHasCode
BuildConfiguration=PPBC_Shipping
StagingDirectory=(Path="")
FullRebuild=False
ForDistribution=True
IncludeDebugFiles=False
BlueprintNativizationMethod=Disabled
bIncludeNativizedAssetsInProjectGeneration=False
bExcludeMonolithicEngineHeadersInNativizedCode=False
UsePakFile=True
bGenerateChunks=False
bGenerateNoChunks=False
bChunkHardReferencesOnly=False
bForceOneChunkPerFile=False
MaxChunkSize=0
bBuildHttpChunkInstallData=False

HttpChunkInstallDataDirectory=(Path="")
PakFileCompressionFormats=
```

```

PakFileAdditionalCompressionOptions=
HttpChunkInstallDataVersion= IncludePrerequisites=True
IncludeAppLocalPrerequisites=False
bShareMaterialShaderCode=False
bSharedMaterialNativeLibraries=False
ApplocalPrerequisitesDirectory=(Path="")
IncludeCrashReporter=False InternationalizationPreset=English
-CulturesToStage=en
+CulturesToStage=en bCookAll=False bCookMapsOnly=False
bCompressed=False bEncryptIniFiles=False
bEncryptPakIndex=False
GenerateEarlyDownloaderPakFile=False bSkipEditorContent=False
bSkipMovies=False
-
    EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationali
    zation\..
    ..\*.icu
-
    EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationali
    zation\..
    ..\*.brk
-
    EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationali
    zation\..
    ..\*.res
-
    EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationali
    zation\..
    ..\*.nrm
-
    EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationali
    zation\..
    ..\*.cfu
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Localization\...\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Localization\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Certificates\...\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Certificates\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=-
... \Content\Localization\Game\...\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=-
... \Content\Localization\Game\*. *
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Config\...\*.ini
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Config\*.ini
-
EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Engine\GlobalShaderCache*.bin

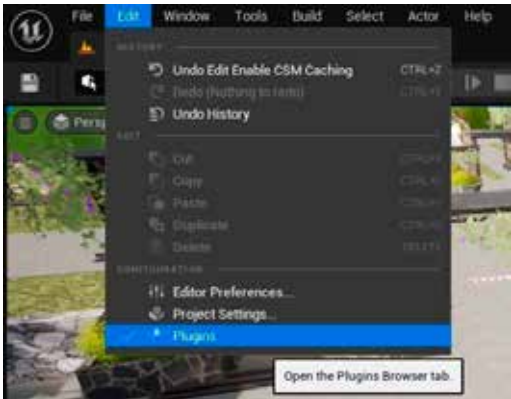
```

```

-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\ShaderArchive-
  Global*.ushaderbytecode
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Slate\*.*
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Slate\...\*.*
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\*.upluginmanifest
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\*.uproject
-EarlyDownloaderPakFileFiles=...\global_sf*.metalmap
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationalizatio
  n\...\*.ic u
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationalizatio
  n\...\*.br k
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationalizatio
  n\...\*.re s
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationalizatio
  n\...\*.nr m
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Internationalizatio
  n\...\*.cf u
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Localization\...\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Localization\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Certificates\...\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Certificates\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=-
  ...\Content\Localization\Game\...\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=-
  ...\Content\Localization\Game\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Config\...\*.ini
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Config\*.*.ini
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Engine\GlobalShaderCache*.b
  in
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\ShaderArchive-
  Global*.ushaderbytecode
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Slate\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\Content\Slate\...\*.*
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\*.upluginmanifest
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\*.uproject
+EarlyDownloaderPakFileFiles=...\global_sf*.metalmap
+MapsToCook=(FilePath="/Game/Maps/ExampleMap")
bNativizeBlueprintAssets=False
bNativizeOnlySelectedBlueprints=False

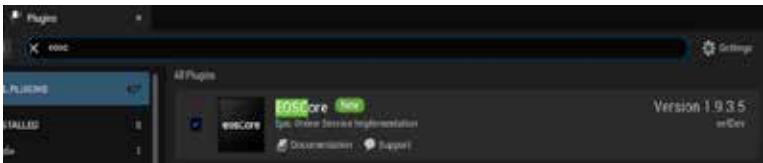
```

Tahapan selanjutnya adalah mengaktifkan plugin EOS Core dengan membuka sub-menu “*Plugins*” pada menu “*Edit*” seperti pada Gambar 5.17.



