Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

KOMPUTASI KUANTUM YANG MENGUBAH DUNIA



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

KOMPUTASI KUANTUM YANG MENGUBAH DUNIA



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-63-5 (PDF)
9 786347 695635

KOMPUTASI KUANTUM YANG MENGUBAH DUNIA

Penulis :
Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

ISBN : 978-634-7695-63-5 (PDF)

Editor :
Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :
Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :
Irdha Yunianto, S.Ds., M.Kom

Penebit :
Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :
Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. 08122925000
Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :
Universitas STEKOM
Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. 08122925000
Fax. 024-6710144
Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, buku *"KOMPUTASI KUANTUM YANG MENGUBAH DUNIA"* ini dapat hadir di hadapan para pembaca.

Saat ini, peradaban manusia sedang berada di persimpangan revolusi teknologi. Ketika komputasi klasik mulai mendekati batas fisik maksimalnya, komputasi kuantum hadir menawarkan paradigma baru yang mendobrak aturan main tradisional. Buku ini disusun sebagai peta jalan yang komprehensif untuk memahami bagaimana prinsip-prinsip mekanika kuantum yang abstrak kini bertransformasi menjadi teknologi paling bertenaga di abad ini.

Untuk memberikan pemahaman yang utuh, materi dalam buku ini dirajut ke dalam lima bab utama. Bab 1 mengawali perjalanan dengan membongkar fondasi realitas kuantum—menelusuri probabilitas, lompatan dari bit menuju qubit, seni superposisi, hingga misteri keterikatan kuantum (*entanglement*) yang menantang batas-batas fisika klasik. Selanjutnya, Bab 2 membedah bagaimana konsep tersebut diubah menjadi arsitektur mesin komputasi. Pembahasan difokuskan pada logika kuantum, paralelisme, hingga algoritma baru yang mampu membongkar rahasia bilangan prima, seraya mengupas tantangan nyata seperti dekohorensi Schrödinger.

Kekuatan komputasi yang tak terbatas ini menuntut pembaruan sistem keamanan data global. Bab 3 secara khusus mengeksplorasi garis depan baru dalam komunikasi, mengupas transisi dari kriptografi klasik menuju jaringan komunikasi kuantum, di mana teleportasi beralih dari sekadar fiksi ilmiah menjadi sains nyata. Di ranah penginderaan, Bab 4 membuka wawasan tentang sensor kuantum. Era *Internet of Things* (IoT) ke depan akan sangat bergantung pada presisi pengukuran di batas Heisenberg untuk berinteraksi langsung dengan gaya dasar alam.

Sebagai sintesis, Bab 5 merangkum arah perkembangan, prospek, dan tantangan yang menanti di depan mata. Konvergensi antara kecerdasan buatan (AI) dan komputasi kuantum menjadi sorotan utama, memperlihatkan bagaimana sinergi kedua teknologi ini kelak terintegrasi dan mengubah kehidupan kita sehari-hari.

Buku ini diharapkan dapat menjadi rujukan berharga bagi kalangan akademisi, praktisi, mahasiswa, maupun masyarakat luas yang antusias menyambut masa depan teknologi. Penulis menyadari bahwa laju inovasi sains bergerak sangat cepat, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Semarang, Oktober 2026
Penulis

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
BAB 1 SEBUAH PERJALANAN MENUJU SEMESTA KUANTUM **1**
1.1 Probabilitas Dalam Dunia Kuantum 1
1.2 Dari Bit Ke Qubit 5
1.3 Pengukuran Dalam Labirin Kuantum 7
1.4 Dari Senyum Mona Lisa Hingga Qubit: Seni Superposisi 9
1.5 Benang Tak Kasat Mata: Keterikatan Kuantum 10
1.6 Misteri Keterikatan Kuantum Dan Dasar-Dasar Korelasi Klasik 12
1.7 Keterikatan (Entanglement) Dan Realitas Dunia Fisik 14
1.8 Ketidaksamaan Bell: Di Batas-Batas Realitas 16
1.9 Pengantar Teori Permainan Kuantum 21
1.10 Keteraturan Dan Kompleksitas 25
BAB 2 LOGIKA DAN KEKUATAN KOMPUTASI KUANTUM **30**
2.1 Logika Kuantum 30
2.2 Konsep Dasar Dan Elemen Mesin Turing 32
2.3 Rahasia Paralelisme Kuantum 34
2.4 Gerbang Logika Dasar Dalam Komputasi Kuantum 36
2.5 Rahasia Bilangan Prima Dan Revolusi Algoritma Kuantum 40
2.6 Dilema Schrödinger: Dekoherensi Dan Kucing Yang Sulit Ditangkap 44
2.7 Membangun Arsitektur Kuantum 47
2.8 Peran Dan Potensi Simulator Kuantum 56
BAB 3 KOMUNIKASI KUANTUM: GARIS DEPAN BARU DALAM KEAMANAN **62**
3.1 Akar Keamanan: Kriptografi Klasik 62
3.2 Evolusi Pemecahan Kode 68
3.3 Vernam, Shannon, Dan Kerahasiaan Mutlak 69
3.4 Enigma: Mesin Yang Tak Terkalahkan 72
3.5 Komunikasi Aman Saat Ini Dan Bilangan Prima 74
3.6 Komunikasi Kuantum Yang Aman: Bagaimana Masa Depannya? 76
3.7 Informasi Merambat Melalui Kuantum 77
3.8 Kriptografi Kuantum Saat Ini: Dari Serat Optik Hingga Satelit 81
3.9 Teleportasi Kuantum: Fiksi Ilmiah Menjadi Sains Nyata 84
3.10 Energi, Informasi, Dan Teleportasi 87
BAB 4 SENSOR KUANTUM DAN TEKNOLOGI PENGUKURAN MASA DEPAN **93**
4.1 Internet Of Things Dan Perkembangan Sensor 93
4.2 Sensor Dan Sistem Pengukuran 94
4.3 Sensor Dan Gaya Dasar Alam 98
4.4 Osilasi Rabi Dan Sensor Qubit 99

4.5 Resonansi Magnetik Nuklir 101
4.6 Batas Heisenberg Pada Sensor Kuantum 102
4.7 Pengembangan Sensor Kuantum 105
4.8 Aplikasi Sensor Kuantum 109
BAB 5 PERKEMBANGAN, TANTANGAN, DAN PROSPEK TEKNOLOGI KUANTUM 114
5.1 Perkembangan Sains Dan Teknologi Kuantum 114
5.2 Kecerdasan Buatan Dan Komputasi Kuantum 115
5.3 Komputasi Kuantum Dalam Kehidupan Sehari-Hari 120
5.4 Perkembangan Dan Prospek Komputasi Kuantum 125
5.5 Tantangan Dan Implikasi Teknologi Kuantum 130
DAFTAR PUSTAKA 133

BAB 1
SEBUAH PERJALANAN MENUJU SEMESTA KUANTUM

1.1 PROBABILITAS DALAM DUNIA KUANTUM

Tujuan buku ini adalah menjelaskan cara kerja komputer kuantum dengan cara yang sederhana dan mudah dipahami, lalu memperkenalkan pembaca pada dunia komunikasi kuantum dan teknologi kuantum lainnya, masa depan yang kini telah hadir di hadapan kita. Langkah pertama dalam perjalanan ini adalah mengenali mekanika kuantum, yang telah merevolusi pemahaman kita tentang dunia secara mendalam. Kita harus melangkah dengan hati-hati, karena komputer kuantum seperti halnya teknologi kuantum masa depan lainnya didasarkan pada konsep-konsep yang berlawanan dengan intuisi, akal sehat, dan pengalaman sehari-hari kita. Oleh karena itu, mekanika kuantum telah dan terus memikat para ilmuwan serta seluruh umat manusia selama lebih dari satu abad.

Karakteristik utama teori ini adalah bahwa ia memaksa kita untuk meninggalkan kepastian fisika klasik dan memperkenalkan unsur probabilitas. Kita tidak mungkin memprediksi terjadinya suatu fenomena dengan pasti; kita hanya bisa menghitung peluang terjadinya fenomena tersebut. Fisika baru ini juga memiliki karakter layaknya sebuah filosofi baru: ia memengaruhi dan dipengaruhi oleh seni, musik, sastra, psikoanalisis, dan ilmu-ilmu sosial. Pada masa kelahiran mekanika kuantum, Picasso melukis *Les Demoiselles d'Avignon*, Freud menulis *The Interpretation of Dreams*, dan Schönberg menggubah *Pelleas und Melisande*. Penting untuk diingat bagaimana dekade-dekade awal abad lalu menyaksikan pergeseran perspektif dari masa sebelumnya yang memengaruhi berbagai aktivitas intelektual manusia secara bersamaan, yang pada akhirnya melampaui pandangan dunia dan budaya terdahulu yang kemudian disebut sebagai "*klasik*".

Jika seseorang yang penasaran bertanya kepada ilmuwan ahli di bidang ini mengenai apa itu komputer kuantum, jawaban pertama yang mungkin mereka terima adalah jawaban yang paling sederhana dan ringkas guna menghindari pembahasan mendalam tentang paralelisme kuantum, pertumbuhan eksponensial, dan sebagainya: "Komputer kuantum adalah komputer yang menggunakan aturan mekanika kuantum untuk memproses informasi melakukan perhitungan dan karena alasan itulah, komputer ini jauh lebih efisien dibandingkan komputer klasik biasa." Jawaban ini yang mungkin Anda temukan dalam artikel sains populer mengenai topik tersebut, pada awalnya memberikan kesan kepada orang yang penasaran bahwa mereka telah selangkah lebih dekat dengan jawaban yang mereka cari; namun, setelah direnungkan, mereka menyadari bahwa mereka sebenarnya masih berada di titik awal. Faktanya, definisi ini hanya menggeser letak permasalahannya. Mengapa komputer kuantum begitu hebat? Untuk menjawab pertanyaan ini, kita harus mulai dari cara kita mendeskripsikan sistem kuantum; caranya sangat berbeda dari apa yang biasa kita alami sehari-hari. Dalam dunia mekanika klasik, adalah hal yang wajar untuk mengamati sifat-sifat tertentu dari suatu sistem fisik dan kemudian menetapkan satu atau beberapa nilai padanya. Sebagai contoh, untuk mendeskripsikan mobil yang sedang melaju, kita berfokus pada aspek-aspek seperti

kecepatan dan posisi, mengukur besaran-besaran tersebut seiring berjalannya waktu, lalu mencatatnya. Metode ini tidak hanya memungkinkan kita mengetahui keadaan mobil saat ini, tetapi juga memprediksi peristiwa di masa depan. Misalnya, jika kita sedang menyaksikan balapan Formula Satu (*Grand Prix*), mobil tercepatlah yang kemungkinan besar akan menang.

Sekarang, bayangkan kita memperkecil ukuran mobil balap yang sedang kita amati hingga menjadi sekecil beberapa atom saja. Kita kemudian akan mulai melihat perilaku yang berbeda. Atom-atom ini akan mulai bereaksi terhadap pengukuran kita, yang membuat situasi menjadi sangat rumit! Mengapa demikian? Bagaimana cara kita menentukan kecepatan mobil? Kita harus mengukur posisinya pada dua saat yang berurutan; kemudian, dengan mengetahui jarak tempuh dan waktu yang diperlukan, kita dapat memperoleh nilai kecepatannya. Dengan demikian, pengukuran kecepatan pada dasarnya bermuara pada pengukuran posisi. Pengukuran posisi ini dilakukan menggunakan alat-alat seperti mata manusia, kamera, atau sensor laser semuanya merupakan perangkat yang pada akhirnya menangkap cahaya atau bentuk radiasi elektromagnetik lain yang dipancarkan atau dipantulkan oleh mobil tersebut. Proses pengukuran ini tampak wajar dan jelas bagi kita, dan para ilmuwan telah menganggapnya sebagai hal yang lumrah selama berabad-abad, hingga pada titik di mana mereka tidak pernah menyangka bahwa hal itu bisa menimbulkan kesulitan konseptual.

Pada kenyataannya, proses yang tampak tidak berbahaya ini merupakan inti dari perlunya meninggalkan fisika klasik dan memperkenalkan hukum-hukum baru untuk mendeskripsikan sistem atom. Sebagai perbandingan, jika mobil kita seukuran mobil Formula Satu, kita dapat mengukur posisinya tanpa mengubah posisi maupun kecepatannya; cahaya yang diarahkan ke mobil tersebut untuk mendeteksi posisinya praktis tidak akan memberikan dampak apa pun pada mobil itu. Sebaliknya, jika mobil tersebut tersusun dari beberapa atom, cahaya yang diperlukan untuk pengukuran, meskipun sangat lemah akan berinteraksi dengan atom-atom itu sendiri dan menimbulkan dampak; misalnya, cahaya tersebut akan mengubah posisi mobil dengan memberikan dorongan yang memengaruhi kecepatannya. Bahkan satu foton Tunggal satuan cahaya terkecil yang dapat dipancarkan akan memberikan dampak pada atom yang setara dengan menembakkan peluru meriam ke mobil Formula Satu untuk mengukur posisinya; peluru meriam itu tentu saja akan berdampak pada mobil tersebut!

Oleh karena itu, setiap benturan cahaya tunggal dapat memberikan dampak signifikan, mengubah posisi atau kecepatan "mobil atom" tersebut dengan konsekuensi yang nyata. Kenyataan yang mengejutkan inilah yang mengharuskan kita meninjau kembali dan merumuskan ulang hukum-hukum fisika saat kita memasuki dunia atom. Kita tidak bisa lagi mengabaikan fakta bahwa alat pengamatan kita berinteraksi dengan objek yang diamati; di dunia kuantum, tindakan pengukuran itu sendiri mengubah apa yang sedang kita coba pahami.

Dampak inilah yang menjadi dasar bagi prinsip ketidakpastian yang memukau, yang dirumuskan pada tahun 1927 oleh Werner Heisenberg, seorang ilmuwan muda Jerman berusia 26 tahun yang merevolusi cara kita memandang alam semesta. Prinsip ketidakpastian ini sebenarnya mengungkap adanya batasan yang tak dapat ditembus: alam itu sendiri mencegah kita untuk mengetahui posisi dan kecepatan suatu partikel secara bersamaan dengan tingkat

ketepatan mutlak. Penemuan ini tidak berkaitan dengan keterbatasan alat ukur yang selalu bisa disempurnakan, melainkan menetapkan batasan mendasar yang melekat pada hukum-hukum alam semesta.

Menurut Heisenberg, setiap upaya untuk meningkatkan ketepatan dalam mengetahui salah satu dari kedua variabel tersebut pasti akan meningkatkan ketidakpastian pada variabel lainnya. Tidak ada alat ukur—betapapun canggihnya kita membuatnya—yang akan mampu melampaui batasan ini. Prinsip ini tidak hanya membatasi pengetahuan manusia, tetapi juga membuka jendela menuju dunia di mana ketidakpastian merupakan sifat intrinsik dari segala sesuatu. Kita juga mengetahui nilai batas untuk ketidakpastian ini: ketidakpastian posisi dikalikan dengan ketidakpastian kecepatan tidak akan pernah kurang dari nilai suatu konstanta universal, yaitu konstanta Planck—sebuah angka yang sangat kecil yang berperan sebagai ambang batas mutlak. Angka misterius ini bukan sekadar batas teoretis; angka ini merupakan perwujudan dari struktur hakiki realitas.

Saat kita berupaya menentukan posisi elektron dengan tingkat ketelitian yang semakin tinggi, kecepatannya menjadi semakin sulit dipastikan, sedemikian rupa sehingga hasil kali kedua ketidakpastian tersebut senantiasa bernilai setidaknya sama dengan konstanta Planck. Prinsip Heisenberg tidak hanya muncul dalam pengukuran posisi dan kecepatan, tetapi juga pada banyak pasangan besaran terukur lainnya, seperti waktu dan energi. Ketidakpastian dalam pengukuran energi dikalikan dengan ketidakpastian dalam pengukuran waktu tidak boleh kurang dari suatu konstanta yang nilainya selalu tetap: konstanta Planck. Pasangan besaran yang tidak dapat diukur secara bersamaan dengan tingkat ketelitian sembarang ini disebut sebagai "variabel konjugat".

Dengan demikian, konstanta Planck menetapkan batas bagi ketepatan pengukuran kita—sebuah batas yang tidak mungkin ditembus atau dilampaui. Karena nilai numerik konstanta ini sangat kecil, batasan tersebut tidak terasa dalam pengalaman sehari-hari. Keberadaan konstanta alam semesta ini dan alasan mengapa nilainya tepat sebesar itu tetap menjadi salah satu misteri sains yang paling memikat. Prinsip ketidakpastian memaksa para perintis mekanika kuantum untuk mengubah secara radikal konsepsi mereka tentang alam semesta. Sifat tak-tentu dari variabel konjugat, pada kenyataannya, mengharuskan kita menerima deskripsi alam semesta di mana setidaknya salah satu dari dua variabel konjugat tersebut tidak memiliki nilai pasti karena alasan fundamental, bukan karena ketidaktahuan kita. Karena terpaksa meninggalkan deskripsi sistem yang eksak, para fisikawan beralih menggunakan pendekatan probabilistik. Dengan kata lain, kita tidak dapat memprediksi secara pasti hasil pengukuran yang akan diperoleh, melainkan hanya dapat menghitung probabilitas munculnya suatu hasil dibandingkan hasil lainnya.

Sebaliknya, dalam dunia klasik, kita dapat berasumsi—setidaknya secara prinsip—bahwa kita mampu menentukan seluruh karakteristik suatu sistem dengan tingkat ketepatan yang terus meningkat: posisi, kecepatan, ukuran, berat, suhu, dan sifat-sifat lain yang ingin kita ukur. Mungkin saat ini kita belum bisa melakukannya, namun di masa depan, dengan penyempurnaan peralatan, kita akan mampu memperoleh hasil pengukuran yang semakin akurat.

Akan tetapi, di ranah kuantum, sebagaimana telah kita lihat, prinsip ketidakpastian Heisenberg tidak memungkinkan kita untuk mengukur variabel konjugat—seperti posisi dan kecepatan partikel—secara sempurna dan bersamaan. Akibatnya, untuk mendeskripsikan sifat-sifat sistem kuantum, kita harus menggunakan pendekatan probabilistik dan dengan demikian menerapkan konsep distribusi probabilitas. Bayangkan saat kita melempar dadu yang adil: setiap sisi memiliki peluang yang sama (1/6) untuk muncul. Contoh sederhana distribusi peluang di dunia makroskopis kita ini memberikan gambaran tentang bagaimana mekanika kuantum mendeskripsikan perilaku partikel—bukan dengan kepastian, melainkan dengan peluang. Sama halnya seperti kita tidak bisa memprediksi angka mana yang akan muncul saat melempar dadu, kita tidak bisa memprediksi hasil pengukuran kuantum secara pasti; kita hanya bisa menghitung peluang dari berbagai kemungkinan hasil yang ada. Deskripsi probabilistik ini bukan sekadar ciri khas mekanika kuantum, melainkan sebuah lompatan paradigma yang sesungguhnya dibandingkan dengan mekanika klasik. Perhatikan fisika Newton: kita dapat mengukur posisi dan kecepatan peluru meriam secara presisi saat ditembakkan, dan dengan menerapkan hukum Newton, kita bisa memprediksi secara pasti titik jatuhnya di tanah. Itu adalah dunia yang penuh kepastian yang sangat jelas, di mana setiap sebab memiliki akibat yang dapat diprediksi.

Namun, kini kita memasuki ranah subatomik, tempat berlakunya aturan-aturan mekanika kuantum. Di sini, ambil contoh elektron: kita tidak bisa lagi berbicara tentang posisi atau kecepatan yang pasti. Yang bisa kita lakukan hanyalah mengukur peluang di mana elektron mungkin berada dan seberapa cepat ia bergerak pada saat tertentu. Alih-alih memprediksi hasil yang eksak, kita menghitung "awan kemungkinan"—sekumpulan potensi posisi di masa depan, yang masing-masing memiliki nilai peluang terkait. Awan kemungkinan ini berkembang seiring waktu, layaknya gelombang peluang yang meluas dan berubah. Ketika kita akhirnya mengukur titik tempat elektron itu membentur—misalnya pada pelat fotografi—hasil spesifik yang diperoleh merupakan akibat dari runtuhnya awan tersebut menjadi satu titik presisi, namun hal itu hanya terjadi pada saat kita melakukan pengamatan. Dengan demikian, mekanika kuantum tidak memberi tahu kita di mana elektron "akan berada", melainkan di mana ia "bisa berada", sehingga mengubah pemahaman kita tentang realitas.

Legenda William Tell, yang digunakan oleh Max Born untuk menjelaskan konsep peluang dalam mekanika kuantum, menawarkan metafora yang menarik. Bayangkan Tell, dengan jantung berdegup kencang, bersiap memanah apel yang diletakkan di atas kepala anaknya. Sebelum beraksi, ia memanjatkan doa, memohon kepada Tuhan agar tangannya tetap stabil dan bidikannya tidak meleset. Demikian pula, seorang fisikawan di laboratoriumnya mengarahkan neutron ke arah atom, dengan harapan dapat mengenainya secara tepat. Ia tahu bahwa berbekal pengalaman dan peralatan yang lebih canggih, ia dapat terus menyempurnakan eksperimen tersebut.

Namun, berbeda dengan Tell, ilmuwan ini menyadari adanya batasan mutlak yang tak dapat ditembus akibat prinsip Heisenberg. Seandainya penguasa kejam Albrecht Gessler memaksa Tell untuk membidik bukan ke arah apel, melainkan ke arah sebuah atom di atas kepala putranya—dengan menggunakan neutron sebagai anak panah—maka keahlian luar

biasa Tell sekalipun tidak akan ada gunanya: keberhasilan tembakan itu semata-mata akan ditentukan oleh faktor probabilitas yang tak dapat diprediksi.

Tidak mengherankan jika prinsip ketidakpastian Heisenberg menghadapi penentangan—bahkan dari para ilmuwan terhebat pada masanya—sebelum akhirnya diterima. Di antara mereka, penentang yang paling terkemuka adalah Albert Einstein, yang tidak pernah bisa menerima gagasan tentang alam semesta yang diatur oleh faktor kebetulan. Pernyataan terkenalnya, "Tuhan tidak bermain dadu dengan alam semesta," mencerminkan penolakannya terhadap aspek probabilistik mekanika kuantum. Einstein mengatakan bahwa Tuhan mungkin penuh rahasia, tetapi Dia tidak berniat jahat; baginya, gagasan bahwa perilaku kosmos ditentukan oleh probabilitas—alih-alih hukum-hukum yang pasti dan deterministik—adalah sesuatu yang tidak dapat diterima. Karena yakin adanya mekanisme tersembunyi—atau "variabel tersembunyi"—yang mampu memulihkan keteraturan dan prediktabilitas alam semesta, Einstein menghabiskan sebagian besar hidupnya untuk mencoba memodifikasi mekanika kuantum agar selaras dengan determinisme fisika klasik.

Namun, setiap upaya untuk mengungkap teori alternatif yang misterius ini berujung pada kegagalan. Menanggapi upaya gigih tersebut, Niels Bohr—salah satu tokoh perintis mekanika kuantum—memberikan jawaban dengan kalimat yang tak kalah terkenalnya: "Einstein, berhentilah mendikte Tuhan tentang apa yang harus dilakukan-Nya." Pertukaran gagasan antara dua raksasa sains ini tidak hanya merangkum konflik antara determinisme dan probabilisme, tetapi juga menandai salah satu diskusi filosofis paling menarik dan mendalam dalam sejarah fisika. Melalui langkah awal ini, kita telah menyingkap tabir salah satu aspek paling memikat dari mekanika kuantum: ranah probabilitas. Kini, kita siap untuk mengeksplorasi bagaimana karakteristik revolusioner ini dapat mengubah dunia komputasi. Apa sebenarnya "komputer kuantum" itu, dan kemungkinan luar biasa apa yang dapat ditawarkannya? Untuk menjawabnya, kita harus mulai dari fondasi pemrosesan informasi, yakni dari unit dasar pembangun yang menjadi landasan bagi setiap pemroses informasi klasik: bit. Di ranah kuantum, bit memiliki "kembaran" yang jauh lebih hebat dan serbaguna: qubit. Kita akan menelusuri bagaimana unit dasar ini—yang bekerja berdasarkan hukum fisika kuantum—dapat membuka cakrawala baru dalam komputasi, serta membawa kita menuju berbagai kemungkinan yang hingga belum lama ini dianggap sekadar fiksi ilmiah.

1.2 DARI BIT KE QUBIT

Bit adalah satuan informasi; bit dapat memiliki dua nilai dan direpresentasikan oleh sistem apa pun yang mampu berada dalam dua keadaan berbeda—seperti "nyala" atau "mati", yang masing-masing kita sebut sebagai 1 dan 0. Bayangkan sebuah koin yang bisa mendarat dengan sisi gambar atau angka di atas, sebuah bola yang bisa berada di kotak yang satu atau yang lainnya, atau pulsa suara yang bisa berdurasi panjang atau pendek, seperti dalam kode Morse. Pada komputer masa kini, bit ini direpresentasikan oleh arus listrik yang dapat mengalir melalui kabel atau dihambat alirannya. Inti dari proses ini adalah transistor, sebuah komponen mungil yang berfungsi sebagai sakelar untuk mengatur apakah arus listrik mengalir atau berhenti. Di dalam komputer klasik, miliaran transistor ini bekerja bersama, menyala dan mati

dalam gerakan terpadu yang memungkinkan dilakukannya perhitungan yang sangat rumit. Berkat sakelar-sakelar mungil inilah komputer mampu memecahkan masalah, mengolah data, dan menggerakkan dunia digital tempat kita hidup saat ini.

Pentingnya bit terletak pada kemampuannya untuk merepresentasikan angka, kata, atau pesan apa pun melalui urutan sederhana angka 0 dan 1, yang dikenal sebagai pengodean biner. Perhatikan contoh angka: dalam dunia biner, setiap angka direpresentasikan sebagai urutan 0 dan 1. Sebagai contoh, angka 2 menjadi “10” dalam biner; 3 menjadi “11”, 4 menjadi “100”, dan seterusnya. Namun, kehebatan pengodean biner tidak terbatas pada angka saja: setiap huruf alfabet, setiap kata, bahkan keseluruhan isi buku dapat diterjemahkan ke dalam bahasa angka nol dan satu ini. Sistem yang sederhana namun ampuh ini merupakan fondasi bagi seluruh dunia digital, yang mampu mengubah gagasan, data, atau gambar apa pun menjadi kode biner yang dapat dimanipulasi, dikirimkan, dan disimpan oleh komputer. Bit kuantum, atau qubit, adalah entitas yang jauh lebih canggih dan hebat dibandingkan bit klasik yang sederhana. Sementara bit klasik hanya dapat berada dalam salah satu dari dua keadaan—0 atau 1—qubit dapat berada dalam kedua keadaan tersebut secara bersamaan, berkat fenomena superposisi yang menakjubkan. Untuk membayangkan perbedaan ini, bayangkan sebuah bola dunia: dua keadaan bit klasik ibarat Kutub Utara dan Kutub Selatan—tetap dan saling berlawanan.

Sebaliknya, kemungkinan keadaan qubit direpresentasikan oleh semua titik di permukaan bola dunia tersebut, yang menawarkan jumlah posisi antara yang tak terhingga. Namun, apa artinya jika dikatakan bahwa qubit berada dalam keadaan 0 dan 1 secara bersamaan? Untuk mulai memahaminya, pertimbangkan hasil pengukuran qubit. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, hasil pengukuran dalam mekanika kuantum bersifat probabilistik; kita tidak tahu apakah kita akan mendapatkan hasil 0 atau 1. Sebelum pengukuran dilakukan, qubit umumnya tidak berada di Kutub Utara (0) ataupun di Kutub Selatan (1), melainkan dalam kombinasi (superposisi) dari kedua keadaan tersebut. Jika kita melihat bola dunia, setiap titik pada bola tersebut menentukan probabilitas ditemukannya qubit dalam keadaan 0 atau 1 saat diukur. Untuk titik-titik di belahan bumi utara, kemungkinan besar kita akan mendapatkan hasil 0, sedangkan untuk titik-titik di belahan bumi selatan, kemungkinan besar kita akan mendapatkan hasil 1.

Titik di khatulistiwa melambangkan keadaan di mana qubit memiliki peluang 50% untuk terukur sebagai 0 dan 50% sebagai 1; titik yang lebih dekat ke Kutub Utara mungkin memiliki peluang 70% untuk terukur sebagai 0 dan 30% sebagai 1; titik yang tepat berada di Kutub Utara pasti akan terukur sebagai 0, dan titik di Kutub Selatan pasti akan terukur sebagai 1. Pada akhirnya, saat qubit diukur, ia "dipaksa" untuk memilih salah satu dari dua keadaan tersebut, yaitu 0 atau 1 (Kutub Utara atau Kutub Selatan). Namun, sebelum pengukuran dilakukan, qubit berada dalam superposisi dari kedua keadaan tersebut, yang direpresentasikan oleh sebuah titik pada bola dunia. Singkatnya: superposisi berarti qubit dapat berada dalam kombinasi kedua keadaan (0 dan 1) secara bersamaan hingga pengukuran dilakukan. Posisi pada bola (bola dunia) merepresentasikan kombinasi ini, yang berubah bergantung pada letak titik tersebut di permukaan.

Hal ini berarti qubit beroperasi dalam semesta kemungkinan yang jauh lebih luas, di mana setiap titik pada bola dunia merupakan keadaan informasi yang potensial. Sementara bit klasik terbatas pada transisi sederhana antara 0 dan 1—seperti menyalakan atau mematikan sakelar, atau berpindah dari Kutub Utara ke Kutub Selatan dalam analogi bola dunia—qubit membuka pintu bagi transformasi yang tak terhitung jumlahnya, sebanding dengan segala jalur tak terbatas yang dapat ditelusuri pada bola dunia. Alih-alih terbatas pada pergerakan dari Kutub Utara ke Kutub Selatan (atau sebaliknya), qubit dapat menempuh perjalanan apa pun di permukaan bola tersebut. Kekayaan keadaan dan transformasi yang luar biasa ini, ketika melibatkan banyak qubit secara bersamaan, menjanjikan revolusi dalam cara kita melakukan komputasi. Muncul skenario di mana masalah-masalah yang saat ini melampaui batas kemampuan komputer klasik paling canggih dapat diselesaikan oleh algoritma kuantum, dengan memanfaatkan potensi besar yang tersembunyi dalam unit-unit dasar informasi yang sangat kecil namun luar biasa kompleks ini.

1.3 PENGUKURAN DALAM LABIRIN KUANTUM

Qubit adalah entitas kuantum yang perilakunya diatur oleh hukum-hukum mekanika kuantum. Hukum-hukum ini memungkinkan kita menentukan semua probabilitas perolehan hasil tertentu saat kita melakukan pengukuran. Keadaan-keadaan yang mungkin dimiliki qubit dapat direpresentasikan oleh titik mana pun di permukaan bola dunia. Kemungkinan keadaan yang tak terbatas—dan konsekuensinya, transformasi dari satu keadaan ke keadaan lain—inilah yang menjadikan qubit komponen yang begitu memikat dan tangguh dalam dunia komputasi, yang mampu memanfaatkan aturan-aturan kuantum yang menentang intuisi klasik kita. Namun, ketika kita akhirnya mengamatinya, qubit "runtuh" (mengalami *collapse*) menjadi salah satu dari dua keadaan klasik: 0 atau 1, seolah-olah dipaksa untuk memilih antara Kutub Utara dan Kutub Selatan.

Bagaimana kita dapat benar-benar memahami konsep superposisi dalam mekanika kuantum, di mana suatu objek dapat berada secara bersamaan dalam dua keadaan yang berbeda, seperti 0 dan 1? Dan bagaimana hal ini berbeda dari konsep probabilitas yang lebih familier dalam mekanika klasik? Untuk memahaminya sepenuhnya, kita harus menelusuri apa yang terjadi pada saat krusial ketika kita melakukan pengukuran. Pada saat itulah dunia kuantum menyingkapkan sifat luar biasanya dan mengungkap perbedaan mendasar antara superposisi dan probabilitas sederhana. Bayangkan ada sebuah bit klasik yang berada di dalam kotak tertutup. Seseorang telah menyiapkannya dalam keadaan tertentu: bisa jadi bernilai 0 dengan probabilitas 50%, atau 1, juga dengan probabilitas 50%. Meskipun kita tidak mengetahui keadaan bit tersebut, satu hal yang pasti: bit itu jelas berada dalam salah satu dari dua keadaan tersebut, yaitu 0 atau 1. Ini adalah elemen realitas fisik, sesuatu yang konkret dan tak terbantahkan, terlepas dari apakah kita memutuskan untuk membuka kotak itu atau tidak.

Ketika kita akhirnya membuka kotak dan mengamati keadaan bit tersebut, kita tidak mengubahnya; kita hanya menemukan realitas yang memang sudah ada sebelumnya. Proses pengukuran dalam hal ini tidak mengubah sistem—yaitu bit tersebut—sama sekali, melainkan hanya memberikan informasi mengenainya. Hal ini mirip dengan mengamati mobil balap yang

melaju kencang di lintasan: pengamatan tersebut tidak memengaruhi kecepatan atau posisinya; pengamatan itu hanya memberikan informasi yang sebelumnya tidak kita ketahui.

Dalam mekanika kuantum, situasinya berubah drastis. Bayangkan ada sebuah qubit di dalam kotak tertutup. Saat kita membuka kotak dan melakukan pengukuran, kita akan mendapati—sama seperti pada kasus bit klasik—bahwa qubit tersebut memiliki nilai 0 atau 1. Namun, berbeda dengan bit klasik, kita tidak bisa mengatakan bahwa qubit tersebut sudah berada dalam salah satu dari dua keadaan itu sebelum pengukuran dilakukan. Sebaliknya, sebelum kotak dibuka, qubit bisa saja berada dalam keadaan superposisi, yang direpresentasikan oleh titik mana pun pada permukaan bola. Ini berarti bahwa sementara di dunia klasik kita dapat menyimpulkan secara pasti bahwa bit yang ditemukan dalam keadaan 0 memang sudah berada dalam keadaan tersebut bahkan sebelum kotak dibuka, pada kasus qubit, situasinya tidak sesederhana itu. Jika kita mengukur qubit dan mendapati nilai 0, kita tidak bisa mengatakan bahwa qubit tersebut sebenarnya sudah berada dalam keadaan 0 sebelum pengukuran.

Dengan kata lain, kita tidak dapat menganggap keadaan qubit sebelum pengamatan sebagai elemen realitas fisik. Pengukuran itu sendirilah yang "menentukan" hasilnya, sedangkan keadaan qubit sebelum kotak dibuka tetap tidak terdefinisi dan secara inheren tidak pasti. Sebuah analogi untuk memahami proses pengukuran kuantum dapat ditemukan pada gambar terkenal yang menampilkan sosok wanita muda sekaligus wanita tua (Gambar 1.1), yang berasal dari sebuah kartu pos Jerman tahun 1888. Gambar ini—yang telah menarik perhatian para psikolog selama beberapa dekade dan umum dikenal sebagai "istri/ibu mertua Boring"—tidak secara spesifik menampilkan sosok wanita muda ataupun wanita tua; setidaknya, tidak sampai kita mengamatinya.



Gambar. 1.1. Wanita muda atau wanita tua? (William Ely Hill, kartunis dan ilustrator Amerika.)

Gambar tersebut pada dasarnya bersifat ambigu: bergantung pada siapa yang melihatnya, pada pandangan pertama, gambar itu bisa tampak sebagai wanita tua berhidung besar yang mengenakan syal dan kerah bulu, atau sebagai wanita muda yang mengenakan kalung, mantel bulu, dan topi elegan. Menariknya, berbagai studi menunjukkan bahwa orang berusia di bawah 30 tahun cenderung melihat sosok wanita muda terlebih dahulu, sedangkan mereka yang berusia di atas 30 tahun biasanya mengenali sosok wanita tua lebih dulu. Dalam analogi ini, gambar tersebut merepresentasikan keadaan superposisi yang memuat kedua

kemungkinan: wanita muda dan wanita tua. Hanya ketika pengamat melihat sosok tersebut, persepsi akan "runtuh" (mengalami *collapse*) menjadi salah satu dari dua interpretasi, yang menentukan wanita mana yang kita lihat. Proses mempersepsikan gambar ini mirip dengan apa yang terjadi dalam mekanika kuantum, ketika pengukuran menyebabkan "runtuhnya" keadaan superposisi menjadi satu realitas yang pasti.

1.4 DARI SENYUM MONA LISA HINGGA QUBIT: SENI SUPERPOSISI

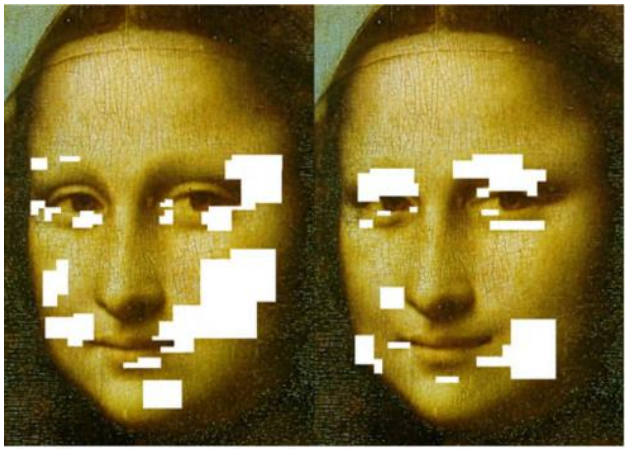
Gambar wanita muda dan wanita tua itu hanyalah sebuah analogi, yang berguna untuk memberi kita gambaran umum tentang apa yang terjadi di dunia kuantum. Analogi ini membantu kita memahami secara intuitif bagaimana pikiran kita—yang terbiasa dengan logika klasik—kesulitan memahami konsep superposisi kuantum. Contoh superposisi yang jauh lebih menarik dan kompleks dapat ditemukan pada lukisan *Mona Lisa* karya Leonardo da Vinci. Senyum penuh teka-teki Mona Lisa, yang telah memikat dan menantang umat manusia selama berabad-abad, merupakan representasi sempurna dari gagasan ini. Daya tariknya bersumber dari fakta bahwa senyum itu sulit didefinisikan secara pasti: sebuah perpaduan tak kasatmata antara kebahagiaan dan kesedihan. Sulit untuk membayangkan bahwa Leonardo, dengan pengetahuannya yang mendalam tentang anatomi dan optik, menciptakan efek ini secara kebetulan.

Setiap kali kita mengamati *Mona Lisa*, persepsi kita berubah tanpa kita sadari, seolah-olah lukisan itu hidup dan berubah di hadapan mata kita. Namun, bagaimana Leonardo menciptakan perpaduan luar biasa dari dua emosi yang sangat bertolak belakang ini? Kita bisa membayangkan *Mona Lisa* berada dalam keadaan superposisi antara "kebahagiaan" dan "kesedihan", layaknya sebuah qubit yang dapat berada dalam keadaan 0 dan 1 secara bersamaan. Faktanya, jika kita menganalisis Gambar 1.2 dengan saksama, kita akan menemukan elemen-elemen yang membangkitkan perasaan sukacita sekaligus melankoli dalam diri kita. Bayangan di sudut kanan mulut yang melandai ke bawah menyiratkan kesedihan. Namun, lebih jauh ke arah kanan, bayangan yang melengkung ke atas—seolah memperpanjang garis mulut—menyerupai senyuman.

Bayangan di atas mata membuat kita menangkap kesan melankoli, sementara cahaya di antara mata kiri dan pelipis memberikan ekspresi yang lebih hidup. Gambar 1.3 memperjelas konsep tersebut lebih lanjut: di sisi kiri, detail yang mengekspresikan "kebahagiaan" telah dihilangkan, sehingga hanya menyisakan "kesedihan"; di sisi kanan, hal sebaliknya yang terjadi. Saat kita mengamati salah satu dari kedua versi ini, kita menangkap satu emosi saja, yang dengan demikian mengurangi kompleksitas karya tersebut dan menghilangkan daya magisnya. Oleh karena itu, kita dapat menganggap kedua panel pada Gambar 1.3 sebagai representasi dari dua keadaan berbeda dalam sistem Mona Lisa, sementara lukisan aslinya (Gambar 1.2) merupakan superposisi antara kebahagiaan dan kesedihan.



Gambar 1.2 Senyuman Mona Lisa.



Gambar 1.3 Mona Lisa yang sedih (kiri) dan Mona Lisa yang bahagia (kanan). Daya pikat lukisan asli pada Gambar 1.2 bersumber dari "superposisi" kedua "keadaan" Mona Lisa ini. Gambar diambil dari S. Prvanović, "*Mona Lisa - The Ineffable Smile of Quantum Mechanics*", https://arxiv.org/pdf/physics/0302089.

Kita hampir sampai di penghujung perjalanan yang memungkinkan kita untuk memperkenalkan potensi luar biasa dari teknologi dan informasi kuantum. Hanya tersisa satu langkah terakhir. Sejauh ini, kita telah membahas superposisi dalam konteks satu qubit saja, padahal komputer kuantum yang sesungguhnya terdiri dari banyak qubit. Lantas, apa yang terjadi ketika bukan hanya satu, melainkan dua qubit atau lebih memasuki keadaan superposisi kuantum? Di sinilah kita akan mendalami salah satu konsep fisika kuantum yang paling memukau dan revolusioner: keadaan terjerat (*entangled states*)—sebuah dunia di mana hubungan antarpartikel melampaui segala imajinasi dan menciptakan berbagai kemungkinan yang kian menantang pemahaman kita tentang realitas.

1.5 BENANG TAK KASAT MATA: KETERIKATAN KUANTUM

Kemungkinan keadaan bagi dua bit klasik ada empat: 00, 01, 10, dan 11; dan pada saat tertentu, keduanya hanya dapat berada dalam salah satu dari keempat keadaan tersebut. Tidak ada kemungkinan lain. Namun, dengan qubit, kita memasuki dunia yang sama sekali berbeda. Karena diatur oleh hukum mekanika kuantum, dua qubit tidak terbatas pada satu

keadaan saja dari keempat kemungkinan tersebut. Sama halnya dengan kasus satu qubit, keduanya dapat berada dalam superposisi dari semua keadaan ini, seolah-olah merangkul setiap kemungkinan secara bersamaan. Kemampuan unik ini membuka jalan bagi fenomena mengejutkan yang tidak memiliki padanan di dunia klasik: keterikatan (*entanglement*). Ini adalah hubungan yang mendalam—sebuah "jalinan" antar-qubit—yang memungkinkan mereka berperilaku secara berkorelasi bahkan pada jarak yang sangat jauh, seolah-olah tersinkronisasi secara ajaib.

Erwin Schrödinger, salah satu pelopor besar mekanika kuantum, mendefinisikan keterikatan sebagai "ciri khas mekanika kuantum". Pernyataan ini menyoroti betapa pentingnya untuk memahami sepenuhnya apa itu keterikatan dan mengapa hal itu begitu berbeda dari konsep superposisi, yang juga dapat kita temukan dalam pengalaman sehari-hari. Faktanya, superposisi bukanlah hal yang eksklusif bagi fisika kuantum. Bayangkan, misalnya, senar alat musik. Saat tuts piano ditekan, senar gitar dipetik, atau senar biola digesek, senar tersebut menghasilkan bunyi yang dibedakan oleh telinga kita sebagai nada rendah atau tinggi berdasarkan frekuensinya. Bunyi rendah berkaitan dengan frekuensi rendah, sedangkan bunyi tinggi berkaitan dengan frekuensi tinggi. Namun, bunyi yang dihasilkan tidak pernah berupa satu frekuensi murni tunggal: bunyi tersebut merupakan superposisi dari berbagai frekuensi yang berpadu menjadi satu. Justru kombinasi frekuensi inilah yang memberikan warna suara (*timbre*) unik pada setiap alat musik, sehingga kita dapat mengenalinya di antara ribuan alat musik lainnya.