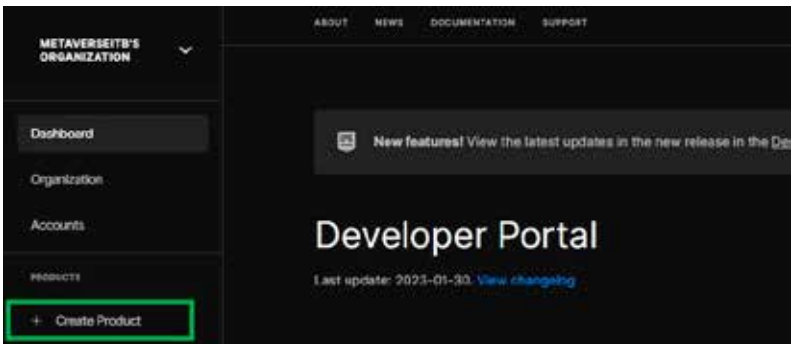
Gambar 5.17 Cara mengakses *Plugins*

Setelah berhasil membuka *Plugins*, tahap selanjutnya adalah mengaktifkan *plugin* EOSCore seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.18.



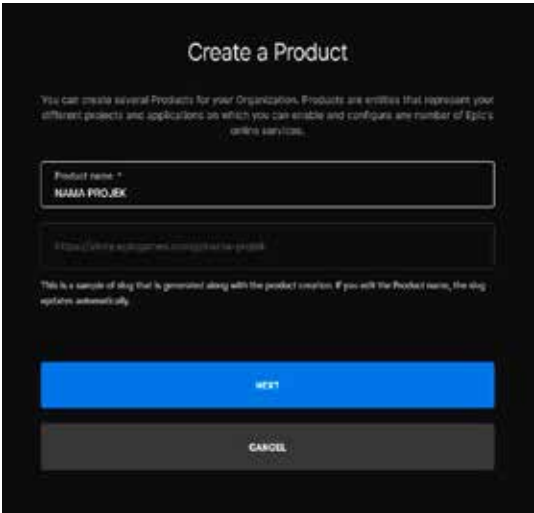
Gambar 5.18 Aktifasi plugins EOSCore

Setelah melakukan aktivasi *plugin*, langkah selanjutnya adalah mengunjungi situs Dashboard Epic Games Developer dengan menggunakan akun Epic Games. Setelah memasuki situs tersebut, pilih “*Create Product*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.19.



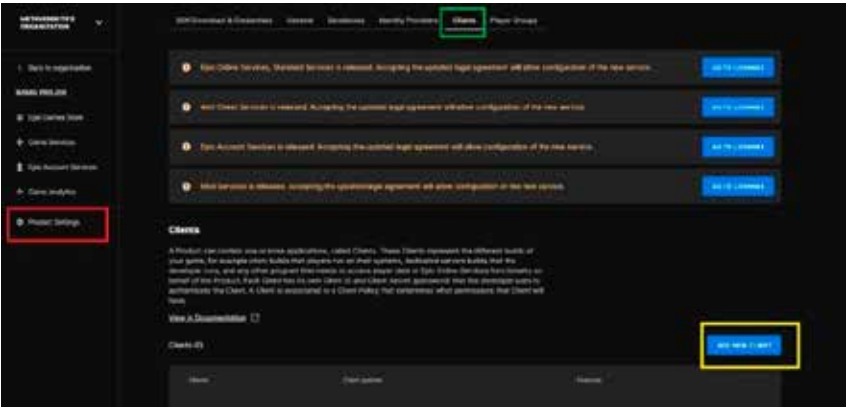
Gambar 5.19 Tampilan portal Epic Games Developer

Pada saat menekan tombol tersebut, langkah selanjutnya adalah memasukkan nama proyek seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.20.



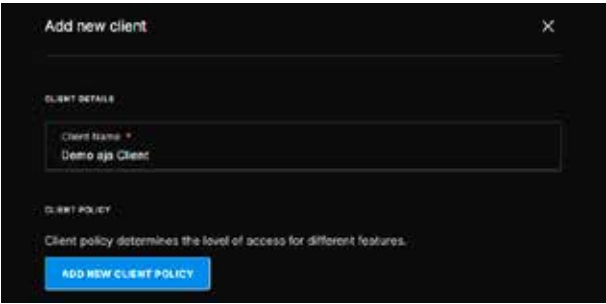
Gambar 5.20 Menu pengisian identitas proyek

Langkah selanjutnya adalah membuat *client* dengan cara menekan menu “*Project Setting*” yang ditunjukkan oleh kotak merah pada Gambar 5.21, kemudian pilih “*Clients*” yang ditunjukkan oleh kotak hijau pada Gambar 5.21, dan “*Add New Client*” seperti yang ditunjukkan oleh kotak kuning pada Gambar 5.21.