Bayangkan kita mengambil dua alat musik yang berbeda, yang masing-masing memiliki suara khas. Suara-suara ini tidak saling memengaruhi: keduanya tetap terpisah dan independen. Dalam dunia klasik, kenyataan memang bekerja seperti ini. Namun, dalam mekanika kuantum, terjadi sesuatu yang luar biasa: kita dapat menciptakan superposisi antara keadaan dua objek yang berbeda, seolah-olah keduanya terjalin secara misterius. Mari kita coba membuat hal ini lebih konkret. Misalkan kita mempertimbangkan dua orang dan berfokus pada salah satu karakteristik mereka: warna mata. Dalam pengalaman kita sehari-hari, warna mata adalah fakta objektif yang tidak bergantung pada pengamat. Terlepas dari apakah ada yang melihat mereka atau tidak, seseorang memiliki mata berwarna terang atau gelap, dan ini merupakan fakta kenyataan.

Namun, mekanika kuantum membalikkan konsep ini. Menurut teori tersebut, kedua orang itu dapat dikondisikan dalam keadaan terjerat (*entangled*), di mana mata mereka berada dalam superposisi: sebuah kombinasi antara keadaan "mata terang untuk orang pertama, mata gelap untuk orang kedua" dan "mata gelap untuk orang pertama, mata terang untuk orang kedua". Di sinilah peran keterjeratan kuantum (*quantum entanglement*). Sekarang, bayangkan salah satu dari kedua orang itu menemui pengamat yang kita sebut Alice, sementara yang lainnya menemui pengamat bernama Bob. Alice bisa saja berada di Eropa dan Bob di Amerika Serikat, terpisah jarak ribuan kilometer, namun mekanika kuantum menetapkan bahwa pengamatan mereka saling terhubung erat. Saat Alice melihat mata orang di hadapannya, ia mungkin melihat mata terang atau gelap dengan peluang yang sama besar; kita tidak dapat memprediksi warnanya secara pasti.

Namun, pada saat Alice mengamatinya, sesuatu yang luar biasa terjadi: mata orang yang diamati oleh Bob—yang berada jauh di sana—seketika itu juga menjadi pasti. Jika Alice melihat mata terang, Bob pasti akan melihat mata gelap, dan sebaliknya, seolah-olah keduanya disinkronkan oleh kekuatan tak kasat mata. Hal ini terjadi karena keadaan kedua orang tersebut saling terjerat. Dan sama halnya dengan dua partikel yang terjerat, tindakan terhadap salah satunya akan segera memengaruhi keadaan yang lainnya, terlepas dari jarak yang memisahkan. Seolah-olah, pada tingkat yang mendalam, kedua orang ini merupakan satu kesatuan, yang terhubung oleh benang tak kasat mata yang melampaui pemahaman kita tentang dunia.

Tentu saja, kita tidak bisa benar-benar menjerat dua orang secara kuantum seperti dalam contoh sebelumnya. Namun, apa yang mustahil bagi kita dalam skala makroskopis menjadi kenyataan mutlak di dunia mikroskopis. Memang dimungkinkan untuk menciptakan dan mengamati keadaan terjerat (*entangled states*) antara partikel-partikel seperti foton atau atom. Meskipun berukuran sangat kecil, partikel-partikel ini menunjukkan korelasi kuantum yang melampaui apa yang dimungkinkan dalam sistem klasik: keterhubungan mereka yang tak terlihat dan penuh misteri membawa kita ke ranah yang menantang intuisi kita—intuisi yang semata-mata terbentuk dari pengalaman di dunia klasik. Semua ini akan menjadi lebih jelas saat kita membahas ketidaksamaan Bell (*Bell's inequalities*), kunci untuk memecahkan teka-teki keterjeratan kuantum.

1.6 MISTERI KETERIKATAN KUANTUM DAN DASAR-DASAR KORELASI KLASIK

Schrödinger sendiri menyadari keanehan *entanglement* (keterikatan kuantum) serta dampaknya, bahkan pada jarak yang sangat jauh. Pada tahun 1935, ia menulis surat kepada Albert Einstein yang mengomentari fenomena tersebut dengan mengatakan: "Saya tidak menyukainya, dan saya menyesal pernah terlibat di dalamnya." Meskipun merupakan salah satu pendiri teori kuantum, Schrödinger merasa takjub sekaligus terusik oleh implikasi konseptual dari *entanglement*. Einstein menyebutnya sebagai "aksi menyeramkan dari jarak jauh", sebuah ungkapan yang mencerminkan ketidaknyamanannya terhadap gagasan bahwa satu partikel dapat memengaruhi partikel lain secara seketika, terlepas dari jarak yang memisahkan keduanya.

Korelasi klasik

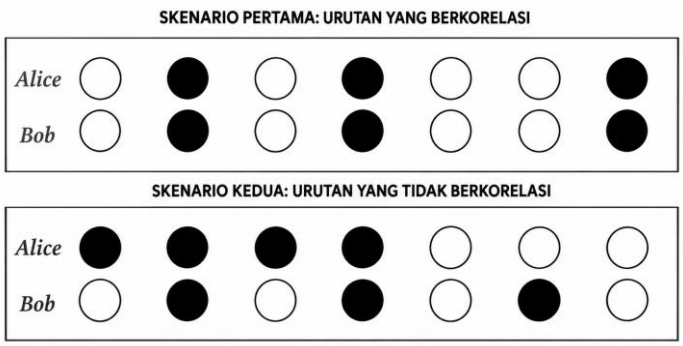
Dua sistem dikatakan berkorelasi ketika pengetahuan mengenai suatu sifat dari salah satu sistem memberikan informasi tentang sistem lainnya. Konsep korelasi juga ada dalam dunia klasik, dan Einstein sendiri menggunakan metafora sepasang sarung tangan untuk menjelaskannya. Jika kita menempatkan kedua sarung tangan tersebut dalam kotak terpisah dan mengirimkan salah satunya kepada seseorang yang berada jauh, membuka kotak tersebut akan secara otomatis mengungkap sarung tangan mana yang berada di kotak lainnya, terlepas dari jarak di antara keduanya. Jenis korelasi ini sepenuhnya bersifat deterministik—tidak ada hal yang misterius di dalamnya: menemukan sarung tangan kanan sama sekali tidak memengaruhi sarung tangan kiri, melainkan hanya memberikan informasi mengenainya.

Misalkan sekarang kita memiliki bola putih dan bola hitam. Kita memilih secara acak sepasang bola yang berwarna sama dan memasukkan setiap bola ke dalam kotak yang berbeda; kemudian kita mengirimkan satu kotak kepada Alice dan kotak lainnya kepada Bob. Tak satu pun dari mereka mengetahui apakah bola di dalam kotak mereka berwarna putih atau hitam. Namun, begitu Alice membuka kotaknya dan menemukan, misalnya, bola putih, ia segera mengetahui bahwa Bob juga memiliki bola putih, karena bola-bola tersebut memiliki warna yang sama. Dalam kasus ini, tindakan Alice—membuka kotak dan melihat warna bola—memungkinkannya memprediksi dengan pasti hasil yang akan diperoleh Bob saat ia membuka kotaknya.

Hal ini terjadi karena kedua sistem (kedua bola tersebut) berkorelasi secara sempurna: pengetahuan tentang satu sistem memberikan informasi mengenai sistem lainnya. Sekarang, bayangkan kita memodifikasi eksperimen yang baru saja dijelaskan: untuk setiap kotak, kita memilih warna bola yang dimasukkan ke dalamnya secara acak. Dengan cara ini, kotak yang dikirimkan kepada Alice dan Bob bisa berisi bola dengan warna yang sama atau warna yang berbeda dengan peluang yang sama besar. Oleh karena itu, setelah membuka kotaknya, Alice tidak dapat menyimpulkan apa pun mengenai warna bola di dalam kotak Bob: kedua sistem tersebut sama sekali tidak berkorelasi.

Contoh sederhana ini dengan jelas menggambarkan betapa krusialnya korelasi: memiliki sistem yang berkorelasi memungkinkan kita memperoleh informasi tentang satu bagian sistem dengan mengamati bagian lainnya. Namun, pertanyaan sebenarnya adalah: bagaimana cara kita mengukur dan menguantifikasi korelasi-korelasi ini? Jawabannya sama sekali tidak sederhana. Pada kenyataannya, sistem jarang sekali berkorelasi sempurna atau sama sekali tidak berkorelasi seperti dalam contoh bola kita tadi. Korelasi di dunia nyata lebih kompleks, bernuansa, dan sering kali tersembunyi di balik selubung ketidakpastian. Itulah sebabnya upaya mengukurnya membuka jalan menuju pemahaman yang lebih mendalam mengenai hakikat hubungan antarhal.

Bayangkan kita mengulangi eksperimen tersebut berkali-kali: setiap kali, kita mengirimkan satu kotak kepada Alice dan satu lagi kepada Bob; mereka kemudian membuka kotak tersebut dan mencatat apakah mereka menerima bola berwarna putih atau hitam. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.4, terdapat setidaknya dua skenario berlawanan yang mungkin terjadi, yang masing-masing bersesuaian dengan urutan bagian atas dan bagian bawah.



Gambar 1.4 Contoh urutan acak yang berkorelasi sempurna (atas) dan urutan acak yang sama sekali tidak berkorelasi (bawah).

- **Skenario pertama:** setiap kali kita memilih sepasang bola dengan warna yang sama (putih atau hitam) dan mengirimkan satu bola kepada Alice serta satu lagi kepada Bob. Keduanya melihat urutan warna yang acak, namun saat mereka membandingkan urutan tersebut, mereka mendapati bahwa keduanya identik secara sempurna—pengamatan mereka berkorelasi.
- **Skenario kedua:** kita memilih urutan acak untuk warna bola yang dikirim ke Alice dan urutan berbeda—yang juga acak—untuk warna bola yang dikirim ke Bob. Dalam kasus ini pun, Alice dan Bob melihat deretan warna yang acak. Namun, saat mereka membandingkan urutan tersebut, mereka mendapati bahwa sebagian warna sama sementara sebagian lainnya berbeda, yang menunjukkan bahwa urutan mereka sama sekali tidak berkorelasi. Kedua skenario ini mewakili kasus-kasus ekstrem: mulai dari korelasi sempurna hingga ketiadaan korelasi sama sekali. Nah, jika pada kesempatan tertentu kita mengirimkan bola dengan warna yang sama kepada Alice dan Bob, dan pada kesempatan lain mengirimkan bola dengan warna yang dipilih secara acak, maka urutan mereka hanya akan berkorelasi sebagian.

Berdasarkan pengamatan ini, algoritma matematika telah diciptakan untuk mengukur tingkat korelasi—yaitu menetapkan angka yang mengukur derajat korelasi antara urutan warna milik Alice dan Bob. Sejauh ini, kita telah memberikan gambaran mengenai makna korelasi dalam dunia klasik, namun kita belum membahas mekanika kuantum. Pertanyaannya sekarang adalah: apa perbedaan antara korelasi klasik dan korelasi kuantum?

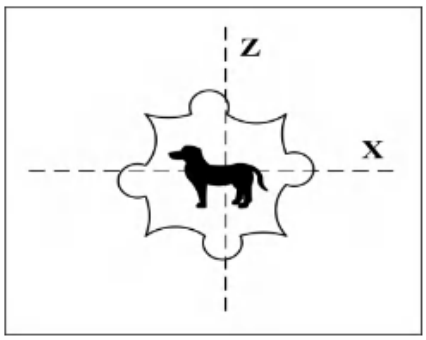
1.7 KETERIKATAN (ENTANGLEMENT) DAN REALITAS DUNIA FISIK

Korelasi kuantum menimbulkan konsekuensi yang sangat menantang intuisi kita dan sama sekali tidak dapat diterima menurut cara kita biasa memandang dunia. Contoh luar biasa dari hal ini adalah paradoks EPR yang terkenal, yang dirumuskan pada tahun 1935 oleh Albert Einstein, Boris Podolsky, dan Nathan Rosen. Einstein sendiri mengajukan "eksperimen pikiran" ini dengan tujuan menunjukkan bahwa mekanika kuantum mengarah pada kesimpulan yang tidak masuk akal sehingga harus dimodifikasi. Faktanya, paradoks EPR mempertanyakan salah satu pilar fundamental pemikiran kita: prinsip realitas. Secara sederhana, prinsip ini menyatakan bahwa realitas ada secara independen, terlepas dari apakah kita mengamatinya atau tidak.

Sebagai contoh, jika kita membuka pintu sebuah ruangan dan melihat meja, prinsip realitas meyakinkan kita bahwa meja tersebut memang sudah ada di sana, bahkan sebelum kita membuka pintu dan mengamatinya. Secara lebih formal, jika pengukuran besaran fisik suatu objek (misalnya posisi atau kecepatannya) memberikan hasil tertentu dengan kepastian, maka hasil tersebut merupakan elemen realitas fisik yang bernilai benar terlepas dari pengukuran yang kita lakukan.

Prinsip ini dianggap sebagai sesuatu yang jelas dengan sendirinya dan tak tergantikan. Namun, apa yang ditunjukkan oleh Einstein, Podolsky, dan Rosen—serta hal yang membuat eksperimen pikiran mereka begitu paradoks—adalah bahwa prinsip realitas bertentangan secara langsung dengan mekanika kuantum. Keduanya tidak dapat berdampingan. Oleh karena itu, kita dihadapkan pada pilihan radikal: apakah kita meninggalkan mekanika kuantum, atau kita mempertanyakan prinsip realitas itu sendiri—sebuah konsep yang sebelumnya tampak tak tergoyahkan dalam pemahaman kita tentang dunia. Inilah yang membuat paradoks EPR begitu memikat sekaligus mengguncang pemahaman kita.

Kita tidak dapat menguraikan rinciannya di sini, namun melalui sebuah contoh, kita dapat memperoleh gambaran mengenai paradoks ini, yang mendorong Einstein untuk menganggap mekanika kuantum sebagai teori yang tidak tepat untuk mendeskripsikan alam. Ambillah sebuah prangko dan potonglah menjadi dua bagian, baik secara vertikal maupun horizontal (Gambar 1.5). Kirimkan satu bagian kepada Alice dan bagian lainnya kepada Bob, yang berada sangat berjauhan sehingga pengamatan mereka tidak dapat saling memengaruhi. Misalkan Alice mengamati bagian miliknya terlebih dahulu.



Gambar 1.5 Potongan horizontal/vertikal sebuah prangko (atas izin Sara Felloni).

Jika ia mendapati bahwa ia memegang bagian kiri prangko tersebut, maka kita tahu dengan pasti bahwa Bob memegang bagian kanannya. Sebaliknya, jika Alice memegang bagian kanan, maka Bob akan memegang bagian kirinya. Ini adalah contoh korelasi klasik: hasil dari satu pengukuran (bagian prangko tersebut) berkorelasi sempurna dengan hasil pengukuran lainnya. Hal yang sama berlaku jika kita memotong prangko secara horizontal: jika Alice melihat bagian atas, Bob akan memegang bagian bawah, dan sebaliknya. Perlu dicatat bahwa kedua kasus tersebut (kanan/kiri atau atas/bawah) bersifat saling meniadakan.

Namun, dalam mekanika kuantum, situasinya sangat berbeda. Seolah-olah Alice, setelah menerima bagian prangkonya, dapat memilih—pada saat ia mengamatinya—apakah prangko tersebut dipotong secara horizontal atau vertikal. Ini berarti bahwa pilihannya untuk mengukur prangko tersebut menentukan apa yang akan dilihat oleh Bob, terlepas dari jarak yang memisahkan mereka. Jika Alice memutuskan untuk mengamati berdasarkan orientasi kanan/kiri, maka Bob akan melihat bagian yang berlawanan; jika ia mengukur berdasarkan orientasi atas/bawah, Bob akan melihat bagian pelengkapnya.

Situasi ini tampak sama sekali tidak masuk akal dari sudut pandang klasik, di mana kita berasumsi bahwa sebelum ada pengamatan apa pun, Alice dan Bob sudah memiliki bagian mereka masing-masing—kanan/kiri atau atas/bawah. Akan tetapi, dalam mekanika kuantum, berkat fenomena keterikatan (*entanglement*), hasil pengukuran Alice secara seketika memengaruhi hasil pengukuran Bob. Interaksi yang "seketika" inilah—yang jauh dari intuisi klasik kita—yang mengarah pada kesimpulan paradoksikal yang begitu sulit untuk diterima.

1.8 KETIDAKSAMAAN BELL: DI BATAS-BATAS REALITAS

Einstein sangat meyakini adanya alam semesta di mana realitas ada secara independen dari pengamatan kita, dan ia tidak pernah menerima karakteristik mekanika kuantum yang sangat bertentangan dengan intuisi, seperti yang disorot oleh paradoks EPR. Bagi Einstein, fisika seharusnya mendeskripsikan dunia yang objektif, bukan permainan probabilitas yang dikendalikan oleh pengamat. Pandangan ini tertuang dengan brilian dalam sebuah surat terkenal yang ia tulis kepada fisikawan Niels Bohr, yang mempertahankan interpretasi probabilistik mekanika kuantum—yang kini diterima secara luas. Einstein menulis:

> *Mekanika kuantum memang mengesankan. Namun, suara hati mengatakan kepada saya bahwa itu bukanlah hal yang sesungguhnya. Teori itu mengatakan banyak hal, tetapi tidak benar-benar membawa kita lebih dekat pada rahasia Sang Pencipta (the Old One).*

Dalam ungkapan ini, "Sang Pencipta" (*the Old One*) melambangkan alam semesta itu sendiri, yang penuh teka-teki dan tersembunyi di balik selubung penampakan probabilistik teori kuantum. Einstein memandang mekanika kuantum sebagai sesuatu yang tidak lengkap sebuah jalan yang menawarkan jawaban praktis namun tidak menyingkapkan kebenaran hakiki alam semesta. Perbedaan pandangan yang mendalam ini memicu kontroversi yang berlangsung selama beberapa dekade: di satu sisi, ada Bohr, Heisenberg, dan pendukung lain dari interpretasi ortodoks; di sisi lain, ada Einstein dan Schrödinger, yang menolak untuk melepaskan pandangan deterministik tentang dunia. Perdebatan filosofis ini, selain menjadi konfrontasi antara para raksasa sains, menandai salah satu pertarungan intelektual paling memikat dalam sejarah fisika, yang mendorong pikiran-pikiran paling cemerlang untuk menjelajahi batas-batas realitas dan mempertanyakan makna mendalam alam semesta.

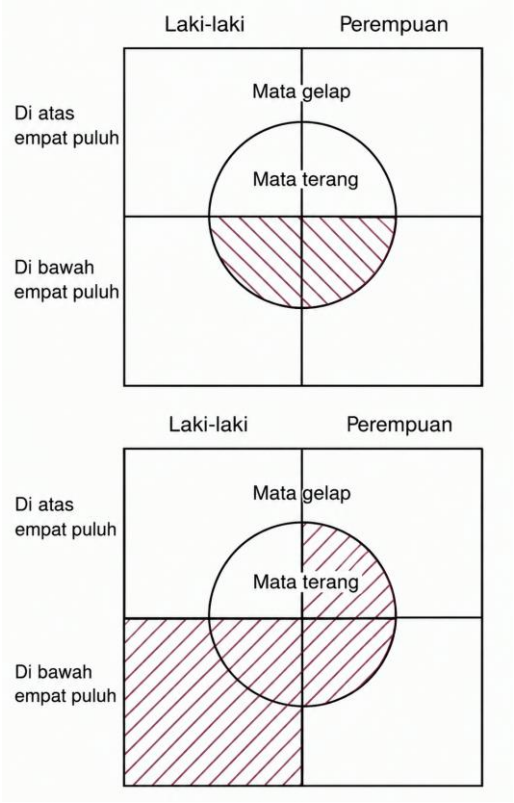
Sebuah langkah krusial diambil pada tahun 1964 oleh fisikawan Irlandia, John Bell, yang menemukan cara untuk membawa kontroversi tersebut dari ranah filosofis langsung ke laboratorium ilmiah. Bell mengusulkan sebuah eksperimen yang dapat menyelesaikan persoalan paradoks EPR dan hakikat realitas untuk selamanya. Berangkat dari asumsi bahwa prinsip realitas—gagasan bahwa realitas ada secara independen dari pengamat—itu valid, Bell mengembangkan hubungan matematis yang kini dikenal sebagai ketidaksamaan Bell.

Arti penting yang luar biasa dari ketidaksamaan ini terletak justru pada fakta bahwa hal tersebut dapat diverifikasi secara eksperimental. Dengan kata lain, dimungkinkan untuk melakukan eksperimen menggunakan sistem atom—yang mengikuti hukum-hukum mekanika

kuantum—guna melihat apakah sistem tersebut mematuhi ketidaksamaan Bell atau tidak. Jika hasil eksperimen mengonfirmasi ketidaksamaan tersebut, itu berarti sistem atom pun mematuhi prinsip realitas; akibatnya, mekanika kuantum harus direvisi dan dianggap tidak lengkap atau parsial.