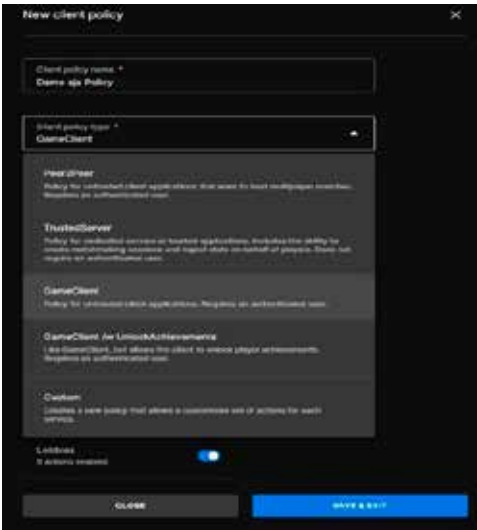
Gambar 5.21 Pilihan menu Client

Setelah itu masukkan nama *client* yang diinginkan dengan format (“Nama” spasi “Client”) kemudian tekan tombol “Add New Client Policy” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.22.



Gambar 5.22 Pengisian identitas Client

Setelah itu masukkan nama *policy* yang diinginkan dengan format (“Nama” spasi “Policy”) kemudian pilih tipe *policy* sesuai kebutuhan dan tekan tombol “Save & Exit” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.23.



Gambar 5.23 Pengisian identitas *policy*

Setelah pengisian identitas *client* dan *policy*, langkah selanjutnya adalah konfigurasi menu “*permission*” dan “*linked client*” dengan membuka menu *Epic Account Service* dan menekan tombol “*Permission*” seperti pada Gambar 5.24.



The screenshot shows the AWS IAM console interface. At the top, there's a navigation bar with 'My AWS Account' and 'IAM Users'. The main content area is divided into two sections. The top section, 'My AWS Account', displays account information such as 'Account ID', 'Account Name', and 'Account Type'. Below this, there's a 'Users' tab selected, showing a list of users. The bottom section, 'Groups', shows a list of groups. The 'Users' list includes a user named 'root' and another named 'aws-iam-user'. The 'Groups' list includes a group named 'AWSManagem...' and another named 'AWSManagem...'. The interface is clean and professional, with a dark blue header and a light gray background.

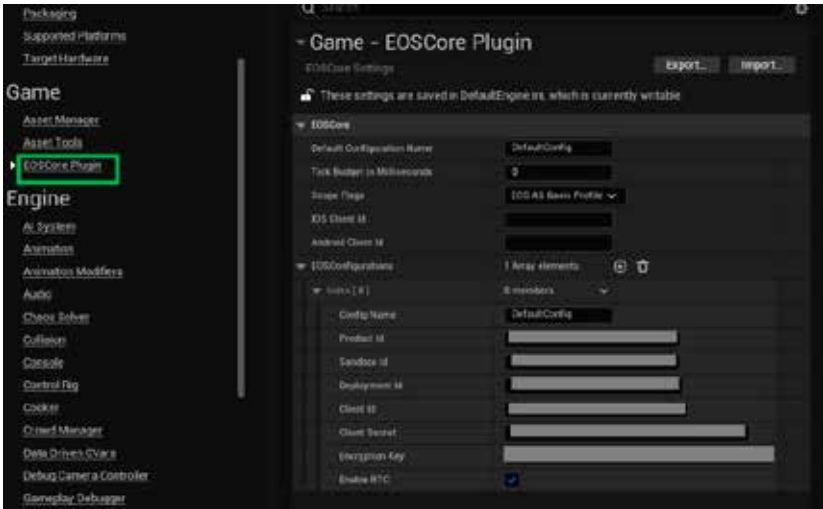
Gambar 5.26 Konfigurasi menu linked clients

Langkah selanjutnya ada menghubungkan ID pada Epic Games Developer dengan proyek pada *Unreal Engine*. Langkah tersebut dapat dilakukan dengan menekan tombol “*Product Settings*” pada sisi kiri halaman website seperti yang ditunjukkan kotak hijau pada Gambar 5.27 sehingga menampilkan ID proyek.



Gambar 5.27 ID Proyek Epic Games Developer

Salin ID pada laman tersebut ke proyek pada *Unreal Engine*. Untuk kolom pengisian dapat diakses dengan masuk ke menu “*Project Settings*” kemudian masuk ke submenu “*EOSCore Plugins*” pada bagian “*Game*” dan masukkan ID yang telah disalin pada kolom yang tersedia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.28.



Gambar 5.28 Menu EOSCore Plugin

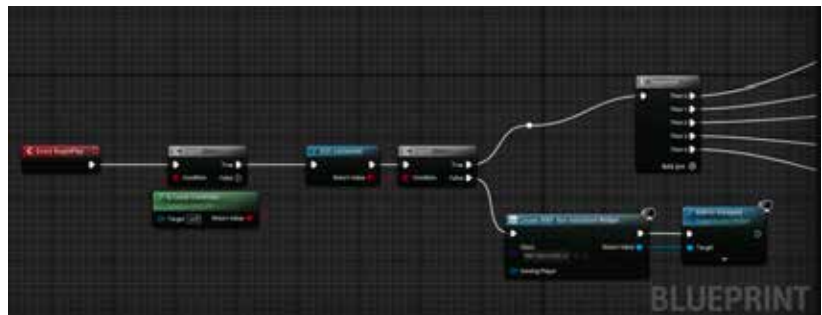
Setelah melakukan konfigurasi, tahap terakhir adalah membuat *Blueprint* yang dapat diperoleh melalui dokumentasi yang telah disediakan oleh *Unreal Engine* dan dapat dilihat pada Gambar 5.29-6.38. Fungsi konfigurasi tersebut untuk menghubungkan proyek *Metaverse ITB Ganesha Campus* ke server EOS sehingga dapat digunakan secara daring.



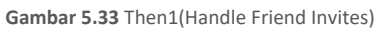
Gambar 5.29 BP_GameInstance Blueprint

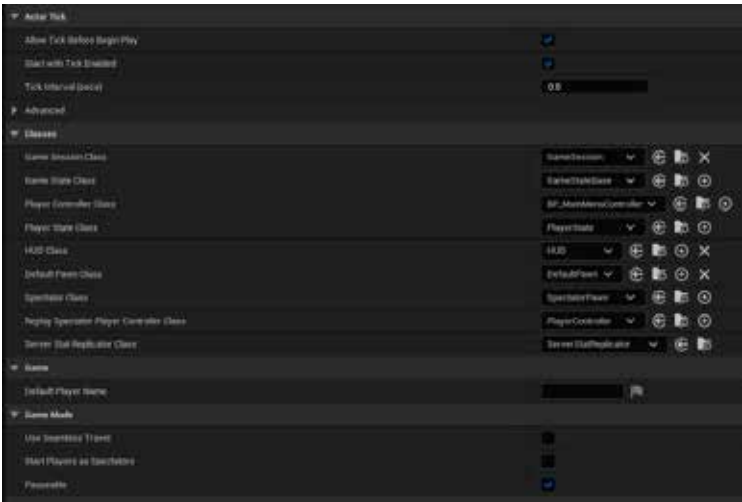


Gambar 5.30 BP_PC



Gambar 5.31 BP_MainMenuController Blueprint





Gambar 5.38 BP_GM

5.7.4 Konfigurasi dan Ekspor Proyek

Setelah melakukan konfigurasi EOS, tahap selanjutnya adalah mengonfigurasi proyek agar dapat diekspor dan dapat dijalankan. Untuk melakukan konfigurasi tersebut diperlukan beberapa instalasi dasar yang dapat dilihat pada tabel 5.3.

Tabel 5.3 Daftar kebutuhan instalasi

No	Perangkat Lunak	Versi
1	JAVA	1.8.0-77
2	Android API	30
3	Android SDK	30.0.3
4	Android NDK	21.3.6528147

Setelah melakukan instalasi perangkat lunak yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah memasukkan alamat direktori perangkat lunak tersebut pada *Unreal Engine*. Menu untuk memasukkan alamat direktori tersebut dapat ditemukan pada menu “*Project Settings*” kemudian masuk ke sub menu “*Android SDK*” pada bagian “*Platform*” dan masukkan alamat direktori pada kolom yang tersedia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.39.



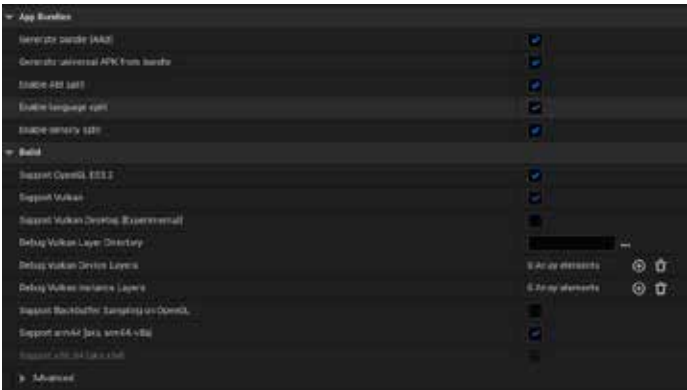
Gambar 5.39 Menu Android SDK

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah masuk ke sub-menu “Android” pada bagian “Platform” dan isi pada kolom “APK Packaging” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.40.