Namun, jika sistem atom melanggar ketidaksamaan Bell, kesimpulannya akan sangat mengejutkan: kita harus meninggalkan prinsip realitas dan menerima kenyataan bahwa dunia mikroskopis tidak berperilaku sesuai harapan kita, serta bahwa partikel yang terjerat (*entangled*) melanggar aturan intuisi klasik kita. Sebuah hasil yang memikat sekaligus meresahkan, yang akan menentukan arah pemahaman kita tentang alam itu sendiri. Sebuah eksperimen sederhana dapat memperlihatkan cara kerja ketidaksamaan Bell. Bayangkan ada sekelompok orang yang dibagi berdasarkan tiga karakteristik: misalnya, laki-laki atau perempuan, berusia di bawah atau di atas empat puluh tahun, serta bermata terang atau gelap. Jika kita melakukan penghitungan sederhana, kita akan melihat bahwa jumlah orang—baik laki-laki maupun perempuan—yang berusia di bawah empat puluh tahun dengan mata terang (area bergaris putus-putus di bagian atas Gambar 1.6) lebih kecil atau sama dengan jumlah gabungan antara laki-laki berusia di bawah empat puluh tahun (tanpa memandang warna mata) dan perempuan bermata terang (tanpa memandang usia) (area bergaris putus-putus di bagian bawah Gambar 1.6). Faktanya, jumlah gabungan ini mencakup orang berusia di bawah empat puluh tahun dengan mata terang, ditambah laki-laki berusia di bawah empat puluh tahun dengan mata gelap dan perempuan berusia di atas empat puluh tahun dengan mata terang.

Kita dapat memastikan bahwa ketidaksamaan ini selalu berlaku untuk kelompok orang mana pun yang kita tinjau. Hal ini terjadi karena karakteristik seseorang—seperti jenis kelamin, usia, dan warna mata—merupakan elemen realitas yang keberadaannya tidak bergantung pada apakah kita mengamatinya atau tidak. Di sisi lain, dalam mekanika kuantum, kita dapat menyiapkan keadaan terjerat (*entangled states*) yang—sebagaimana diprediksi oleh teori itu sendiri—melanggar ketidaksamaan Bell. Pada tahun 1981, Alain Aspect, Philippe Grangier, dan Gérard Roger melakukan eksperimen perintis yang secara jelas menunjukkan pelanggaran tersebut. Prediksi kuantum, yang menantang apa yang disebut sebagai "prinsip realitas", terbukti benar! Dengan menggunakan keadaan terjerat dari foton—partikel dasar cahaya dan radiasi elektromagnetik—hasil eksperimen ini menandai titik balik yang sangat penting.



Gambar 1.6 Contoh ketidaksamaan Bell dalam kehidupan sehari-hari.

Menarik untuk dicatat bahwa Aspect baru dianugerahi Hadiah Nobel Fisika pada tahun 2022, lebih dari empat puluh tahun setelah penemuannya. Hal ini mungkin tampak aneh mengingat betapa pentingnya hasil tersebut, namun ini jelas bukan satu-satunya kasus pengakuan yang terlambat; sebagai contoh, fisikawan India Subrahmanyan Chandrasekhar harus menunggu lebih dari lima puluh tahun untuk menerima Hadiah Nobel atas studinya mengenai evolusi bintang, yang membuka jalan bagi perumusan konsep lubang hitam. Terkadang, pemikiran jenius begitu jauh melampaui zamannya, dan hasil yang diperoleh begitu luar biasa, sehingga membutuhkan waktu lama untuk mendapatkan pengakuan.

Selama bertahun-tahun, laboratorium-laboratorium lain di seluruh dunia telah mereplikasi dan mengonfirmasi hasil kerja Aspect beserta rekan-rekannya, yang secara konsisten menunjukkan adanya pelanggaran terhadap ketidaksamaan Bell, selaras sempurna dengan prediksi mekanika kuantum. Kumpulan bukti eksperimental ini telah mengarah pada kesimpulan yang mengejutkan: pandangan deterministik Einstein mengenai dunia telah terbantahkan. Eksperimen-eksperimen tersebut telah menyelesaikan perdebatan antara prinsip realitas dan mekanika kuantum, dengan hasil yang memenangkan mekanika kuantum. Akibatnya, kita harus meninggalkan prinsip realitas dan konsep alam semesta yang sepenuhnya deterministik, serta menerima hakikat realitas kuantum yang lebih dalam dan penuh misteri.

Dengan kata lain, kita terbiasa membayangkan adanya alam semesta yang terlepas dari diri kita—sebuah dunia yang dapat kita pelajari tanpa mengubahnya. Tentu saja, kita tahu bahwa setiap pengamatan atau pengukuran pasti memengaruhi apa yang sedang kita amati,

namun kita cenderung percaya bahwa gangguan ini dapat diminimalkan hingga ke tingkat yang bisa diabaikan. Akan tetapi, mekanika kuantum mengajarkan kita bahwa pandangan ini hanyalah ilusi. Kita tidak bisa lagi membayangkan adanya dunia objektif yang terpisah dari proses pengetahuan kita dan kebal terhadap interaksi kita. Sebaliknya, realitas itu sendiri—pada tingkat kuantum—terjalin erat dengan tindakan pengamatan. Realitas bukanlah mesin yang berjalan secara mekanis tanpa memedulikan kehadiran kita; apa yang kita peroleh dari alam bergantung pada pertanyaan yang kita ajukan dan cara kita mengamati dunia. Mekanika kuantum menyingkapkan alam semesta yang jauh lebih dinamis dan interaktif daripada yang pernah kita bayangkan.

Contoh yang memberikan gambaran jelas mengenai hal ini adalah permainan "20 Pertanyaan". Bayangkan sebuah malam bersama teman-teman; setelah makan malam, mereka memutuskan untuk bermain permainan berikut: salah satu dari mereka keluar ruangan, sementara yang lain menyepakati sebuah kata rahasia. Setelah itu, orang yang tadi keluar kembali masuk dan mulai mengajukan pertanyaan: "Apakah ini makhluk hidup?"—"Tidak". "Apakah ini ada di Bumi?"—"Ya", dan seterusnya, sambil berusaha mempersempit ruang lingkup hingga mereka menemukan kata misterius tersebut. Tantangannya adalah menebak kata itu dalam batas 20 pertanyaan; jika gagal, permainan dianggap kalah.

Kini giliran kita yang keluar ruangan. Kita menunggu di luar dalam waktu yang terasa sangat lama, sampai mereka memanggil kita untuk kembali masuk. Begitu masuk kembali, kita langsung melihat wajah teman-teman yang tersenyum penuh kejahilan, seolah-olah mereka sedang merencanakan lelucon. Meski demikian, kita memulai permainan seperti biasa dengan pertanyaan-pertanyaan kita. Awalnya, jawaban datang dengan cepat: "Ya" atau "Tidak". Namun kemudian, sesuatu yang aneh terjadi: jawaban mulai memakan waktu semakin lama, dan hal ini terasa ganjil mengingat jawabannya hanyalah "Ya" atau "Tidak" yang sederhana. Setelah beberapa pertanyaan lagi, karena merasa frustrasi dengan lambatnya proses tersebut, kita akhirnya melontarkan tebakan: "Apakah katanya 'awan'?"—"Ya," jawab orang yang kita tanya, dan tiba-tiba semua orang tertawa terbahak-bahak.

Dalam keadaan bingung, kita pun meminta penjelasan. Inilah fakta yang terungkap: saat kami berada di luar, mereka sebenarnya memutuskan untuk tidak memilih kata apa pun sejak awal! Sebelum menjawab "Ya" atau "Tidak", setiap orang harus memikirkan sebuah kata yang selaras dengan jawaban-jawaban yang telah diberikan oleh orang lain sebelumnya. Inilah sebabnya mengapa jawaban menjadi semakin lambat: setiap pertanyaan baru menambah kerumitan proses berpikir mereka. Permainan ini bukan lagi soal menemukan kata yang sudah ditentukan sebelumnya, melainkan soal "menciptakan" sebuah kata tersembunyi.

Kedua versi permainan ini dapat dianalogikan dengan pandangan fisika klasik dan fisika kuantum. Pada kasus pertama, realitas dipandang sebagai sesuatu yang objektif dan ada secara independen, terlepas dari pengamatan kita. Sama seperti kata yang telah disepakati oleh teman-teman, atom memiliki posisi dan kecepatan yang pasti, yang tinggal kita temukan saja. Namun, pada kasus kedua, kata yang tidak diketahui itu tidak ada sebelumnya; kata tersebut muncul secara bertahap seiring dengan pertanyaan demi pertanyaan, persis seperti

informasi mengenai atom yang baru terbentuk melalui pengukuran yang diputuskan oleh pengamat.

Lebih jauh lagi, jika kami mengajukan pertanyaan yang berbeda, kata akhirnya pun akan berbeda—sama persis seperti seorang peneliti yang akan memperoleh hasil berbeda jika mengubah jenis pengukurannya. Dalam pandangan kuantum ini, realitas bukanlah sekadar potret dunia, melainkan sebuah ciptaan dinamis yang sangat bergantung pada cara kita memilih untuk mengamatinya. Perbandingan antara permainan tersebut dan mekanika kuantum, meskipun tidak sempurna, menyoroti satu hal yang krusial. Mekanika kuantum memaksa kita untuk menanggalkan prinsip realitas objektif, serta mengungkapkan bahwa tindakan pengamatan itu sendirilah yang mendefinisikan apa yang kita sebut sebagai "realitas". Demikian pula dalam permainan tadi, kata "awan" tidak ditentukan sejak awal, melainkan terbentuk secara bertahap melalui pertanyaan-pertanyaan kami. Dalam kedua kasus tersebut, interaksi antara pengamat dan fenomena itulah yang membentuk dunia yang kita persepsikan: apa yang tampak itu ada karena kita memilih untuk menyelidikinya.

Namun, ada satu aspek luar biasa yang ingin kita bahas sekarang: hal yang tampak paradoks dalam mekanika kuantum—yaitu *entanglement* (keterikatan) dan korelasi kuantum—bukan sekadar misteri, melainkan sumber daya yang sangat ampuh. Kita akan melihat bagaimana fenomena-fenomena ini membuka kemungkinan baru dalam komputasi, pemrosesan, dan transmisi informasi—kemungkinan yang sama sekali tidak dapat dicapai oleh fisika klasik. Fakta bahwa eksperimen menunjukkan pelanggaran terhadap ketidaksamaan Bell (*Bell's inequalities*) berarti terdapat korelasi kuantum yang jauh lebih "kuat" dibandingkan apa yang dapat ditawarkan oleh dunia klasik. Dan karena korelasi mengukur informasi yang bisa kita peroleh mengenai suatu sistem dengan mengukur sistem lain, semakin kuat korelasinya, semakin banyak informasi yang dapat kita gali. Kemampuan yang meningkat ini dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki dan memperluas teknologi transmisi informasi serta komputasi kita, jauh melampaui batasan metode-metode klasik.

Tantangan saat ini terletak pada pengembangan dan implementasi eksperimental algoritma yang mampu memanfaatkan potensi-potensi tersebut secara penuh. Ini adalah bidang yang masih terus berkembang, sebuah ranah baru yang menantang dan terbuka luas. Kita kini menyelami kedalaman mekanika kuantum, dan dengan demikian, kita mulai mendekati cakrawala teknologi luar biasa yang ditawarkannya—mulai dari komputasi hingga komunikasi. Baru sekaranglah kita dapat benar-benar menghargai dampak revolusioner dari penemuan-penemuan ini, yang mampu mengubah secara radikal cara kita memandang realitas di sekeliling kita.

Sebelum membahas topik-topik ini lebih jauh, ada baiknya kita menyoroti hubungan mengejutkan antara permainan dan mekanika kuantum. Hal ini bukan tentang menggunakan permainan untuk menjelaskan konsep-konsep kuantum—seperti yang telah kita lakukan pada paragraf-paragraf sebelumnya—melainkan tentang membayangkan bagaimana permainan itu sendiri dapat bertransformasi jika kita sepakat untuk memainkannya mengikuti aturan mekanika kuantum, alih-alih aturan klasik yang telah kita kenal sejak kecil. Dinamika dan

strateginya akan berubah, menyingkap dunia penuh kemungkinan yang menantang ekspektasi kita.

1.9 PENGANTAR TEORI PERMAINAN KUANTUM

Teori permainan (*game theory*) adalah disiplin ilmu menarik yang mengeksplorasi model-model matematis untuk menganalisis dinamika interaksi antara dua pihak pengambil keputusan atau lebih, yang disebut sebagai "pemain". Melalui pendekatan matematis yang ketat, teori ini berupaya menjelaskan bagaimana dan mengapa perilaku serta pilihan strategis tertentu dapat mengarah pada pencapaian tujuan-tujuan spesifik. Dengan kata lain, teori permainan mengungkap strategi rasional apa yang sebaiknya diambil begitu aturan permainannya diketahui. Kemampuan untuk memodelkan keputusan dan interaksi ini menjadikan teori permainan sangat penting di berbagai sektor—termasuk ekonomi, politik, dan psikologi—karena membantu kita memahami dan memprediksi dinamika yang memengaruhi perilaku manusia serta sosial dengan lebih baik.

Pembaca mungkin bertanya-tanya apa hubungan antara mekanika kuantum dan teori permainan. Teori permainan sendiri menganalisis interaksi antara dua pemain atau lebih, di mana masing-masing pihak berupaya memaksimalkan keuntungan atau meminimalkan kerugian. Dalam konteks ini, wajar jika muncul pertanyaan: apa yang akan terjadi jika kita menerapkan prinsip superposisi dan keterikatan (*entanglement*) kuantum pada pilihan strategis para pemain? Dengan kata lain, bagaimana jika kita memperluas cakupan teori permainan ke ranah mekanika kuantum? Apakah pemain yang memanfaatkan hukum-hukum mekanika kuantum akan memiliki keunggulan dibandingkan pemain yang terbatas pada langkah-langkah klasik? Dan jika semua partisipan menggunakan strategi kuantum, mungkinkah mereka memperoleh hasil yang lebih baik? Bisakah muncul situasi baru di mana "keunggulan kuantum" tercipta? Pertanyaan-pertanyaan ini membuka wawasan baru mengenai bagaimana integrasi antara fisika kuantum dan teori permainan dapat merevolusi pemahaman kita tentang interaksi strategis dan kooperatif.

Keunggulan yang ditawarkan oleh prinsip superposisi kuantum digambarkan dengan sangat cerdas melalui contoh yang diajukan pada tahun 1999 oleh David Meyer dari Universitas San Diego. Bayangkan pesawat luar angkasa Enterprise yang terkenal dari serial TV *Star Trek* sedang menghadapi bencana yang mengancam. Q—sosok alien misterius dengan kekuatan yang hampir tak terbatas sekaligus musuh bebuyutan Kapten Picard—tiba-tiba muncul di anjungan pesawat dan menawarkan bantuan, dengan syarat Picard mampu mengalahkannya dalam sebuah tantangan. Tantangannya sederhana: Picard harus meletakkan sebuah koin dengan sisi "gambar" (atau *heads*) menghadap ke atas. Kemudian, secara bergantian, Q, Picard, dan kembali ke Q, masing-masing dapat memutuskan untuk membalik koin tersebut atau membiarkannya tetap seperti semula, tanpa pernah melihat koin itu ataupun mengetahui langkah yang diambil lawan. Q menang jika pada akhir permainan posisi koin tetap menunjukkan sisi gambar di atas; sebaliknya, Picard menang jika kondisinya berbeda.

Sekilas, tampak jelas bahwa dengan menggunakan koin yang adil (tidak bias), Kapten Picard memiliki peluang 50% untuk menang dan menyelamatkan kapal. Bahkan dengan adanya langkah tambahan, Q tidak memperoleh keuntungan apa pun jika ia tidak mengetahui apakah Picard melempar koin tersebut atau tidak. Namun, apa yang akan terjadi jika Q—berbeda dengan Picard—mampu memanfaatkan mekanika kuantum? Situasinya akan berubah drastis. Dalam skenario ini, koin tersebut berubah menjadi qubit—sebuah objek kuantum—dan Q, sebagai langkah pertamanya, menyiapkan superposisi dari keadaan "gambar" (*heads*) dan "angka" (*tails*) dengan proporsi yang sama besar.

Selanjutnya, Picard dapat memilih untuk tidak melakukan apa-apa atau melempar koin tersebut. Akan tetapi, meskipun ia memutuskan untuk melemparnya, dampaknya akan nihil: sisi gambar akan berubah menjadi angka dan sisi angka menjadi gambar, namun superposisinya tetap tidak berubah—kedua keadaan tersebut tetap ada dalam proporsi yang sama. Pada tahap ini, Q melakukan langkah terakhirnya dengan membalikkan operasi yang menciptakan superposisi tadi, sehingga mengembalikan koin ke keadaan "gambar" dengan kepastian mutlak, terlepas dari pilihan apa pun yang diambil Picard. Dengan cara ini, Q memastikan kemenangannya dan menunjukkan keunggulan kuantum dalam situasi yang, di dunia klasik, hasilnya akan tidak pasti.

Kesimpulannya, Q selalu menang tanpa perlu berbuat curang—dalam artian ia tidak perlu mengintip langkah Picard. Namun, permainan ini jelas tidak adil karena hanya Q yang memiliki akses terhadap kekuatan mekanika kuantum. Sementara Picard terbatas pada langkah-langkah klasik, Q dapat memanfaatkan strategi yang tidak dapat diakses oleh Picard, yaitu dengan menciptakan superposisi keadaan kuantum. Sebagai ilustrasi, bayangkan Picard memulai dari Kutub Utara dan hanya bisa memilih untuk tetap di sana atau pindah ke Kutub Selatan, sedangkan Q bebas bergerak di seluruh permukaan Bumi: langkah pertamanya membawanya ke khatulistiwa, dan langkah terakhir membawanya tepat ke posisi yang ia butuhkan untuk menang—kembali ke Kutub Utara. Contoh ini dengan jelas menggambarkan keunggulan pemain yang dapat menggunakan strategi kuantum dibandingkan pemain yang terbatas pada logika klasik, sekaligus menyoroti keuntungan mendasar yang ditawarkan oleh mekanika kuantum.

Contoh klasik dan lebih kompleks dari penerapan teori permainan adalah "dilema tahanan" (*prisoner's dilemma*) yang terkenal. Bayangkan polisi menangkap dua kaki tangan, Alice dan Bob, yang diduga melakukan perampokan. Bukti yang ada hanya cukup untuk menjatuhkan hukuman satu tahun penjara atas kepemilikan senjata ilegal, namun tidak cukup kuat untuk menjatuhkan hukuman 10 tahun penjara terkait perampokan tersebut. Kedua tahanan ditempatkan di sel terpisah, tidak dapat berkomunikasi, dan mengetahui persis aturan mainnya. Jika Alice memutuskan untuk bekerja sama dengan polisi sementara Bob memilih untuk tetap diam, Alice akan dibebaskan tanpa hukuman, sedangkan Bob akan dijatuhi hukuman sepuluh tahun penjara. Sebaliknya, jika keduanya memutuskan untuk bekerja sama, mereka masing-masing akan dijatuhi hukuman menengah selama tiga tahun. Terakhir, jika keduanya memilih untuk tetap diam—karena polisi tidak memiliki bukti yang cukup untuk menjerat mereka atas kasus perampokan—mereka akan menerima hukuman paling ringan:

satu tahun penjara akibat kepemilikan senjata ilegal. Dilema ini menyoroti ketegangan antara kepentingan individu dan kepentingan bersama, serta bagaimana kepercayaan (atau ketiadaannya) dapat memengaruhi perilaku strategis.

Dalam permainan ini, mengoptimalkan hasil (*payoff*) berarti meminimalkan durasi hukuman penjara. Jika para tahanan bisa bekerja sama, pilihan idealnya adalah keduanya tetap diam, sehingga mendapatkan hukuman ringan selama satu tahun. Keputusan ini mencerminkan apa yang disebut oleh para ekonom sebagai "keseimbangan Pareto" (*Pareto equilibrium*), sebuah konsep yang diperkenalkan oleh Vilfredo Pareto asal Italia dalam karyanya, *Cours d'économie politique*. Keseimbangan Pareto menggambarkan situasi di mana tidak ada seorang pun yang dapat memperbaiki kondisinya tanpa memperburuk kondisi orang lain, seperti halnya dalam sistem pasar persaingan sempurna. Dengan kata lain, ini adalah titik keseimbangan di mana semua partisipan memperoleh manfaat maksimal tanpa mengorbankan kepentingan pihak lain. Namun, dalam dilema tahanan, godaan untuk mengkhianati pihak lain membuat keseimbangan ini sulit dicapai, sehingga menciptakan ketegangan antara kepentingan pribadi dan kepentingan kolektif.

Sekarang, bayangkan Alice dan Bob tidak saling percaya dan berusaha memaksimalkan keuntungan masing-masing dengan cara non-kooperatif. Dalam konteks ini, langkah rasional mengarah pada "keseimbangan Nash" (*Nash equilibrium*), yaitu strategi di mana tidak ada pemain yang dapat meningkatkan hasil mereka dengan mengubah keputusan secara sepihak. Untuk memperoleh hasil yang lebih baik, diperlukan tindakan bersama melalui kerja sama. Namun, jika kita menempatkan diri pada posisi Alice, kita dapat melihat dilema tersebut dengan jelas. Jika Bob memutuskan untuk mengaku, pilihan terbaik bagi Alice adalah melakukan hal yang sama: jika tidak, ia akan dijatuhi hukuman sepuluh tahun penjara, bukan tiga tahun. Sebaliknya, jika Bob memilih untuk tetap diam, Alice memiliki dorongan kuat untuk mengaku, karena ia akan segera dibebaskan. Hal yang sama berlaku bagi Bob. Permainan ini sepenuhnya simetris. Oleh karena itu, keseimbangan Nash (*Nash equilibrium*) mau tak mau berujung pada keputusan keduanya untuk mengaku, yang mengakibatkan hukuman tiga tahun penjara bagi masing-masing pihak.