Gambar 5.40 Isian Menu APK Packaging

Kemudian masih pada bagian yang sama, isi pada kolom “App Bundles” dan “Build” seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.41.



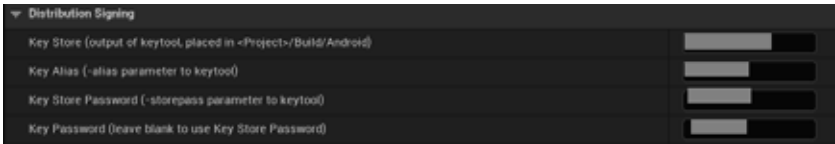
Gambar 5.41 Menu App Bundles dan Build

Langkah selanjutnya adalah membuat *keystore* dengan membuka *command prompt* dengan mode Administrator untuk mengakses folder *bin* pada direktori JAVA *jdk 1.8.0_77* dengan memasukkan *syntax* berikut.

```
cd DIREKTORI BIN JDK

DIREKTORI BIN JDK > keytool -genkey -v -keystore
NAMAPROJEK.keystore -alias NAMAALIAS -keyalg RSA -keysize
2048 -validity 10000
```

Setelah memasukkan *syntax* tersebut, masukkan identitas berupa *password* dan data pengembang. Setelah berhasil membuat *keystore*, fail *keystore* dapat dipindahkan ke folder *build/Android* pada direktori proyek *Unreal Engine*. Ketika fail berhasil dipindahkan ke direktori tersebut, langkah selanjutnya adalah memasukkan identitas *keystore* tersebut ke *Unreal Engine* dengan masuk ke sub-menu “*Android*” pada bagian “*Platform*” dan isi pada kolom “*Distribution Signing*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.42.



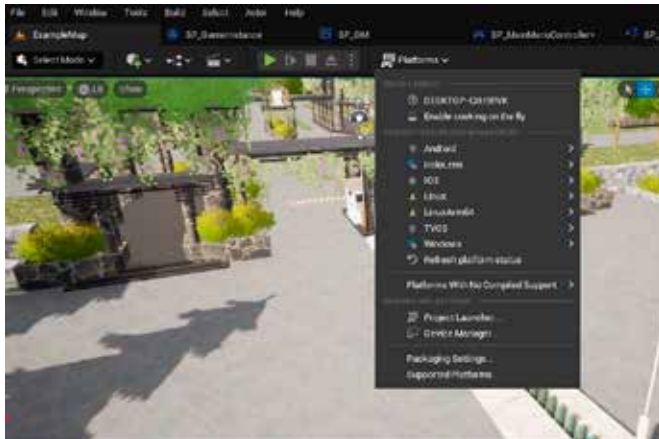
Gambar 5.42 Menu Distribution Signing

Setelah memasukkan identitas *keystore* sesuai dengan yang dibuat sebelumnya, langkah selanjutnya adalah masuk pada sub-menu “Packaging” pada bagian “Project” dan isi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.43.



Gambar 5.43 Menu Packaging

Setelah melakukan seluruh konfigurasi, proyek dapat diekspor dengan membuka menu “Platforms” dan memilih bentuk ekspor Android atau Windows sesuai dengan yang diperlukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.44.