Akan tetapi, hasil ini kurang menguntungkan dibandingkan dengan keseimbangan Pareto (*Pareto equilibrium*), di mana keduanya tetap diam dan hanya dijatuhi hukuman satu tahun penjara. Masalahnya adalah keseimbangan Pareto mensyaratkan adanya kerja sama—suatu perilaku yang sulit dipertahankan dalam permainan yang didominasi oleh rasa saling tidak percaya. Dengan demikian, Alice dan Bob menghadapi dilema nyata: logika rasional mendorong mereka untuk mengaku, meskipun kerja sama dalam bentuk sikap diam akan lebih menguntungkan bagi keduanya. Konflik antara kepentingan individu dan kepentingan kolektif inilah yang menjadi inti dari dilema tahanan (*prisoner's dilemma*), di mana ketakutan akan pengkhianatan mendasari setiap keputusan.

John Nash, matematikawan brilian asal Amerika yang menjadi legenda berkat film *A Beautiful Mind*, merevolusi teori permainan melalui pemikirannya. Studi-studinya mengubah pemahaman kita tentang strategi dan keseimbangan pengambilan keputusan untuk selamanya; atas kontribusi luar biasa tersebut, ia dianugerahi Hadiah Nobel Ekonomi pada

tahun 1994. Nash menunjukkan bagaimana perilaku rasional individu dapat menghasilkan solusi tak terduga, membuka jalan baru di berbagai bidang yang jauh melampaui ekonomi, serta memengaruhi politik, hubungan internasional, dan bahkan biologi.

Versi kuantum dari dilema tahanan, yang diusulkan pada tahun 1999 oleh Jens Eisert, Martin Wilkens, dan Maciej Lewenstein, memperkenalkan dinamika yang benar-benar baru dibandingkan dengan permainan klasiknya. Dalam skenario ini, kedua tahanan berbagi sepasang qubit—satu qubit dipegang oleh Alice dan satu lagi oleh Bob. Sama seperti dalam permainan klasik, kedua tahanan tidak dapat berkomunikasi dengan cara apa pun. Langkah-langkah yang dapat mereka ambil kini berupa transformasi terhadap qubit mereka. Pada akhirnya, Alice dan Bob mengukur qubit mereka dan memperoleh—dengan probabilitas tertentu—hasil berupa "mengaku" (keadaan 0) atau "tidak mengaku" (keadaan 1).

Tujuannya tetap sama: mengoptimalkan hasil akhir, yakni meminimalkan masa hukuman penjara. Namun, berkat kekuatan keterkaitan (*entanglement*) dan transformasi kuantum, para pemain kini memiliki strategi baru untuk memengaruhi hasil, sehingga mampu melampaui batasan-batasan logika klasik. Versi kuantum dari dilema tahanan ini membuka skenario yang belum pernah ada sebelumnya, di mana kerja sama dan pengkhianatan berpadu dengan hukum-hukum mekanika kuantum.

Kita tidak dapat membahas secara rinci perhitungan yang diperlukan untuk mengoptimalkan permainan ini, namun kita dapat berfokus pada kesimpulan yang paling penting. Jika keadaan awal qubit memiliki tingkat keterikatan (*entanglement*) yang memadai, dan hanya satu pemain—katakanlah Alice—yang dapat menggunakan langkah kuantum, maka Alice akan memiliki keuntungan yang jelas dan memperoleh hasil (*payoff*) yang lebih baik, persis seperti peran Q dalam permainan koin. Namun, jika kedua pemain dapat memanfaatkan strategi kuantum, sesuatu yang luar biasa terjadi: di atas tingkat keterikatan tertentu, keseimbangan Nash juga menjadi keseimbangan Pareto yang optimal. Ini berarti bahwa hasil terbaik yang mungkin dicapai dalam permainan kooperatif klasik dapat diraih bahkan dalam permainan kuantum, tanpa kedua tahanan perlu berkomunikasi atau menyepakati strategi tertentu.

Dengan kata lain, mengizinkan pemain menggunakan strategi kuantum tidak hanya meningkatkan peluang mereka, tetapi juga sepenuhnya menghilangkan dilema tahanan (*prisoner's dilemma*). Mekanika kuantum tidak hanya mengubah permainan tersebut tetapi juga menyelesaikan konflik antara kepentingan pribadi dan kolektif, sehingga memungkinkan kerja sama yang sukses tanpa memerlukan rasa saling percaya atau komunikasi. Selain dua contoh yang dibahas di atas, banyak permainan kuantum lainnya—yang melibatkan dua pemain atau lebih—telah diusulkan dan terus dikembangkan.

Permainan-permainan ini tidak hanya menjadi sarana pedagogis yang menarik untuk mempertajam pemahaman kita tentang mekanisme yang berlawanan dengan intuisi (*counterintuitive*) yang mendasari mekanika kuantum, tetapi juga merupakan sumber inspirasi potensial bagi pengembangan perangkat lunak untuk komputer kuantum masa depan. Dengan demikian, teori permainan kuantum tidak hanya memperluas cakrawala teoretis kita, tetapi juga dapat memainkan peran penting dalam membentuk teknologi masa depan.

1.10 KETERATURAN DAN KOMPLEKSITAS

Sejauh ini, kita telah membahas bagaimana probabilitas merupakan elemen intrinsik dari fisika kuantum, yang sangat kontras dengan determinisme dalam fisika klasik. Namun, bagian selanjutnya ini bertujuan untuk mengingatkan pembaca bahwa determinisme tidak selalu berarti dapat diprediksi. Bahkan dalam fisika klasik, ketidakpastian dan probabilitas memainkan peran penting dan sering kali mendominasi gambaran keseluruhannya. Faktanya, pengetahuan tentang hukum-hukum deterministik tidak selalu menjamin kemampuan untuk memprediksi masa depan dengan pasti: ada situasi di mana perilaku suatu sistem tidak dapat diprediksi, meskipun hukum-hukum deterministik itu ada.

Dunia primitif dipandang sebagai kekacauan total, di mana setiap aspek kehidupan—mulai dari peristiwa manusia hingga fenomena alam—dianggap sebagai kehendak roh-roh yang berubah-ubah dan tidak dapat diprediksi. Manusia memandang alam semesta sebagai tempat yang didominasi oleh ketidakpastian, di mana kekuatan-kekuatan misterius bekerja tanpa logika yang jelas. Sebagaimana digambarkan oleh John Milton dalam *Paradise Lost* (Buku II), alam semesta adalah ranah tempat "Malam dan Kekacauan purba—leluhur Alam—melanggengkan anarki abadi di tengah hiruk-pikuk peperangan tiada akhir, dan bertahan dalam kekacauan itu sendiri".

Selanjutnya, pengamatan terhadap gerakan yang berulang dan teratur di langit berbintang, pergerakan matahari dan planet-planet, serta pergantian musim yang rutin, memunculkan gagasan tentang keteraturan dan hal-hal yang dapat diprediksi di benak manusia. Manusia tidak pernah puas hanya dengan mengamati; mereka senantiasa berupaya untuk memahami. Perkembangan gagasan-gagasan ini menuntun mereka untuk meyakini adanya alam semesta yang sepenuhnya teratur, serta kemungkinan untuk memprediksi peristiwa-peristiwa yang sebelumnya dianggap misterius atau menakutkan, seperti kemunculan komet, gerhana matahari, dan sebagainya.

Menurut Plato, sesosok makhluk ilahi mengubah kosmos dari keadaan kacau menjadi tertib serta menetapkan tatanan bentuk dan proporsi geometris. Dunia ini tertata secara matematis, dan tugas para ilmuwan adalah menemukan hukum-hukum yang mengaturnya. Dua ribu tahun kemudian, dua tokoh raksasa dalam sejarah manusia, Galileo dan Newton, memelopori revolusi besar dengan menemukan hukum-hukum yang mengatur perkembangan fenomena alam. Mereka meletakkan dasar bagi apa yang kini kita sebut sebagai "mekanika klasik", yang menjadi landasan sains modern. Hukum-hukum yang sama yang mengatur gerak benda-benda langit juga mengatur segala pergerakan di Bumi. Hukum-hukum ini bersifat deterministik: masa depan setiap fenomena yang terjadi di sekitar kita ditentukan secara pasti oleh keadaan saat ini. Dalam sistem ini, tidak ada ruang bagi peristiwa acak atau sembarang; segala sesuatu tunduk pada tatanan yang presisi dan dapat diprediksi.

Menyusul penemuan-penemuan besar Galileo dan Newton, gagasan Zaman Pencerahan perlahan menguat bahwa manusia—setidaknya secara prinsip—mampu memprediksi dan bahkan mengendalikan jalannya peristiwa di masa depan. "Berikan kepadaku keadaan alam semesta, dan aku akan memprediksi masa depannya," demikian pernyataan Laplace, yang merangkum keyakinan teguh pada masa itu akan kemampuan

manusia. Ungkapan ini mencerminkan semangat dan antusiasme zaman tersebut, yang ditandai dengan kejayaan mekanika, penemuan mesin kalor, dan Revolusi Industri. Optimisme Zaman Pencerahan, yang berlandaskan determinisme, memperkuat keyakinan bahwa manusia dapat memprediksi perkembangan peristiwa dengan tingkat ketepatan yang semakin tinggi. Pemikiran ini semakin mengukuh pada abad kesembilan belas, berkat pencapaian ilmiah luar biasa seperti penemuan gelombang elektromagnetik. Dalam pandangan dunia ini, alam semesta dibayangkan sebagai sebuah mesin raksasa, di mana setiap bagiannya bergerak dengan cara yang telah ditentukan dan dapat diprediksi. Sebagaimana ditegaskan oleh Laplace, "bagi kecerdasan yang cukup tinggi, tidak ada satu pun hal yang tidak pasti, dan masa depan—sama halnya dengan masa lalu—akan tampak jelas di hadapan pandangannya."

Memasuki abad kedua puluh, sejumlah penemuan besar mulai membayangi gambaran optimis yang telah mendominasi selama lebih dari tiga abad, sekaligus meruntuhkan ilusi mengenai pengetahuan yang sempurna dan deterministik tentang alam semesta. Tentu saja, yang kita maksud di sini adalah penemuan mekanika kuantum serta konsep kekacauan deterministik (*deterministic chaos*). Kedua teori tersebut telah menggoyahkan kepastian yang telah terbangun sejak Zaman Pencerahan, memaksa kita untuk meninggalkan gagasan ideal Laplace tentang alam semesta yang dapat diprediksi secara sempurna dan diatur oleh skema yang tak tergoyahkan. Faktanya, mekanika kuantum dan kekacauan deterministik menghadirkan unsur ketidakpastian dan probabilitas ke dalam pemahaman kita tentang realitas, sehingga membatasi kemungkinan untuk mengetahui masa depan dunia di sekitar kita dengan presisi mutlak.

Sebagaimana sering terjadi dalam sejarah manusia, menyadari keterbatasan diri menjadi peluang untuk melakukan lompatan besar ke depan. Dalam hal ini, batasan-batasan yang membatasi pengetahuan manusia—hingga pada ketidakmungkinan mutlak untuk memprediksi masa depan—telah menabur benih bagi kemajuan ilmiah besar yang baru, yang kini sedang berkembang pesat. "Peradaban teknologi" baru ini tidak lagi didasarkan pada kepastian, determinisme, dan keteraturan, melainkan mampu merangkul dan memanfaatkan konsep-konsep seperti kekacauan deterministik (*deterministic chaos*), probabilitas, dan keterikatan kuantum (*quantum entanglement*). Jauh dari sekadar terkekang oleh keterbatasan masa lalu, evolusi ini membawa kita menuju pemahaman yang lebih kaya dan bernuansa tentang dunia, di mana ketidakpastian menjadi sarana kemajuan, bukan lagi sebuah hambatan.

Kekacauan deterministik (*Deterministic chaos*)

Determinisme adalah ilusi ciptaan Laplace. Kekacauan deterministik menawarkan peluang bagi kita untuk mengatasi prasangka yang telah mengakar kuat. Pembaca mungkin merasa bingung dengan kontradiksi yang tampak dalam istilah "kekacauan deterministik", yang sekilas terlihat seperti sebuah oksimoron. Secara alami, kita cenderung berpikir bahwa suatu fenomena itu pasti bersifat deterministik atau acak: tidak mungkin keduanya sekaligus. Namun, kontradiksi semu ini muncul akibat hambatan kognitif yang terbentuk selama berabad-abad, di mana kita memandang determinisme dan kekacauan sebagai konsep yang saling bertentangan.

Dalam bahasa sehari-hari, kekacauan memang sering dikaitkan dengan peristiwa yang tidak teratur dan tak terkendali, yang seolah berjalan tanpa logika atau aturan yang jelas: seperti kejatuhan pasar saham, revolusi, atau wabah penyakit. Hal ini merupakan antitesis dari apa yang kita harapkan dari sains—yaitu sebuah sarana untuk menghadirkan keteraturan dan memprediksi perkembangan fenomena alam, ekonomi, atau sosial. Padahal, justru dalam gagasan determinismelah terkandung dasar ilmiah untuk memprediksi masa depan: sebuah sistem dikatakan deterministik jika masa depannya ditentukan secara unik oleh keadaan saat ini. Namun, ada satu aspek krusial yang sering kita abaikan: fakta bahwa suatu sistem bersifat deterministik tidak serta-merta berarti kita mampu memprediksi perilakunya. Faktanya, dalam beberapa dekade terakhir, ditemukan bahwa hukum-hukum deterministik yang relatif sederhana dapat menghasilkan perilaku yang begitu kompleks hingga sama sekali tidak dapat diprediksi, bahkan sampai pada titik di mana perilaku tersebut tidak dapat dibedakan dari keacakan murni.

Dengan kata lain, meskipun menurut fisika klasik masa depan itu sudah ditentukan, kita tidak selalu bisa mengetahuinya. Hal ini mungkin tampak hampir mengejutkan, namun kita bahkan tidak tahu pasti apakah tata surya kita stabil, atau apakah suatu hari nanti Bumi akan jatuh ke Matahari atau terlempar ke luar angkasa. Meskipun kita dapat memprediksi orbit satelit dengan tingkat pendekatan tertentu dan melacak posisinya dari waktu ke waktu berkat komputer modern, kita tidak mampu memperoleh solusi eksak untuk persamaan yang menggambarkan lintasannya. Batasan ini—yang melekat pada sifat umum sistem deterministik—mengingatkan kita bahwa ketidakpastian bukan hanya milik dunia kuantum, tetapi juga hadir dalam dinamika fisika klasik yang lebih akrab bagi kita.

Namun, begitu kita menyadari batasan yang kuat ini—bahwa perilaku sebagian besar sistem deterministik pada kenyataannya begitu kompleks hingga tampak benar-benar kacau dan karenanya mustahil kita prediksi—apa sebenarnya kegunaan mempelajari kekacauan deterministik (*deterministic chaos*), dan implikasi konkret apa yang dimilikinya? Jawabannya terletak pada kenyataan bahwa, jika kita cermati, kita sebenarnya tidak tertarik untuk mengetahui masa depan dengan presisi mutlak. Yang kita butuhkan adalah kemampuan membuat prediksi yang andal mengenai besaran-besaran yang dapat kita ukur, serta nilai-nilai rata-rata yang memengaruhi keputusan kita.

Ambil contoh kasus epidemi. Kita tidak benar-benar tertarik untuk mengetahui jumlah persis orang yang akan tertular penyakit pada waktu dan hari tertentu di minggu depan. Data semacam itu, selain tidak dapat diprediksi, mungkin bahkan tidak dapat diukur dengan presisi. Hal yang sangat perlu kita ketahui adalah apakah jumlah orang yang terinfeksi sedang meningkat, apakah epidemi telah mencapai fase fluktuatif (osilasi), atau apakah jumlahnya sedang menurun menuju hilangnya penularan tersebut. Demikian pula, kita tidak tertarik mengetahui posisi dan kecepatan setiap molekul udara; yang ingin kita ketahui adalah besaran-besaran seperti suhu, kelembapan, tekanan, atau kekuatan angin.

Singkatnya, studi tentang kekacauan deterministik memberi kita sarana untuk memahami dan memprediksi evolusi sistem yang kompleks—bukan dalam rincian yang sangat mendetail, melainkan dalam tren umum dan dinamika rata-ratanya. Jenis informasi inilah yang

memungkinkan kita mengambil keputusan praktis dan mengelola situasi yang tampak tidak dapat diprediksi dengan tingkat kendali yang memadai. Oleh karena itu, merupakan suatu keberuntungan bahwa—sebagaimana telah ditemukan—sebagian besar fenomena mengikuti hukum-hukum kekacauan deterministik (*deterministic chaos*), sementara sistem yang tertata sempurna (yang solusinya dapat kita hitung secara eksak) justru merupakan pengecualian yang langka. Faktanya, sistem yang tertata justru tidak stabil secara struktural: gangguan kecil saja sudah cukup untuk membuatnya menyimpang drastis dari perilaku awalnya—ibarat batu yang diseimbangkan di puncak gunung, yang dengan sedikit saja gerakan akan jatuh ke kondisi yang sama sekali berbeda. Sebaliknya, sistem yang kacau justru stabil secara struktural: meskipun diganggu, sistem tersebut tetap mempertahankan sifat kekacauannya serta menjaga koherensi tertentu di tengah ketidakteraturan tersebut.

Justru stabilitas dalam kekacauan inilah yang memungkinkan kita membuat prediksi dan memahami parameter mana yang perlu diintervensi untuk memengaruhi perkembangan suatu fenomena. Dalam kasus epidemi yang telah disebutkan sebelumnya, kita memang tidak akan pernah bisa menghitung jumlah pasti orang yang terinfeksi pada saat tertentu, namun kita dapat mengembangkan metode untuk mengidentifikasi parameter kritis, batasan, serta kondisi yang menentukan apakah epidemi tersebut akan meluas atau justru mereda hingga hilang. Dengan cara ini, kita dapat menentukan langkah-langkah paling efektif untuk membendung atau mengatasi epidemi tersebut. Seandainya sistem di sekitar kita—baik sistem alam maupun sistem ekonomi dan sosial—bersifat tertata sempurna, hal itu justru akan menjadi bencana besar. Kita tidak akan bisa membuat prediksi yang andal, dan setiap perubahan kecil pada parameter akan berujung pada konsekuensi yang sangat berbeda, sehingga mustahil untuk mengendalikan berbagai peristiwa. Di dunia yang begitu kaku, kemampuan kita untuk mengelola dan memahami realitas akan sangat terbatas.

Studi mengenai kekacauan deterministik dalam ranah fisika klasik bermula dari kesadaran akan adanya batasan mendasar: ketidakmungkinan untuk memprediksi masa depan secara presisi. Salah satu ilmuwan terbesar dalam sejarah, James Clerk Maxwell—sang pelopor teori elektromagnetisme—dengan intuisi yang luar biasa telah menuliskan hal ini sejak paruh kedua abad ke-19: "Logika sejati dunia ini adalah kalkulus probabilitas." Yang mengejutkan, ia merujuk pada dunia mekanika klasik. Mekanika kuantum tidak hanya mengonfirmasi dan memperkuat konsep tersebut, tetapi juga menghadirkan batasan yang jauh lebih dalam dan tak terduga, dengan konsekuensi yang bahkan tidak dapat dibayangkan oleh para perintisnya sendiri. Batasan-batasan baru ini telah menyingkap semesta yang jauh lebih kompleks dan penuh ketidakpastian, sekaligus menguji kemampuan kita dalam memahami dan memprediksi realitas.

1Dalam Sistem Satuan Internasional, konstanta Planck memiliki nilai sebesar $6{,}62606957 \times 10^{-34}$ Joule · detik. Untuk tujuan ini, mereka memperkenalkan perangkat matematis yang disebut fungsi gelombang; fungsi ini tidak memberi tahu kita secara persis di mana letak suatu partikel (misalnya elektron), namun memungkinkan kita menghitung probabilitas ditemukannya partikel tersebut di lokasi tertentu. Untuk mengukur tingkat korelasi antara urutan warna Alice dan Bob, kita dapat melakukan langkah-langkah berikut.

Mulailah dari angka nol, lalu tambahkan satu unit setiap kali Alice dan Bob melihat warna yang sama, dan kurangi satu unit ketika kedua warna tersebut berbeda. Pada skenario pertama—korelasi sempurna, di mana warna bola Alice dan Bob selalu sama—kita akan memperoleh angka yang besarnya sama dengan panjang urutan tersebut. Pada skenario kedua, di mana warna-warna tersebut sama sekali tidak berkorelasi, kita terkadang akan menambah satu unit dan terkadang menguranginya, sehingga nilainya tetap berada di dekat titik awal (nol). Nilai antara yang diperoleh dari kedua kasus ideal tersebut—korelasi sempurna dan ketiadaan korelasi sama sekali—menunjukkan serta mengukur adanya korelasi parsial (sebagian).

Lebih tepatnya, pernyataan bahwa kita tidak dapat memprediksi masa depan berarti kita tidak dapat menemukan algoritma yang mampu memprediksi masa depan hingga waktu t dengan panjang algoritma yang bertambah lebih lambat daripada t. Jelaslah, jika panjang algoritma tersebut bertambah dengan laju yang sama dengan t, hal itu bukanlah sebuah solusi—yakni, bukan sebuah prediksi masa depan—karena itu sama saja dengan mengamati sistem dan menunggu hingga waktu t agar masa depan tersebut terwujud.

BAB 2
LOGIKA DAN KEKUATAN KOMPUTASI KUANTUM

2.1 LOGIKA KUANTUM

Isidor Isaac Rabi, peraih Hadiah Nobel Fisika, pernah berkata bahwa "sains adalah petualangan seluruh umat manusia untuk belajar menjalani hidup dan, mungkin, mencintai alam semesta tempat mereka berada." Dalam petualangan ini, sosok-sosok luar biasa muncul dari masa ke masa—para perintis yang mendorong umat manusia melampaui batas-batas pengetahuan yang ada, serta mengantisipasi perkembangan yang baru akan terwujud bertahun-tahun kemudian. Di antara tokoh-tokoh besar ini terdapat Richard Feynman, salah satu fisikawan paling brilian abad ke-20, yang pada tahun 1981 mengemukakan gagasan revolusioner: pembangunan komputer kuantum.