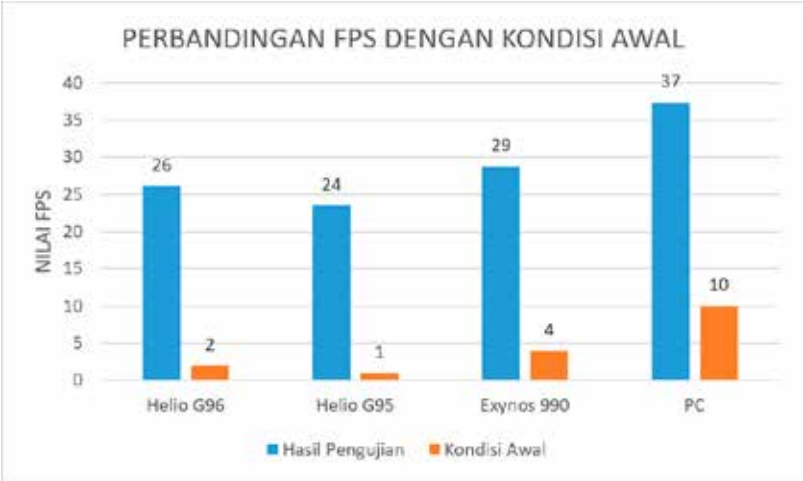


Gambar 5.44 Menu pilihan ekspor

5.7.5 Hasil Implementasi

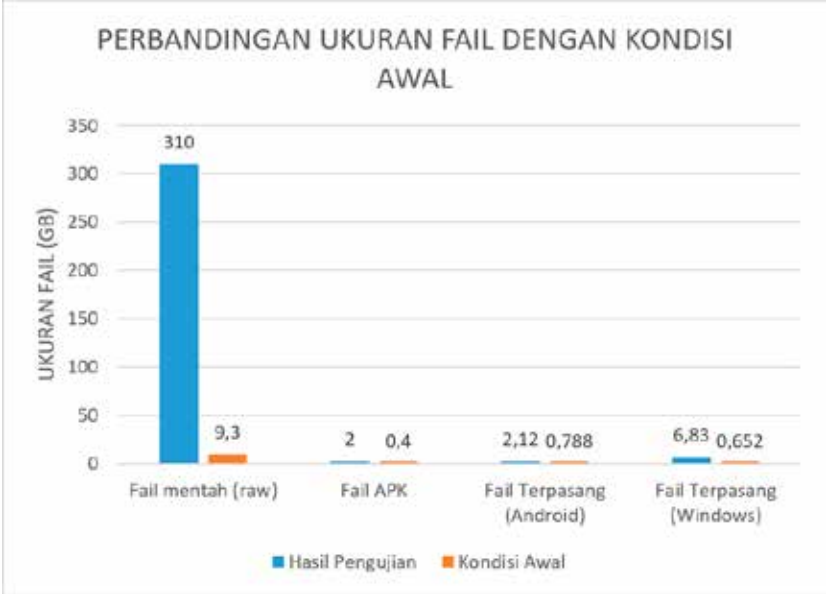
Berdasarkan hasil kajian literatur dan pemilihan metode optimasi LOD dan manajemen aset sebagai solusi dari masalah yang telah dirumuskan sebelumnya, langkah selanjutnya adalah melakukan uji coba terhadap prototipe Metaverse yang telah dikembangkan. Proses pengujian akan dilakukan menggunakan beberapa perangkat yang

sama atau setara dengan perangkat yang digunakan pada pengujian pengembangan Metaverse ITB Ganesha Campus tahap awal. Hasil uji coba tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah prototipe telah berjalan sesuai dengan fungsi yang telah didefinisikan atau tidak. Pada Gambar 5.45 hingga Gambar 5.46 merupakan hasil perbandingan kondisi setelah optimasi dengan kondisi awal proyek.



Gambar 5.45 Komparasi nilai FPS dengan kondisi awal proyek

Berdasarkan Gambar 5.45 terdapat peningkatan FPS untuk setiap *device* yang digunakan dalam pengujian. Pada *device* dengan chipset Helio G96 terdapat peningkatan FPS sebesar 1207,1% dari kondisi awal dengan nilai 2 FPS menjadi 26 FPS. Pada *device* dengan chipset Helio G95 terdapat peningkatan FPS sebesar 2252,79% dari kondisi awal dengan nilai 1 FPS menjadi 24 FPS. Pada *device* dengan chipset Exynos 990 terdapat peningkatan FPS sebesar 618,91% dari kondisi awal dengan nilai 4 FPS menjadi 29 FPS. Pada pengujian menggunakan PC terdapat peningkatan FPS sebesar 273,83% dari kondisi awal dengan nilai 10 FPS menjadi 37 FPS.



Gambar 5.46 Komparasi ukuran fail dengan kondisi awal

Berdasarkan Gambar 5.46 terdapat penurunan ukuran fail untuk setiap kategori. Pada fail mentah (*raw file*) terdapat penurunan dari 310 GB menjadi 9,3 GB. Pada ukuran fail APK terdapat penurunan dari 2 GB menjadi 0,4 GB. Pada ukuran fail yang terpasang di Android terdapat penurunan dari 2,12 GB menjadi 0,788 GB. Pada ukuran fail yang terpasang di Windows terdapat penurunan dari 6,83 GB menjadi 0,652 GB. Pada tabel 5.4 menunjukkan rangkuman hasil komparasi aplikasi dalam kondisi sebelum dan sesudah dilakukan optimasi.

Tabel 5.4 Rangkuman komparasi kondisi sebelum dan sesudah optimasi

Kondisi	Fail Mentah	Fail APK	Fail terpasang (Android)	Fail terpasang (Windows)	Rata-rata Nilai FPS			
					Exynos 990	Helio G96	Helio G95	PC
Sebelum	310GB	2GB	2,12GB	6,83GB	4	2	1	10
Sesudah	9,3GB	0,4GB	0,78GB	0,65GB	29	26	24	37

5.7.6 Komparasi Tampilan *Gameplay*

Selain peningkatan FPS dan penurunan ukuran fail, dari optimasi yang dilakukan juga terdapat penyesuaian tekstur pada *gameplay* baik untuk PC maupun Android. Pada Gambar 5.47 hingga Gambar 5.62 merupakan komparasi hasil *gameplay* PC dan Gambar 5.63 hingga

Gambar 5.73 merupakan komparasi hasil *gameplay* Android pada kondisi awal dan setelah dilakukan optimasi.



Gambar 5.47 *Gameplay* PC kondisi awal pada monumen kubus



Gambar 5.48 *Gameplay* PC kondisi awal pada gerbang utama



Gambar 5.49 *Gameplay* PC kondisi awal pada selasar pos satpam



Gambar 5.50 *Gameplay* PC kondisi awal pada Plaza



Gambar 5.51 *Gameplay* PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Monumen Kubus



Gambar 5.52 *Gameplay* PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Gerbang Utama Kampus ITB Ganesha



Gambar 5.53 *Gameplay* PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Tangga Masuk Gerbang Utama Kampus ITB Ganesha



Gambar 5.54 *Gameplay* PC Metaverse ITB setelah optimasi pada Selasar Gerbang Utama



Gambar 5.55 *Gameplay* PC Metavers ITB setelah optimis pada Plaza Persimpangan Gerbang



PENULIS



FREDDY PERMANA ZEN menjabat sebagai Guru Besar di KK Fisika Teoretik Energi Tinggi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, sejak 2008, dan Ketua Forum Guru Besar ITB 2020-2022. Ia memperoleh gelar sarjana dan magister dari Departemen Fisika ITB, lalu magister dan doktor (D. Sc.) dari Institute for Theoretical Physics (Hiroshima University) dan Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto University). Ia dianugerahi Habibie Award pada 2006, Ganesha Wira Adiutama pada 2020, dan ITSF Science and Technology Award pada 2021. Publikasinya terdiri lebih dari 160 artikel pada jurnal bereputasi dan prosiding internasional, pada bidang yang luas, mencakup sistem kuantum terbuka, teori gravitasi kuantum, inflasi kosmologi, holografi dan lubang hitam, teori string, hingga dinamika nonlinier sistem kompleks.



DONNY DWIPUTRA menyelesaikan studi doktoral di KK Fisika Teoretik Energi Tinggi, Departemen Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung pada tahun 2022 di bawah bimbingan Prof. Freddy Permana Zen. Area risetnya mencakup teori sistem kuantum terbuka dan informasi kuantum, termodinamika kuantum, serta dinamika nonlinear pada sistem kompleks dan chaos. Saat ini ia sedang melakukan penelitian mengenai quantum chaos, transpor kuantum, dan lokalisasi partikel pada sistem terbuka.



HADYAN LUTHFAN PRIHADI merupakan mahasiswa program Doktor di KK Fisika Teori Energi Tinggi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, di bawah bimbingan Prof. Freddy Permana Zen. Bidang keilmuan yang ditekuninya adalah holografi dan kosmologi pada awal alam semesta. Risetnya saat ini adalah mengenai peran entanglement kuantum pada lubang hitam dan awal alam semesta.



I GST. AG. ANOM TRENGGANA D. merupakan mahasiswa program Doktor di KK Fisika Teori Energi Tinggi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, di bawah bimbingan Prof. Freddy Permana Zen. Bidang riset yang ditekuninya adalah gelombang gravitasi dan efek kuantum di dalamnya.



SERAMIKA ARIWAHOEDI merupakan peneliti di Pusat Penelitian Fisika Kuantum, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Bidang riset yang ditekuninya mencakup loop quantum gravity, discrete gravity, dan modified gravity.



ANDRIYAN BAYU SUKSMONO adalah Guru Besar/Profesor dalam bidang Pencitraan (Imaging) dan Pengolahan Sinyal di STEI (Sekolah Teknik Elektro dan Informatika), ITB (Institut Teknologi Bandung). Andriyan mendapatkan gelar Sarjana Fisika dan Magister Teknik Elektro dari ITB, dan gelar Ph.D. (Doctor of Philosophy) dari Universitas Tokyo, Jepang. Bidang ilmu yang diminatinya, antara lain, Penginderaan Kompresif, Pencitraan, dan Teknologi/Komputasi Kuantum. Andriyan adalah seorang Senior Member dari IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Professional Member dari ACM (Association of Computing Machinery), dan Distinguished Lecturer dari IEEE Indonesia Section.