Intuisinya sederhana namun berani: sistem kuantum berperilaku dengan cara yang sangat kompleks, jadi mengapa kita mencoba mensimulasikannya menggunakan komputer klasik yang mengikuti logika yang sama sekali berbeda? Bukankah lebih masuk akal untuk menggunakan mesin yang mematuhi aturan yang sama dengan sistem yang hendak disimulasikannya? Jawabannya tentu saja komputer kuantum. Pada masa itu, sebagian besar fisikawan menganggap gagasan tersebut tak lebih dari sekadar permainan intelektual atau impian yang tidak realistis. (Salah satu penulis buku ini masih ingat senyum yang tersungging di antara para ahli dalam sebuah konferensi internasional pada tahun 1980-an, ketika seseorang berani menyinggung gagasan Feynman tersebut.) Kini, apa yang dulunya tampak seperti fiksi ilmiah murni telah menjadi salah satu tantangan ilmiah dan teknologi terbesar di zaman kita.

Membuat prediksi tentang masa depan selalu berisiko: hasilnya bisa jadi meleset jauh dari kenyataan. Salah satu prediksi paling keliru dalam sejarah dikaitkan dengan Thomas Watson, presiden IBM, yang pada tahun 1943 konon menyatakan bahwa dunia tidak akan membutuhkan lebih dari lima komputer. Padahal, kita tidak sedang membicarakan sosok visioner sembarangan, melainkan pemimpin perusahaan teknologi terbesar pada masa itu. Namun, kenyataan kerap membantah pandangan para ahli sekalipun. Pada tahun 1977, Ken Olsen, pendiri *Digital Equipment Corporation*, menyatakan bahwa ia tidak bisa membayangkan alasan seseorang menginginkan komputer di rumah mereka. Kini, masa depan yang dulu dianggap mustahil itu telah menjadi kenyataan kita saat ini: terdapat lebih dari satu miliar komputer di dunia, belum termasuk komputer yang terintegrasi dalam benda-benda sehari-hari seperti ponsel, jam tangan, dan mobil. Prediksi—betapapun matangnya rumusan para ahli—jarang mampu mengimbangi kecepatan luar biasa teknologi dalam mengubah dunia kita.

Kita sedang berada di ambang lompatan teknologi konseptual baru di bidang komputer dan potensi penggunaannya di masa depan: kehadiran komputer kuantum. Pada paragraf-paragraf berikutnya, kita akan mengupas cara kerjanya. Sekilas, kita mungkin tergoda untuk berpikir bahwa komputer-komputer ini terlalu rumit untuk masuk ke rumah kita di masa depan. Namun, berkaca pada pengalaman kita dengan komputer klasik, kita lebih memilih

untuk menghindari prediksi yang terburu-buru: sejarah pernah mengejutkan kita sebelumnya, dan hal itu bisa saja terulang kembali.

Namun, apa sebenarnya komputer kuantum itu? Logika apa yang mendasari mesin luar biasa ini? Dan mengapa ia memiliki potensi untuk jauh lebih efisien dibandingkan komputer klasik? Prinsip dasarnya tetap sama: sebuah komputer—baik klasik maupun kuantum—menerima informasi sebagai masukan dan memprosesnya untuk menghasilkan keluaran (*output*) melalui suatu algoritma. Baik itu untuk memecahkan persamaan matematika yang rumit, merancang material dan obat-obatan baru, mengoptimalkan proses industri, memprediksi cuaca, atau sekadar menjelajahi internet maupun bermain gim video, inti dari proses tersebut senantiasa berupa pengolahan informasi. Akan tetapi, komputer kuantum menjanjikan kemampuan untuk melakukan semua hal ini dengan cara-cara yang saat ini tampak seperti fiksi ilmiah.

Sejak zaman dahulu, manusia telah berupaya menyederhanakan perhitungan dengan bantuan mesin. Salah satu alat paling awal yang kita kenal adalah sempoa, yang diperkenalkan di Tiongkok sekitar dua ribu tahun sebelum Masehi. Namun, cikal bakal sesungguhnya dari komputer modern muncul pada abad ke-19, berkat kecerdasan matematikawan Inggris, Charles Babbage. Proyeknya—sebuah komputer yang dapat diprogram—meletakkan dasar bagi komputasi modern. Ia bekerja sama dengan Ada Lovelace, putri penyair ternama Lord Byron, yang kini dikenang sebagai pemrogram komputer pertama. Menarik untuk dicatat bahwa pada tahun 1878, *British Association for the Advancement of Science*—yang kala itu merupakan salah satu lembaga paling bergengsi di kalangan komunitas ilmiah—merekomendasikan kepada pemerintah Inggris untuk tidak mendanai mesin ciptaan Babbage, karena menganggapnya "tidak layak didukung". Sebuah kesalahan penilaian yang, jika ditinjau dari perkembangan teknologi di kemudian hari, kini tampak hampir ironis.

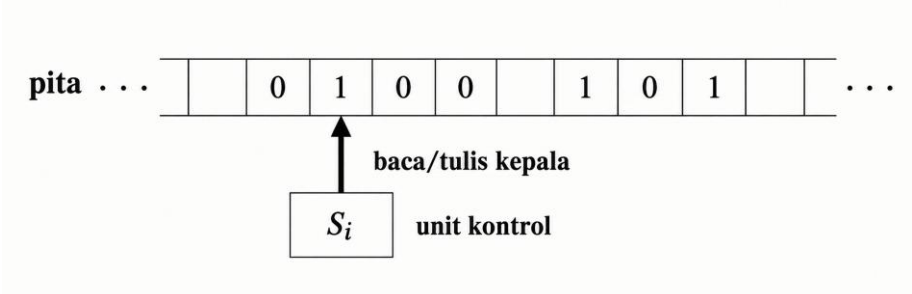
Cara kerja komputer modern, betapapun rumitnya kelihatannya, sebenarnya memiliki prinsip dasar yang sangat sederhana. Intinya terletak pada sistem bilangan biner, yang diformalkan oleh matematikawan dan filsuf Jerman, Gottfried Wilhelm Leibniz. Dalam sistem ini, satuan informasi dasarnya adalah *bit*, yang hanya dapat memiliki dua keadaan: 0 atau 1. Komputer klasik adalah alat yang menerima informasi dalam bentuk biner, memprosesnya, dan selalu memberikan hasil akhirnya dalam bentuk biner juga. Kita bisa membayangkan bagian dalam komputer sebagai jaringan kabel dan gerbang logika. Setiap kabel membawa satu *bit* (bernilai 0 atau 1), sementara gerbang logika melakukan operasi matematika atau pengambilan keputusan terhadap *bit-bit* tersebut, mengubahnya, dan menghasilkan keluaran baru. Bahasa biner ini sangat cocok untuk mesin elektronik: untuk merepresentasikan angka apa pun, kita hanya memerlukan rangkaian angka 0 dan 1. Sebagai contoh, angka 0 bisa menandakan adanya aliran listrik pada kabel, sedangkan angka 1 menandakan tidak adanya aliran listrik. Berkat kesederhanaan inilah, komputer mampu memproses informasi dalam jumlah sangat besar dengan kecepatan yang luar biasa.

2.2 KONSEP DASAR DAN ELEMEN MESIN TURING

Kata "algoritma" berasal dari nama matematikawan dan astronom Persia, Al-Khwarizmi, dan merujuk pada suatu prosedur (urutan instruksi yang terbatas) untuk memecahkan masalah tertentu. Konsep ini, yang merupakan dasar bagi ilmu komputer, memperoleh rumusan matematis yang presisi berkat mesin Turing, yang diperkenalkan pada tahun 1936 oleh matematikawan Inggris yang brilian, Alan Turing.

Mesin Turing merupakan model teoretis yang mencakup elemen-elemen esensial dari setiap komputer modern: memori untuk menyimpan data, unit kendali yang mengarahkan operasi, serta unit baca/tulis untuk memanipulasi informasi. Konsep yang sederhana namun ampuh ini meletakkan dasar bagi pemahaman mengenai kemampuan komputer, yang pada akhirnya memungkinkan terciptanya seluruh dunia digital yang kita kenal saat ini.

Elemen-elemen dasar mesin Turing digambarkan dalam Gambar 2.1 dan menyajikan gambaran sederhana namun kuat mengenai cara kerja mesin teoretis ini. Gagasan dasarnya adalah bahwa mesin tersebut melakukan perhitungan dengan cara yang mirip dengan "komputer manusia". Bayangkan seseorang yang, meskipun hanya mampu menyimpan informasi dalam jumlah terbatas di otaknya, memiliki akses ke sejumlah kertas untuk mencatat dan melihat kembali data selama operasi pembacaan dan penulisan. Demikian pula, mesin Turing terdiri dari tiga elemen dasar yang bekerja secara harmonis untuk melakukan perhitungan:



Gambar 2.1 Gambar skematis mesin Turing, yang memperlihatkan pita, kepala baca/tulis, dan unit kendali.

(1) Pita: merepresentasikan "kertas" bagi mesin Turing, yaitu pita ideal yang membentang tanpa batas dan terbagi menjadi sel-sel. Setiap sel dapat memuat satu karakter dari suatu alfabet (misalnya, dalam alfabet biner, 0 atau 1) atau dibiarkan kosong. Kecuali untuk sejumlah sel terbatas yang memuat data, bagian pita lainnya kosong.

(2) Unit kendali: "otak" mesin, yang dapat berada dalam salah satu dari sejumlah status terbatas. Salah satu status ini adalah status berhenti (*halt state*) khusus (H). Ketika unit kendali memasuki status H, perhitungan berakhir. Sebelum itu, unit kendali mengawasi proses tersebut, menentukan tindakan yang harus diambil berdasarkan instruksi dan informasi yang diterimanya dari pita.

(3) Kepala baca/tulis: pada setiap saat, kepala ini menunjuk ke satu sel tertentu pada pita. Awalnya, data masalah yang akan diselesaikan dikodekan pada pita. Perhitungan

kemudian berlangsung secara siklis sebagai berikut: bergantung pada status internal *si* dari unit kendali dan isi sel yang berada di bawah kepala tersebut, mesin dapat membaca, menulis, atau menghapus simbol di dalam sel itu. Setelah melakukan operasi, kepala bergerak satu posisi ke kanan atau ke kiri pada pita, atau perhitungan berakhir jika unit kendali telah mencapai status berhenti (H).

Ketiga elemen ini bersama-sama membentuk sistem yang sangat serbaguna dan mampu melakukan berbagai macam perhitungan, menjadikan mesin Turing salah satu landasan teoretis paling berpengaruh bagi ilmu komputer modern. Operasi mesin Turing dipandu oleh sekumpulan aturan terbatas; setiap aturan menentukan tindakan apa yang harus dilakukan mesin berdasarkan status internal unit kendali dan karakter yang dibaca kepala mesin dari pita. Dalam praktiknya, untuk suatu status awal tertentu, aturan-aturan tersebut menetapkan tindakan apa yang harus dilakukan kepala mesin (membaca, menulis, menghapus, atau bergerak) dan status baru apa yang harus ditempati unit kendali setelah setiap operasi.

Mekanisme instruksi inilah yang memungkinkan mesin melakukan perhitungan, memecahkan masalah, dan pada akhirnya menyimulasikan proses komputasi apa pun yang mengikuti aturan-aturan yang telah ditetapkan. Meskipun strukturnya sederhana dan minimalis, mesin Turing memiliki kemampuan yang luar biasa: mesin ini mampu menangani dan memecahkan masalah dengan tingkat kerumitan yang sangat tinggi. Yang mengejutkan, mesin ini dapat melakukan operasi apa pun yang dapat dijalankan oleh komputer modern. Lebih tepatnya, jika suatu masalah memiliki solusi algoritmik, mesin Turing dapat menyelesaikannya melalui komputasi. Dengan kata lain, proses komputasi apa pun, terlepas dari tingkat kerumitannya, dapat dilakukan oleh mesin Turing.

Karya Alan Turing terbentuk di tengah perdebatan hangat yang mendominasi era tersebut, yang berpusat pada satu pertanyaan krusial: untuk jenis masalah apa sajakah algoritma penyelesaian dapat ditemukan? Pada tahun 1928, matematikawan David Hilbert dan Wilhelm Ackermann merumuskan pertanyaan yang dikenal sebagai *Entscheidungsproblem* (masalah keputusan), yang mempertanyakan apakah ada algoritma yang mampu menentukan—untuk setiap pernyataan matematika—apakah pernyataan tersebut benar atau salah, sehingga menghasilkan jawaban yang jelas berupa "ya" atau "tidak".

Hilbert keliru meyakini bahwa jawaban atas pertanyaan ini adalah positif, dan ia berharap akan adanya solusi universal bagi penalaran matematika. Namun, pada tahun 1931, matematikawan sekaligus filsuf asal Austria, Kurt Gödel, mematahkan gagasan tersebut melalui teorema ketidaklengkapan (*incompleteness theorem*) yang termasyhur. Gödel membuktikan bahwa dalam sistem logika apa pun yang "cukup kuat" untuk memformalkan aritmetika, terdapat proposisi yang tak dapat diputuskan (*undecidable*), yaitu proposisi yang kebenaran atau kesalahannya tidak dapat dibuktikan di dalam sistem itu sendiri. Kontradiksi logika dalam sistem formal dapat dipahami melalui contoh sederhana yang disebut paradoks. Salah satu yang paling terkenal adalah kalimat: "Kalimat ini salah". Struktur tata bahasanya sepenuhnya benar, namun kita tidak dapat menjawab pertanyaan: "Apakah pernyataan itu benar atau salah?" Jika pernyataan itu benar, maka itu berarti pernyataan tersebut salah; namun jika pernyataan itu salah, maka seharusnya pernyataan itu benar, sehingga

memunculkan siklus kontradiksi tanpa akhir. Contoh lainnya adalah paradoks Buridan, yang dicetuskan oleh filsuf Prancis Jean Buridan pada abad ke-14.

Bayangkan dua pernyataan: Socrates berkata, "Plato berbohong," dan Plato menegaskan, "Socrates berkata jujur." Jika dipandang secara terpisah, masing-masing pernyataan bebas dari masalah logika, namun jika digabungkan, keduanya mengarah pada paradoks. Jika kita berasumsi bahwa Socrates berkata jujur, maka Plato berbohong, yang berarti Socrates sebenarnya sedang berbohong—hal ini bertentangan dengan asumsi awal. Sebaliknya, jika kita memulai dengan gagasan bahwa Socrates berbohong, maka Plato seharusnya berkata jujur; namun hal ini berarti Socrates berkata jujur, yang membawa kita kembali pada sebuah kontradiksi. Contoh-contoh ini menggambarkan bagaimana beberapa proposisi—meskipun disusun dengan cara yang sepenuhnya logis—tidak dapat diselesaikan secara pasti, sehingga menyingkap batasan intrinsik logika.

Teorema Gödel menyiratkan bahwa tidak semua pernyataan matematika dapat diselesaikan dengan algoritma, dan hal ini memicu pemikiran Turing mengenai apa yang sebenarnya dapat dilakukan oleh komputer. Teorema Gödel juga membatasi kemampuan mesin Turing, dan dengan demikian membatasi kemampuan komputer mana pun, baik klasik maupun kuantum. Terdapat masalah-masalah yang tidak dapat diputuskan (*undecidable*), yaitu masalah yang tidak dapat diselesaikan oleh algoritma apa pun—dan batasan ini berlaku sama bagi komputer klasik maupun kuantum. Dengan kata lain, komputer kuantum tidak dapat menyelesaikan masalah yang pada dasarnya memang tidak dapat diselesaikan oleh komputer klasik. Akan tetapi, komputer kuantum menawarkan keunggulan yang signifikan: komputer ini mampu menyelesaikan beberapa masalah jauh lebih cepat dibandingkan komputer klasik, dengan penggunaan sumber daya yang lebih sedikit dalam hal memori, waktu komputasi, dan energi.

2.3 RAHASIA PARALELISME KUANTUM

Kilatannya mengikuti setiap percikan; dan jumlahnya begitu banyak hingga melampaui hasil penggandaan jumlah petak papan catur. Sebagaimana telah dijelaskan pada bab pertama, bit klasik hanya dapat berada dalam dua keadaan, yaitu 0 dan 1, namun tidak pernah bisa berada dalam kedua keadaan tersebut secara bersamaan: bit tersebut berada dalam keadaan 0 *atau* keadaan 1. Berbeda dengan bit klasik yang hanya berkorespondensi dengan Kutub Utara (0) atau Kutub Selatan (1), bit kuantum (atau *qubit*) justru dapat berada dalam superposisi keadaan 0 dan 1; keadaan ini dapat kita visualisasikan sebagai titik mana pun pada permukaan bola dunia. Sifat luar biasa *qubit* inilah yang menjadi dasar bagi paralelisme kuantum, yang menjadi sumber potensi besar komputasi kuantum. Namun, apa sebenarnya arti hal ini? Konsep komputasi paralel sudah ada dalam komputer klasik; dalam sistem ini, untuk mempercepat penyelesaian masalah yang kompleks, beban kerja dibagi ke beberapa prosesor. Sejumlah prosesor bekerja secara paralel untuk memperoleh hasil dalam waktu yang lebih singkat. Untuk mengilustrasikan konsep paralelisme kuantum, mari kita ambil contoh masalah *traveling salesman* (pedagang keliling) yang terkenal: seorang pedagang harus mengunjungi sejumlah klien—masing-masing di kota yang berbeda—lalu kembali ke tempat asalnya.

Tujuannya adalah mengunjungi semua klien dengan urutan yang meminimalkan total jarak tempuh. Hal ini berarti ia harus mempertimbangkan setiap kemungkinan urutan kunjungan dan menghitung jalur mana yang paling pendek. Bayangkan pedagang tersebut memulai perjalanan dari Milan dan harus mengunjungi kota-kota lain di Italia—yaitu Piacenza, Genoa, Parma, Cremona, Mantua, dan Bergamo—sebelum kembali ke Milan. Salah satu kemungkinannya adalah mengikuti urutan yang baru saja disebutkan, namun ia juga bisa pergi ke Bergamo terlebih dahulu, lalu ke Mantua, kemudian Cremona, dan seterusnya. Dengan enam kota yang harus dikunjungi, terdapat 720 kemungkinan rute. Jika jumlah kotanya ada 10, kombinasi rute yang mungkin akan melebihi satu juta.

Dengan 15 kota, jumlah kemungkinan rute akan mencapai lebih dari satu triliun! Setiap rute mewakili sebuah masukan (*input*) yang mengharuskan kita menghitung total jarak tempuhnya. Jika kita menugaskan setiap perhitungan tersebut kepada prosesor yang berbeda, maka kita akan mendapatkan suatu bentuk komputasi paralel. Namun, di sini muncul sebuah masalah: kita tidak bisa memiliki satu triliun prosesor. Oleh karena itu, komputer klasik dibatasi oleh sumber daya fisik yang tersedia. Sebaliknya, dalam komputasi kuantum, berkat superposisi keadaan, qubit dapat secara bersamaan menjelajahi berbagai jalur dalam ruang kemungkinan; hal ini memungkinkan bentuk paralelisme yang jauh lebih hebat dan membuka perspektif baru untuk memecahkan masalah yang kompleks.

Pada dasarnya, mekanika kuantum menambahkan dimensi yang sangat istimewa pada konsep komputasi paralel yang tidak dapat direplikasi dalam komputer klasik. Untuk memahaminya, mari kita mulai dengan contoh sederhana: bayangkan kita memiliki satu bit klasik yang hanya bisa digunakan untuk melakukan operasi sederhana. Sebagai contoh, jika bit tersebut direpresentasikan oleh sebuah koin—di mana sisi angka dan gambar melambangkan keadaan 0 dan 1—operasi yang bisa kita lakukan adalah membalik koin tersebut; artinya, jika kita mulai dengan sisi angka sebagai input, kita mendapatkan sisi gambar sebagai output, dan sebaliknya, memulai dengan sisi gambar akan menghasilkan sisi angka. Namun, kita tidak dapat melakukan perhitungan (membalik koin) secara bersamaan untuk kedua kemungkinan keadaan input tersebut, yaitu 0 dan 1.

Di dunia kuantum, aturannya berubah secara radikal. Berbeda dengan bit klasik, sebuah qubit dapat berada dalam superposisi keadaan 0 dan 1 secara bersamaan. Oleh karena itu, kita dapat melakukan perhitungan tertentu secara simultan dengan menggunakan keadaan 0 dan keadaan 1 sebagai input. Inilah yang disebut paralelisme kuantum; kita dapat memahami pentingnya hal ini saat kita memikirkan apa yang terjadi ketika kita menambah jumlah qubit yang digunakan untuk mengodekan input melalui urutan angka 0 dan 1. Dengan dua qubit, kemungkinan keadaan input yang dapat diproses secara bersamaan menjadi 4 (00, 01, 10, 11); dengan tiga qubit menjadi 8 (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111), dan seterusnya.

Pertumbuhan jumlah keadaan input yang dapat diproses secara paralel ini berlangsung sangat cepat seiring dengan bertambahnya jumlah qubit. Lebih tepatnya, pertumbuhannya bersifat eksponensial. Ini adalah pola pertumbuhan yang sayangnya telah kita kenal dengan baik melalui kasus virus corona. Dalam kasus penyakit menular dengan angka reproduksi dasar

(R0) sebesar 2, setiap orang yang terinfeksi—tanpa adanya langkah-langkah pengendalian—akan menulari rata-rata dua orang lainnya. Pertumbuhan eksponensial semacam ini mungkin pada awalnya tampak dapat dikendalikan, namun bisa dengan cepat menjadi tak terkendali. Sebagai contoh, jika rata-rata waktu penularan virus adalah satu minggu, maka bermula dari satu kasus saja, jumlahnya akan mencapai sekitar seribu kasus dalam dua bulan, satu juta dalam empat bulan, dan satu miliar dalam enam bulan.

Tentu saja, pertumbuhan eksponensial seperti itu tidak dapat berlangsung tanpa batas karena adanya batasan fisik, seperti jumlah populasi dunia yang pada tahun 2025 diperkirakan mencapai sekitar delapan miliar jiwa. Demikian pula, kekuatan komputer kuantum meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya jumlah *qubit*, yang memungkinkan dilakukannya perhitungan pada sejumlah keadaan simultan yang tidak dapat dijangkau oleh komputer paralel klasik. Untuk memahami dampak luar biasa dari pertumbuhan eksponensial dalam paralelisme kuantum, kita bisa membayangkan contoh yang tidak terlalu dramatis dibandingkan contoh sebelumnya: kisah tentang firaun dan sang ahli catur. Menurut legenda, ahli catur yang mengajari firaun bermain catur meminta imbalan berupa satu butir gandum di kotak pertama papan catur, dua butir di kotak kedua, empat butir di kotak ketiga, dan seterusnya—dengan jumlah butiran yang berlipat ganda di setiap kotak. Firaun, yang menganggap permintaan itu sederhana, menyetujuinya, namun kemudian menyadari bahwa seluruh hasil panen kerajaannya selama bertahun-tahun pun tidak akan cukup untuk memenuhinya. Faktanya, untuk memenuhi permintaan tersebut, ia harus menyerahkan sepuluh miliar miliar butir gandum hanya untuk kotak terakhir saja.

Demikian pula, sebuah komputer kuantum dengan 64 qubit dapat melakukan perhitungan secara bersamaan untuk sejumlah keadaan masukan yang setara dengan jumlah butiran gandum yang harus diserahkan firaun kepada ahli catur tersebut. Komputer semacam itu, dengan memanfaatkan paralelisme kuantum, memiliki potensi yang tidak dapat dicapai oleh komputer klasik mana pun. Komputer ini mampu menyelesaikan dalam hitungan detik berbagai masalah yang saat ini membutuhkan waktu lebih lama daripada usia alam semesta jika dikerjakan oleh superkomputer paling canggih sekalipun. Justru pertumbuhan eksponensial inilah yang memberikan potensi revolusioner pada komputasi kuantum, memungkinkannya memecahkan masalah yang sebelumnya dianggap mustahil untuk diselesaikan.

2.4 GERBANG LOGIKA DASAR DALAM KOMPUTASI KUANTUM

Bagaimana sebenarnya perhitungan berlangsung di dalam komputer? Untuk menjawabnya, mari kita bayangkan sejenak saat kita kembali ke masa sekolah, ketika guru mengajarkan kita cara menjumlahkan dua angka. Kita melakukan penjumlahan kolom demi kolom, dimulai dari kanan: satuan dengan satuan, puluhan dengan puluhan, dan seterusnya, sembari menangani angka simpanan (*carry*). Sebagai contoh, jika kita menjumlahkan 8 dan 4, hasilnya adalah 12. Kita menulis angka 2 di kolom satuan dan "menyimpan" angka 1 ke kolom puluhan. Nah, komputer melakukan jenis operasi yang persis sama, hanya saja alih-alih

menggunakan bilangan desimal, komputer menggunakan bilangan biner. Dalam representasi ini, penjumlahan mengikuti aturan-aturan tertentu yang sama sederhananya. Sebagai contoh:

- 0 + 0 = 0,
- 0 + 1 = 1,
- 1 + 0 = 1,
- 1 + 1 = 0 dengan simpanan (*carry*) 1.

Untuk menjalankan algoritma, seperti operasi penjumlahan, komputer klasik memecah proses tersebut menjadi serangkaian langkah dasar yang disebut gerbang logika. Beberapa yang paling sederhana adalah gerbang *NOT*, *COPY*, dan *AND*. Gerbang *NOT* bekerja seperti sakelar: jika menerima *input* 0, ia mengubahnya menjadi 1, dan sebaliknya. Di sisi lain, gerbang COPY membuat salinan persis dari suatu bit tanpa mengubahnya. Kita bisa membayangkan bit sebagai hasil lemparan koin: sisi angka atau gambar. Nah, gerbang NOT ibarat melempar ulang koin tersebut, sedangkan gerbang COPY menyiapkan koin lain dengan hasil yang sama seperti koin pertama. Lalu ada gerbang AND, yang bekerja pada dua bit secara bersamaan: jika kedua "koin" menunjukkan sisi gambar (yaitu 1), maka hasilnya adalah 1; dalam kondisi lainnya, keluarannya adalah 0. Blok-blok pembangun logika sederhana ini menjadi dasar bagi setiap perhitungan di dalam komputer.

Bagaimana kita bisa menerapkan gerbang-gerbang logika ini di dalam komputer yang menggunakan sinyal listrik? Prinsipnya sederhana: bayangkan gerbang logika sebagai kotak dengan kabel yang masuk dan keluar. Status suatu bit—yaitu 0 atau 1—berkaitan dengan ada tidaknya aliran arus listrik pada kabel (1 berarti ada arus, 0 berarti tidak ada). Ambil contoh gerbang *AND*. Misalkan ada dua kabel, A dan B, yang masuk ke dalam kotak—mewakili status bit input fisik—dan satu kabel, C, yang keluar—mewakili bit output. Gerbang *AND* bekerja sedemikian rupa sehingga kabel C hanya akan mengalirkan arus jika kabel A dan B sama-sama mengalirkan arus. Dengan kata lain, syarat agar output bernilai 1 adalah kedua input harus bernilai 1. Operasi logika semacam ini kemudian diwujudkan secara elektronik melalui rangkaian sirkuit, di mana kabel A dan B bertindak sebagai input dan C sebagai *output*. Melalui kombinasi komponen elektronik seperti transistor, rangkaian ini secara fisik memungkinkan penerapan gerbang logika di dalam komputer yang nyata.

Namun, bagaimana mungkin kita bisa melakukan perhitungan yang kompleks hanya dengan bermodalkan gerbang-gerbang logika sederhana ini? Di sinilah letak keajaiban yang sesungguhnya: dapat dibuktikan bahwa hanya dengan tiga operasi dasar—*NOT*, *COPY*, dan *AND*—kita bisa menyusun jenis perhitungan apa pun, betapapun rumitnya hal itu terlihat. Sungguh luar biasa memikirkan bahwa dengan mengombinasikan ketiga gerbang sederhana ini, kita mampu mewujudkan semua fungsi logika yang dapat dibayangkan. Dalam praktiknya, ini berarti kita bisa menjalankan algoritma apa pun untuk memecahkan masalah apa pun, cukup dengan mengatur dan mengombinasikan operasi-operasi dasar tersebut. Hal ini ibarat membangun sebuah kastel utuh hanya dengan beberapa jenis batu bata: kuncinya terletak pada cara Anda menyusunnya! Oleh karena itu, jantung dari setiap komputer modern adalah komponen kecil namun sangat tangguh: transistor. Berkat perangkat elektronik mungil inilah gerbang logika dapat terwujud dan komputer mampu menjalankan berbagai operasi. Pada

komputer masa kini, satu mikroprosesor dapat memuat lebih dari satu miliar transistor yang bekerja secara serempak untuk melakukan setiap perhitungan. Penemuan transistor pada akhir tahun 1940-an menandai dimulainya revolusi teknologi yang sesungguhnya, yang memicu pertumbuhan pesat dan tak terbendung dalam industri elektronika. Tanpa transistor, dunia digital yang kita kenal saat ini tidak akan pernah ada!

Kemampuan untuk menguraikan algoritma apa pun menjadi gerbang logika dasar merupakan salah satu landasan ilmu komputer modern. Hal ini memungkinkan kita menggunakan perangkat keras yang sama—rangkaian elektronik yang sama—untuk menyelesaikan berbagai jenis masalah tanpa perlu mengubah infrastruktur dasarnya. Dengan kata lain, begitu kita memiliki transistor, tidak perlu lagi menambahkan komponen elektronik baru untuk melakukan perhitungan. Namun, jika misalnya kita menambah jumlah digit angka yang akan dijumlahkan, kita juga harus menambah jumlah operasi dasar seperti *NOT*, COPY*,* dan *AND*; akibatnya, waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungan pun akan bertambah. Selain waktu, memori juga memegang peranan penting: seiring membesarnya angka, kita membutuhkan lebih banyak ruang di memori komputer—yaitu lebih banyak sel, yang masing-masing memiliki "alamat" unik. Di sinilah data masukan dan hasil akhir disimpan, siap untuk dibaca atau dicetak. Dalam beberapa dekade terakhir, semua kendala ini berhasil diatasi berkat inovasi seperti sirkuit terintegrasi (*integrated circuits*) yang memuat jutaan transistor, yang memungkinkan komputer klasik menjadi semakin tangguh dan mampu menangani masalah dengan tingkat kerumitan luar biasa.

Sama halnya dengan komputer klasik, setiap perhitungan dalam komputer kuantum dapat diuraikan menjadi serangkaian gerbang logika dasar. Namun, gerbang-gerbang ini tidak bekerja pada bit biasa, melainkan pada *qubit*, dan dapat beroperasi pada satu atau dua qubit sekaligus. Revolusi sesungguhnya terletak pada sifat gerbang logika kuantum: sementara gerbang klasik satu-bit hanya dapat mengubah status antara 0 dan 1, gerbang logika kuantum memiliki kemampuan untuk menempatkan qubit dalam kondisi superposisi antara 0 dan 1. Dalam ilustrasi bola, gerbang logika kuantum dapat memindahkan *qubit* dari satu titik ke titik lain di permukaan bola tersebut, sehingga membuka cakrawala kemungkinan yang sangat luas. Fleksibilitas inilah yang menjadikan komputasi kuantum begitu luar biasa dan tangguh.

Gerbang logika kuantum dasar yang melibatkan dua *qubit* disebut *CNOT*, atau "*controlled-NOT*". Cara kerjanya sederhana namun ampuh: *qubit* pertama, yang disebut sebagai qubit kendali (*control qubit*), tidak mengalami perubahan. *Qubit* keduanyalah—yaitu qubit target—yang dapat mengalami transformasi: jika qubit kendali berada dalam keadaan 1, gerbang *CNOT* akan "membalik" nilainya (mengubah 0 menjadi 1 atau 1 menjadi 0), persis seperti cara kerja gerbang *NOT*. Jika qubit kendali berada dalam keadaan 0, gerbang tersebut tidak melakukan apa pun, sehingga keadaan awal tetap tidak berubah. Namun, karakteristik sejati dari gerbang *CNOT* adalah kemampuannya untuk menciptakan keterikatan (*entanglement*), bahkan ketika kita memulai dengan dua qubit terpisah yang tidak saling terikat; dengan kata lain, gerbang ini menempatkan kedua qubit tersebut dalam suatu keadaan di mana keduanya tidak dapat lagi dideskripsikan secara independen satu sama lain. Kemampuan menghasilkan keterikatan—salah satu karakteristik paling memukau dalam fisika

kuantum—inilah yang menjadikan *CNOT* sebagai salah satu komponen fundamental yang menopang kekuatan komputer kuantum.

Menarik untuk dicermati bagaimana gerbang logika kuantum, baik yang melibatkan satu qubit maupun *CNOT*, memungkinkan kita memanfaatkan dua karakteristik paling luar biasa dari mekanika kuantum: superposisi dan keterikatan. Justru sifat-sifat inilah—yang sering kali sulit dipahami secara intuitif—yang membuka jalan bagi kekuatan luar biasa komputasi kuantum. Di satu sisi, sifat-sifat tersebut tampak bertentangan dengan intuisi kita, namun di sisi lain, keduanya merupakan sumber daya kunci yang memungkinkan terjadinya paralelisme kuantum, yang sesungguhnya menjadi rahasia di balik kekuatan komputasi komputer kuantum. Dan di sinilah letak keindahannya: karena setiap perhitungan kuantum—seperti yang telah disebutkan sebelumnya—dapat diuraikan menjadi gerbang-gerbang elementer sederhana ini, mesin kuantum pun mampu menyelesaikan berbagai persoalan yang tampak mustahil bagi komputer klasik.

Jadi, apakah semuanya sudah terpecahkan? Sayangnya tidak; kenyataannya jauh lebih kompleks. Sejauh ini, kita telah mengabaikan aspek krusial dalam mekanika kuantum: untuk memperoleh keluaran—yakni hasil perhitungan—kita harus "bertanya" kepada komputer melalui proses pengukuran. Di sinilah masalah pertama muncul. Sebagaimana kita ketahui, proses pengukuran dalam mekanika kuantum pada dasarnya bersifat probabilistik, dan peluang dari berbagai kemungkinan keluaran diatur oleh postulat-postulat fisika kuantum. Ini berarti, meskipun komputer kuantum mampu melakukan perhitungan dalam jumlah tak terbatas secara paralel untuk berbagai keadaan masukan, pada akhirnya kita tetap harus melakukan pengukuran untuk mengetahui hasilnya. Pengukuran terhadap setiap qubit hanya menghasilkan satu bit klasik—bernilai 0 atau 1—dengan peluang tertentu. Dengan kata lain, komputer kuantum mungkin telah melakukan perhitungan dalam jumlah yang mengesankan, namun pada akhirnya, kita hanya memiliki akses terhadap hasil pengukuran berupa satu bit klasik untuk setiap *qubit* yang terlibat. Hal ini seolah-olah melenyapkan keuntungan besar dari paralelisme kuantum, karena kita hanya mendapatkan satu jawaban—yang bahkan tidak selalu sama—akibat sifat probabilistik dari pengukuran tersebut.

Adakah jalan keluarnya? Bisakah kita benar-benar memanfaatkan seluruh informasi yang terkandung dalam komputer kuantum? Meskipun hambatan ini tampak mustahil untuk diatasi, jawabannya adalah ya! Selama bertahun-tahun, para ilmuwan dan peneliti telah bekerja tanpa lelah untuk memecahkan tantangan ini dengan mengembangkan algoritma kuantum yang cerdas. Algoritma-algoritma ini dirancang untuk memanfaatkan kekuatan paralelisme kuantum dengan cara menggabungkan dan menumpangkan (*superimposing*) hasil-hasil perhitungan paralel, sehingga saat pengukuran dilakukan, *qubit-qubit* tersebut menghasilkan jawaban yang tepat seperti yang kita cari. Ini bukanlah tugas yang sederhana; sering kali, karena hasil pengukuran bersifat probabilistik, perhitungan perlu diulang beberapa kali sebelum solusi yang diinginkan dapat diperoleh. Namun, potensi keuntungan dari paralelisme kuantum sangatlah besar dan—seperti yang akan kita lihat sebentar lagi—dapat menghasilkan capaian yang luar biasa.

2.5 RAHASIA BILANGAN PRIMA DAN REVOLUSI ALGORITMA KUANTUM

Faktorisasi bilangan bulat

"Masalah membedakan bilangan prima dari bilangan komposit, serta menguraikan bilangan komposit menjadi faktor-faktor primanya, merupakan salah satu masalah terpenting dan paling bermanfaat dalam seluruh bidang aritmetika. Martabat ilmu pengetahuan tampaknya menuntut agar setiap upaya untuk memecahkan masalah yang begitu termasyhur dan elegan ini dikembangkan dengan penuh semangat". Demikianlah tulisan matematikawan besar *Carl Friedrich Gauss* pada tahun 1801 dalam karyanya, *Disquisitiones Arithmeticae*. Namun, apa kegunaan bilangan prima? Tentu saja, pada masa Gauss, bilangan ini tidak memiliki kegunaan praktis; bahkan kita pun, saat pertama kali mempelajarinya di sekolah, cenderung menganggapnya sekadar keingintahuan matematis yang tidak relevan dengan kehidupan nyata. Kita ingat bahwa bilangan prima adalah bilangan yang hanya dapat dibagi oleh 1 atau oleh dirinya sendiri. Jadi, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 23... adalah bilangan prima. Dengan kata lain, bilangan prima tidak dapat diperoleh dengan mengalikan dua bilangan bulat selain 1.

Bilangan prima mungkin tampak seperti keunikan teoretis semata, namun seiring berjalannya waktu, terungkap bahwa bilangan ini menyimpan rahasia yang sangat relevan dan kini memberikan dampak luar biasa bagi dunia modern. Mengapa demikian? Jawabannya terletak pada suatu sifat yang mengejutkan. Bayangkan dua bilangan prima, p dan q. Menghitung hasil kalinya, $N = p \times q$, adalah hal yang mudah. Namun, jika kita tidak lagi mengetahui kedua bilangan p dan q tersebut dan hanya memiliki nilai N, melacak kembali faktor-faktor prima aslinya—yaitu p dan q—menjadi sangat sulit. Mari kita ambil contoh: mengalikan 97 dengan 109 menghasilkan 10.573, sebuah operasi yang dapat kita lakukan dengan mudah. Akan tetapi, jika kita hanya diberikan angka 10.573, menentukan bahwa faktor-faktor primanya adalah tepat 97 dan 109 bukanlah hal yang sederhana.

Tingkat kesulitan ini meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya besaran angka tersebut. Inilah inti permasalahannya: semakin banyak digit yang dimiliki suatu bilangan (atau semakin banyak bit yang diperlukan untuk merepresentasikannya), semakin kompleks pula proses penguraiannya menjadi faktor-faktor prima. Faktanya, algoritma terbaik yang tersedia saat ini untuk memfaktorkan bilangan besar memerlukan sejumlah operasi (atau sejumlah gerbang logika) yang meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya jumlah digit.

Hal ini ibarat anekdot tentang Firaun dan butiran gandum: masalahnya tampak sederhana pada awalnya, namun kemudian menjadi sangat sulit hingga tak terbendung. Meskipun menentukan faktor prima dari 15 adalah hal yang sangat mudah, faktorisasi bilangan desimal dengan 250 digit (yaitu 829 bit) baru berhasil dilakukan pada tahun 2020 menggunakan superkomputer dengan banyak prosesor—sebuah upaya yang setara dengan penggunaan satu prosesor tunggal (berdasarkan teknologi terkini) selama 2.700 tahun. Jika kita mencoba melakukan faktorisasi pada bilangan dengan 300 digit, prosesnya akan memakan waktu lebih dari satu juta tahun dengan teknologi saat ini. Dalam praktiknya, masalah ini

menjadi mustahil untuk dipecahkan, bahkan dengan mengerahkan seluruh sumber daya komputasi umat manusia.

Cara kerja kode kriptografi, yang memungkinkan kita mengirimkan informasi secara rahasia, justru didasarkan pada tantangan yang tampaknya mustahil ditaklukkan: kesulitan—atau dalam praktiknya, kemustahilan—untuk melakukan faktorisasi bilangan bulat yang sangat besar. Kita tidak hanya berbicara tentang rahasia militer, data industri, atau pesan diplomatik antar-pemerintah. Di era Internet, kriptografi menjadi bagian sentral dalam kehidupan sehari-hari kita: setiap kali kita membeli sesuatu secara daring, memesan liburan, atau mengirim pesan pribadi, kita mengandalkan sistem ini. Tidak ada satu pun dari kita yang ingin data kartu kredit jatuh ke tangan yang salah, seperti organisasi kriminal, atau membiarkan informasi pribadi kita terbongkar.

Oleh karena itu, komputer melakukan penyandian (*enkripsi*) terhadap pesan-pesan kita, sehingga pesan tersebut tidak dapat dibaca oleh siapa pun yang mencoba mencegatnya. Pesan-pesan ini baru akan diterjemahkan kembali (*dekripsi*) dan dapat dipahami setelah sampai di tujuan. Sistem penyandian dan penerjemahan kode ini kini telah terintegrasi ke dalam protokol komunikasi utama serta sistem operasi yang paling banyak digunakan. Keamanannya bergantung tepat pada fakta bahwa faktorisasi bilangan prima besar—yang diperlukan untuk mendekripsi pesan—sama sekali tidak dapat dilakukan dengan komputer saat ini. Bahkan dengan teknologi paling canggih sekalipun, waktu yang dibutuhkan untuk memecahkan masalah ini akan sangat lama hingga menjadikannya mustahil untuk dilakukan.

Apa kaitan semua hal ini dengan mekanika kuantum atau komputer kuantum? Sejauh ini, mungkin tampak masuk akal bahwa komputer kuantum berguna untuk mempelajari sistem kuantum; namun, tidaklah mudah untuk memahami bagaimana komputer ini bisa jauh lebih efisien daripada komputer klasik dalam memecahkan masalah yang tampaknya sama sekali tidak berkaitan dengan fisika kuantum. Selama bertahun-tahun setelah gagasan awal Richard Feynman, komputer kuantum dianggap sebagai ide yang menarik namun ditakdirkan untuk sekadar menjadi teori. Situasi ini berubah drastis pada tahun 1994, ketika seorang matematikawan bernama Peter Shor mengubah peta permainan. Shor memublikasikan sebuah algoritma yang dirancang khusus untuk memecahkan masalah yang jauh dari ranah fisika kuantum: faktorisasi bilangan bulat.

Algoritmanya, yang dapat dijalankan pada komputer kuantum, mampu menemukan faktor prima suatu bilangan dengan sangat efisien—sebuah tantangan yang tidak dapat diatasi oleh komputer klasik. Penemuan ini mengubah persepsi mengenai potensi komputasi kuantum, dan atas karyanya tersebut, Peter Shor menerima penghargaan bergengsi Breakthrough Prize in Physics pada tahun 2022, bersama para pelopor informasi kuantum seperti Charles Bennett, Gilles Brassard, dan David Deutsch. Tidak perlu dijelaskan secara rinci bagaimana algoritma Shor bekerja, namun gagasan dasarnya adalah sebagai berikut: Shor berhasil mengubah masalah faktorisasi menjadi masalah pencarian "periode" r dari suatu fungsi periodik tertentu—sebuah fungsi dikatakan periodik jika fungsi tersebut berulang setelah interval r tertentu.