HERMAWAN KRESNO DIPOJONO

Kelompok Keahlian Material Fungsional Lanjut, Laboratorium Rancang Bangun Material Komputasional dan Rekayasa Kuantum, Institut Teknologi Bandung. Hermawan mendapatkan gelar Insinyur Teknik Fisika dari Institut Teknologi Bandung, M.Sc. Electrical Engineering dari University of Hawaii at Honolulu, dan Ph.D. Coding Theorem dari the Ohio State University at Columbus. Minat penelitian Hermawan adalah rancang bangun material komputasional, komputasi kuantum, metrologi kuantum, dan komputasi multi-skala.



YUSEP ROSMANSYAH received the bachelor's degree in electrical engineering from Bandung Institute of Technology, Indonesia, in 1993. He further received both the M.Sc. (1996) and Ph.D. (2003) degrees from University of Surrey, U.K. He has been a researcher and a professor of smart multimedia processing at the School of Electrical Engineering and Informatics, Bandung Institute of Technology, Indonesia. His areas of interest in research include multimedia, educational technology, and cyber security.



EMIR MAULUDI HUSNI adalah Guru Besar/Profesor dalam bidang ilmu Computing Network on Spacecraft di Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI), Institut Teknologi Bandung (ITB). Emir mendapatkan gelar Sarjana Teknik Elektro dari ITB dan Master of Science dari University of Surrey, United Kingdom dalam bidang ilmu Teknologi Satelit dan Ph.D. dari University of Surrey, United Kingdom dalam bidang ilmu Komunikasi Satelit. Bidang riset yang diminati antara lain, Digital Twin dan Metaverse, Teknologi Satelit dan Intelligent Transportation Systems. Emir adalah seorang Senior Member dari Institute of Electrical and Electronics Engineers.



ASYRAF ATTHARIQ PUTRA GARY merupakan dosen Program Studi Sarjana Terapan Rekayasa Perangkat Lunak pada Fakultas Vokasional Institut Teknologi Del. Ia menyelesaikan studi magister di KK. Teknik Komputer, Program Studi Teknik Elektro, STEI, Institut Teknologi Bandung pada 2023 di bawah bimbingan Prof. Emir Mauludi Husni dan merupakan awardee Beasiswa Pendidikan Indonesia untuk jenjang magister yang didanai oleh Kemendikbudristek melalui Pusat Layanan Pendidikan dan Kemenkeu melalui Lembaga Pengelola Dana Pendidikan. Bidang riset yang ditekuni mencakup pada bidang digital twin, virtual reality, data mining, sentiment analysis, counter-terrorism, dan network centric warfa.

KEILMUAN MASA DEPAN

KOMPUTASI KUANTUM
DAN METAVERSE

Buku ini merupakan salah satu hasil rekomendasi yang diperoleh dari penyelenggaraan Seri Webinar **FGB ITB Future Science and Technology Talk**. Topik tentang Sains dan Teknologi Kuantum untuk Masa Depan dibahas pada webinar tersebut, yang diselenggarakan oleh Forum Guru Besar ITB, pada tanggal 24 Juni 2022 yang lalu. Pembicara pada saat itu adalah Prof. Hermawan K. Dipojono dari FTI ITB, Prof. Freddy Permana Zen dari FMIPA ITB, dan Prof. Andriyan Bayu Suksmono dari STEI ITB. Selain itu, topik Metaverse: Peluang dan Tantangan “Dunia Baru” diangkat pada webinar tersebut pada tanggal 30 September 2022, dengan Pembicara: Prof. Emir Mauludi Husni dan Prof. Yusep Rosmansyah yang keduanya dari STEI ITB.

Buku ini berisi tentang pemikiran dari para pembicara di atas berkaitan dengan kedua topik tersebut serta diperkaya dengan hasil diskusi tentang hal tersebut. Selain rekaman video dari kedua acara ini yang tersimpan dalam kanal Youtube FGB ITB, kami sangat berharap bahwa kehadiran buku ini dapat memberikan pencerahan dan tambahan wawasan yang komprehensif kepada kita semua terhadap topik hangat di atas.

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

📍 Jl. Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
✉ sekretariat-fgb@itb.ac.id
☎ (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id

@fgbittb_120

f FgbItb

Forum Guru Besar ITB

🐦 FGB_ITB

ISBN 978-623-297-370-1



9

786232

973701