Efisiensi algoritma ini bersumber pada kemampuannya memanfaatkan paralelisme kuantum, yang memungkinkan komputer kuantum mengevaluasi fungsi tersebut secara serentak untuk sejumlah besar masukan. Kecemerlangan yang sesungguhnya terletak pada kemampuan untuk menggabungkan semua perhitungan paralel tersebut sedemikian rupa sehingga, pada akhirnya, dengan mengukur keadaan *qubit*, periode fungsi tersebut dapat diperoleh. Dapat dibuktikan bahwa begitu periode fungsi ditemukan, masalah faktorisasi bilangan bulat dapat diselesaikan dengan cepat menggunakan komputer klasik biasa.

Algoritma Shor begitu ampuh sehingga komputer kuantum dengan beberapa ribu *qubit* dapat memecahkan kode kriptografi yang saat ini digunakan, yang justru didasarkan pada tingkat kesulitan faktorisasi. Memang benar bahwa saat ini kita masih jauh dari skenario tersebut: di laboratorium, kita baru mampu melakukan faktorisasi pada bilangan-bilangan kecil. Namun, kita dapat membayangkan masa depan yang tidak terlalu jauh di mana kemajuan pesat teknologi kuantum akan secara serius mengancam keamanan informasi terenkripsi. Untungnya, mekanika kuantum telah memiliki solusinya: sebagaimana akan kita lihat nanti, mekanika kuantum menawarkan metode alternatif yang secara inheren aman untuk mentransmisikan informasi sensitif. Seolah-olah fisika kuantum itu sendiri—yang berpotensi melemahkan keamanan kita—sekaligus menawarkan kunci untuk melindunginya.

Pencarian basis data

Kita hidup di era *big data*, suatu masa ketika aliran informasi yang sangat besar dikumpulkan oleh berbagai organisasi, perusahaan, dan pemerintah setiap detiknya. Data ini berasal dari beragam sumber yang mengesankan: transaksi komersial, perangkat pintar, mesin industri, video, media sosial, dan banyak lagi. Data tersebut disimpan dan dianalisis untuk menggali informasi bermanfaat yang memandu keputusan bisnis, membentuk strategi, menekan biaya, mempercepat proses, serta mendorong inovasi. Pada intinya, data ini telah menjadi sumber daya berharga bagi mereka yang tahu cara memanfaatkannya untuk mengoptimalkan penawaran dan mengembangkan produk baru.

Namun, mengelola data dalam jumlah yang sangat besar ini sama sekali tidak sederhana. Tantangan terbesarnya adalah mengetahui cara menyaring dan memilih informasi yang benar-benar berguna—informasi yang memenuhi kebutuhan dan tujuan tertentu. Ini merupakan masalah krusial dan prioritas bagi setiap perusahaan atau organisasi yang harus mengarungi lautan data ini. Untuk memberikan gambaran mengenai skala fenomena ini, bayangkan bahwa hampir satu *zettabyte data* dihasilkan setiap hari—setara dengan angka 1 diikuti oleh 21 angka nol dalam satuan byte, di mana 1 *byte* terdiri dari 8 bit. Menghadapi informasi dalam jumlah yang mencengangkan ini, pertanyaan yang wajar muncul: bagaimana kita bisa memecahkan masalah ini?

Pada tahun 1996, ilmuwan komputer asal India, Lov Kumar Grover, menciptakan algoritma brilian yang mampu memecahkan masalah yang kompleks sekaligus krusial: menemukan elemen spesifik di dalam daftar (atau basis data) yang tidak terstruktur. Bayangkan, misalnya, Anda harus mencari kontak di buku telepon. Jika Anda mengetahui nama orang tersebut, mudah untuk menemukan nomornya karena nama-nama itu disusun menurut abjad. Namun, jika Anda hanya memiliki nomornya dan perlu menemukan namanya,

situasinya berubah drastis: Anda tidak punya pilihan selain membalik halaman demi halaman, menelusuri setiap nomor hingga menemukan yang tepat.

Terkadang Anda beruntung dan menemukannya di beberapa halaman awal, namun di lain waktu Anda mungkin harus mencari hingga hampir ke bagian akhir. Rata-rata, pencarian ini mengharuskan pemeriksaan separuh dari daftar tersebut—sebuah proses yang, jika basis datanya besar, dapat memakan waktu cukup lama. Akan tetapi, Grover menemukan solusi yang—dengan memanfaatkan kekuatan komputasi kuantum—membuat pencarian ini jauh lebih efisien. Contoh ini mungkin tampak seperti kasus khusus, namun pencarian elemen dalam basis data merupakan masalah yang sangat umum dan relevan. Setelah algoritma Shor, algoritma Grover dianggap sebagai salah satu yang paling penting dalam dunia komputasi kuantum. Apa keunggulannya? Hal ini memungkinkan pencarian elemen yang diinginkan dengan kecepatan yang mengesankan. Berkat paralelisme kuantum, waktu pencarian tidak lagi sebanding dengan jumlah elemen dalam basis data, melainkan dengan akar kuadrat dari jumlah tersebut. Keuntungannya sangatlah besar.

Mari kembali ke contoh kita: bayangkan sebuah buku telepon yang memuat satu juta nomor. Jika setiap pencarian memakan waktu satu detik, tanpa algoritma Grover, skenario terburuk akan membutuhkan waktu satu juta detik—atau sekitar 12 hari. Dengan algoritma Grover, waktu tersebut terpangkas drastis menjadi hanya 1.000 detik, atau sedikit lebih dari seperempat jam! Semakin besar basis data, semakin besar pula keuntungan yang diperoleh: untuk satu miliar nomor, Grover dapat memangkas waktu dari 31 tahun menjadi hanya 8 jam. Sebuah penghematan luar biasa yang membuktikan betapa hebat dan bermanfaatnya algoritma ini.

Algoritma kuantum dan pengukuran

Nanti, kita akan membahas berbagai masalah kompleks yang dapat diselesaikan oleh komputer kuantum. Untuk saat ini, mari kita fokus pada aspek mendasar dari setiap algoritma kuantum: di akhir perhitungan, komputer kuantum harus diperiksa melalui proses pengukuran, yang menghasilkan nilai 0 atau 1 untuk setiap qubit, dengan probabilitas yang ditentukan oleh hukum fisika kuantum. Dari urutan angka 0 dan 1 ini, kita ingin memperoleh jawaban yang jelas atas masalah yang sedang kita kaji.

Sebagai contoh, dalam algoritma Shor, urutan bit tersebut merepresentasikan penyandian biner dari periode suatu fungsi, yang darinya kita dapat menentukan faktor-faktor prima suatu bilangan. Dalam simulasi material, urutan angka 0 dan 1 tersebut dapat mengungkap nilai sifat-sifat penting, seperti konduktivitas listrik atau termal dari material yang sedang diteliti. Kecepatan komputer kuantum dalam memberikan jawaban tidak hanya bergantung pada karakteristik masalahnya, tetapi juga pada kemampuan kita dalam mengembangkan algoritma kuantum yang efisien.

Kesulitan mendasarnya adalah bahwa dalam mekanika kuantum, pengukuran pada dasarnya bersifat probabilistik; artinya, sebuah algoritma tidak selalu menjamin hasil yang benar pada percobaan pertama. Namun, ketidakpastian ini bukanlah hal yang perlu dikhawatirkan. Jika probabilitas keberhasilannya cukup tinggi, kita dapat memperoleh solusi yang benar dengan jumlah pengulangan algoritma yang relatif sedikit. Faktanya, sebagaimana

dalam analisis apa pun yang didasarkan pada perhitungan probabilitas, selalu ada kemungkinan algoritma gagal berulang kali.

Akan tetapi, keunggulan komputasi kuantum terletak pada kenyataan bahwa seiring bertambahnya jumlah pengulangan, probabilitas kegagalan yang terus-menerus akan menurun secara eksponensial. Sebagai contoh, jika setelah seratus kali percobaan probabilitas belum diperolehnya hasil yang benar kurang dari satu banding satu miliar, maka keberhasilan dapat dianggap hampir pasti tercapai dalam jumlah percobaan tersebut.

2.6 DILEMA SCHRÖDINGER: DEKOHERENSI DAN KUCING YANG SULIT DITANGKAP

Munculnya algoritma kuantum yang mampu menangani masalah yang sebelumnya belum terjamah oleh komputer klasik telah memberikan dorongan kuat bagi pengembangan komputer kuantum. Sejak memasuki milenium baru, dunia akademis global telah menyaksikan pertumbuhan pesat jumlah laboratorium yang didedikasikan untuk mengeksplorasi komputer kuantum dan teknologi terkait. Saat ini, tidak ada departemen fisika yang tidak menawarkan setidaknya satu mata kuliah tentang komputer kuantum—sebuah bidang yang hingga awal tahun 2000-an merupakan wilayah yang hampir belum tereksplorasi. Evolusi pesat ini mengajak kita untuk merenungkan dinamika sistem pendidikan kita.

Di era di mana pengetahuan dapat dengan cepat menjadi usang, tidaklah cukup hanya dengan membanjiri generasi muda dengan berbagai gagasan. Sebaliknya, sangatlah penting untuk mengasah kemampuan berpikir kritis mereka serta membekali mereka dengan fleksibilitas yang diperlukan untuk menghadapi dan memecahkan tantangan baru yang muncul akibat kemajuan ilmu pengetahuan yang terus berlanjut. Dengan demikian, pernyataan Plutarch menjadi semakin relevan: "Generasi muda bukanlah wadah untuk diisi, melainkan api untuk dinyalakan."

Mengingat potensi luar biasa komputer kuantum dan besarnya sumber daya yang diinvestasikan untuk mewujudkannya, wajar jika kita bertanya mengapa kita belum melihatnya—entah di meja kerja kita atau setidaknya di pusat komputasi besar—siap untuk merevolusi pendekatan kita terhadap pengetahuan dan teknologi serta memecahkan masalah yang sebelumnya tidak dapat ditangani oleh komputer klasik. Sebaliknya, seperti yang akan kita lihat nanti, kita masih berada dalam tahap pengembangan prototipe, meskipun prototipe-prototipe ini berkembang pesat dan menjadi semakin canggih. Hambatan utama, dan dengan demikian tantangan terbesar, tetaplah fenomena dekoherensi, yang mengganggu stabilitas dan efektivitas komputer kuantum. Mengatasi hambatan ini tentu akan menjadi tugas yang sulit, yang membutuhkan upaya luar biasa dan inovasi berkelanjutan.

Dekoherensi terjadi ketika sistem kuantum bersentuhan secara tak terkendali dengan lingkungan eksternal, yang mengubah keadaan komputer kuantum dan menyebabkan hilangnya informasi yang tersimpan serta diproses di dalamnya. Bayangkan pemandangan seekor angsa yang meluncur dengan anggun di atas air danau yang tenang, meninggalkan jejak gelombang yang lembut dan teratur. Sekarang, bayangkan agen eksternal yang datang tiba-tiba—seperti hujan, angin, atau gangguan lainnya—mengacaukan permukaan air, menciptakan riak kacau yang merusak dan memecah gelombang halus tersebut. Demikian

pula, komputer kuantum—dengan tingkat sensitivitasnya yang ekstrem—memerlukan perlindungan dari lingkungan sekitar demi menjaga integritasnya. Bayangkan sebuah *qubit* sebagai koin yang sedang berdiri pada tepiannya: gangguan sekecil apa pun, bahkan yang paling lembut dan tak terasa sekalipun, dapat membuatnya jatuh ke satu sisi atau sisi lainnya, sehingga menentukan hasil akhir berupa sisi gambar atau angka.

Saat kita mulai menjalankan suatu algoritma, tugas kita menjadi ibarat seorang konduktor yang menyelaraskan harmoni sekelompok musisi: kita harus mengendalikan komputer kuantum dengan presisi tinggi, mengatur keadaan setiap qubit serta mengaktifkan atau menonaktifkan interaksi antar-qubit untuk mewujudkan gerbang logika seperti *CNOT*. Hal ini menuntut isolasi yang hampir sempurna—benar-benar tertutup rapat—antara komputer dan lingkungan luar guna melindunginya dari pengaruh yang merusak, seperti medan listrik dan magnet serta radiasi yang dipancarkan oleh benda-benda panas di sekitarnya.

Tujuannya adalah mencegah terjadinya fenomena dekoherensi dengan segala cara—yaitu interaksi berbahaya antara qubit dan dunia luar yang dapat merusak superposisi keadaan kuantum yang rapuh, sehingga melenyapkan keunggulan komputer kuantum itu sendiri. Dalam tarian presisi yang sangat cermat ini, kita harus melindungi dan menjaga integritas operasi kuantum, sembari memastikan bahwa perangkat kita kebal terhadap kekuatan kacau yang berupaya mengganggunya.

Pada titik inilah sebuah pertanyaan krusial mungkin muncul di benak pembaca. Kita telah membahas bagaimana sistem mikroskopis mematuhi hukum mekanika kuantum, yang memunculkan fenomena seperti superposisi keadaan dan keterikatan (*entanglement*). Namun, seberapa kecilkah ukuran suatu objek agar kita dapat menyaksikan keajaiban alam semesta tersebut? Dalam kehidupan sehari-hari, fenomena ini tidak terlihat dan tersembunyi dari pandangan mata manusia.

Oleh karena itu, kita bertanya: adakah batas dimensi yang menjadi titik peralihan di mana tabir dunia kuantum tersingkap, memberi jalan bagi hukum fisika klasik yang lebih akrab bagi kita? Dan bagaimana kita dapat menentukan kapan suatu objek cukup kecil untuk "menari" mengikuti irama mekanika kuantum yang ganjil? Ini adalah pertanyaan-pertanyaan yang berada di perbatasan antara dunia yang tampak dan tak tampak, sebuah tantangan yang memancing rasa ingin tahu kita.

Pertanyaan ini dijawab dengan sangat apik melalui paradoks kucing Schrödinger, sebuah eksperimen pikiran yang dirancang pada tahun 1935 oleh Erwin Schrödinger, salah satu tokoh perintis mekanika kuantum. Bayangkan Anda berada di hadapan sebuah kotak tertutup yang berisi sumber radioaktif, detektor radiasi, palu, botol kecil berisi racun, dan seekor kucing. Sumber radioaktif tersebut merupakan suatu sistem (atom) yang dapat berada dalam dua tingkat keadaan: keadaan dasar 0 dan keadaan tereksitasi 1.

Jika atom berada dalam keadaan 1, atom tersebut dapat meluruh ke keadaan 0 dengan probabilitas tertentu sembari memancarkan cahaya (foton); pancaran ini mengaktifkan detektor dan memicu reaksi berantai: palu memecahkan botol racun, melepaskan racun tersebut, dan membunuh kucing itu. Asumsikan bahwa pada awalnya, keadaan sistem gabungan atom-kucing adalah: "atom dalam keadaan 1, kucing hidup". Seiring berjalannya

waktu, atom tersebut mungkin meluruh ke keadaan 0 atau tidak, dan nasib kucing bergantung pada peristiwa ini. Jika atom telah meluruh, kucing mati; jika tidak, kucing tetap hidup. Sekilas, tidak ada hal yang mengejutkan di sini—probabilitas sebenarnya sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sebagai contoh, jika kita melempar koin, sebelum melihat hasilnya, kita dapat mengatakan—asalkan koin tersebut tidak dicurangi—bahwa koin itu memiliki peluang yang sama untuk menunjukkan sisi "angka" (*heads*) atau sisi "gambar" (*tails*).

Lantas, apa yang begitu paradoks dari kucing Schrödinger? Intinya adalah, menurut mekanika kuantum, sebelum kita mengamati bagian dalam kotak, atom dan kucing tersebut secara bersamaan berada dalam superposisi antara "atom dalam keadaan 1, kucing hidup" dan "atom dalam keadaan 0, kucing mati". Dengan demikian, kita dihadapkan pada aspek yang paradoks bagi intuisi klasik kita: superposisi antara keadaan hidup dan mati si kucing. Keberadaan bersama ini berbeda dari superposisi klasik dua warna primer yang menghasilkan warna baru; misalnya, pencampuran warna biru dan kuning yang menghasilkan warna hijau.

Berbeda dengan warna-warna yang membaur secara harmonis, superposisi yang dihasilkan dari keadaan hidup dan mati kucing tersebut menentang segala logika klasik dan tidak dapat diamati secara langsung, menjadikannya sangat paradoks. Berbeda dengan warna sekunder seperti hijau, "keadaan sekunder" berupa kucing hidup/kucing mati tidak pernah teramati. Inilah keindahan sekaligus teka-teki dari kucing Schrödinger, yang memaksa kita untuk meninjau kembali apa yang kita yakini sebagai realitas itu sendiri.

Untuk keluar dari situasi yang absurd ini, fenomena dekoherensi hadir sebagai solusinya. Sistem atom-kucing tidak pernah terisolasi secara sempurna karena sistem tersebut senantiasa bersentuhan dengan lingkungan sekitarnya. Interaksi dengan lingkungan ini, pada kenyataannya, berperan sebagai alat ukur yang mengungkap apakah kucing tersebut hidup atau mati. Kehadiran pengamat yang sadar, seperti manusia, tidak diperlukan untuk melakukan pengukuran tersebut. Lingkungan itu sendiri, melalui interaksinya dengan kucing, mengganggu keadaan kucing tersebut, persis seperti yang akan terjadi jika kita mengamatinya secara langsung. Menurut hukum mekanika kuantum, setelah interaksi ini terjadi, keadaan kucing "runtuh" (*collapse*) menjadi satu keadaan pasti: hidup atau mati. Dengan kata lain, interaksi dengan lingkungan menghancurkan keadaan terjerat (*entangled state*) yang rapuh yang sebelumnya terbentuk antara atom dan kucing, sehingga memutus ketidakpastian kuantum tersebut.

Paradoks kucing Schrödinger tak diragukan lagi memikat imajinasi kita, namun apa yang akan terjadi jika alih-alih kucing, kita menggunakan makhluk hidup yang jauh lebih kecil, seperti bakteri? Bisakah kita, dalam hal ini, mengisolasi sistem secara sempurna dan memperoleh superposisi kuantum antara kondisi "hidup" dan "mati"? Saat ini, kita belum memiliki jawaban yang pasti. Pertanyaan mengenai sejauh mana kita dapat mengamati efek akibat superposisi kuantum pada sistem biologis atau sistem yang lebih kompleks masih menjadi topik yang terbuka dan menarik. Faktanya, eksperimen perintis sedang dilakukan untuk menyelidiki fenomena ini pada objek-objek yang ukurannya semakin besar. Pada tahun 1999, di Universitas Wina, peraih Nobel Anton Zeilinger dan rekan-rekannya mendemonstrasikan efek interferensi kuantum untuk pertama kalinya pada molekul *fullerene*,

yang terdiri dari 60 atom karbon. Sejak saat itu, pembelajaran terus berlanjut di bawah pimpinan Markus Arndt, dengan eksperimen yang mengeksplorasi efek-efek ini pada molekul yang ukurannya semakin besar. Dengan demikian, batas terdepan fisika kuantum meluas ke wilayah-wilayah yang sebelumnya tak terbayangkan.

Namun, apa kaitan antara pertanyaan ini dengan pengembangan komputer kuantum? Kita bisa membayangkan komputer kuantum sebagai semacam "kucing Schrödinger"—tidak sepenuhnya makroskopis, namun juga tidak sepenuhnya mikroskopis. Tujuan kita sebenarnya adalah mampu mengendalikan sebanyak mungkin qubit selama pelaksanaan algoritma untuk menyelesaikan perhitungan yang sangat kompleks. Sistem seperti komputer kuantum disebut sebagai sistem mesoskopis karena posisinya berada di antara dunia mikroskopis—yang diwakili oleh qubit individual—dan dunia makroskopis, tempat kita tidak akan pernah melihat kucing dalam keadaan superposisi hidup dan mati. Tantangan sesungguhnya terletak pada upaya mengatasi dekoherensi, yaitu kemampuan mempertahankan superposisi keadaan dalam sistem yang semakin besar dan untuk durasi waktu yang semakin lama. Dengan kata lain, untuk membangun komputer kuantum yang berfungsi, kita harus memenangkan pertarungan melawan dekoherensi ini. Ini merupakan tantangan teknologi yang sangat besar, namun justru di situlah letak masa depan komputasi kuantum.

2.7 MEMBANGUN ARSITEKTUR KUANTUM

Kita teringat pada kutipan terkenal dari Schrödinger pada tahun 1952: “Kita tidak pernah bereksperimen hanya dengan satu elektron, atom, atau molekul (kecil). Dalam eksperimen pikiran, kita terkadang mengasumsikan hal itu; namun, hal ini selalu berujung pada konsekuensi yang tidak masuk akal... kita tidak bereksperimen dengan partikel tunggal, sama halnya kita tidak bisa memelihara Ichthyosauria di kebun binatang”. Jika kita menafsirkan kata-kata salah satu tokoh pendiri mekanika kuantum yang paling hebat dan brilian ini secara harfiah, kita mungkin akan berpikir bahwa segala hal yang telah kita bahas sejauh ini hanyalah latihan mental yang menarik—mungkin berguna untuk menjelaskan konsep-konsep abstrak, namun tanpa prospek penerapan praktis.

Dengan kata lain, hal itu ibarat membayangkan “memelihara Ichthyosauria di kebun binatang”. Sungguh mengejutkan bagaimana hal yang dianggap “tidak masuk akal” oleh Schrödinger justru menjadi kenyataan beberapa dekade kemudian. Untuk membangun komputer kuantum, inilah tepatnya yang harus kita lakukan: bereksperimen dengan dan memanipulasi partikel tunggal, seperti atom dan elektron, dengan presisi yang luar biasa. Namun, tantangan teknologi yang kita hadapi saat ini jauh lebih ambisius. Mengendalikan satu qubit saja—seperti yang tersirat dalam kutipan Schrödinger—tidaklah cukup; kita harus mengelola sekumpulan qubit secara keseluruhan, serta menjaga keadaan terjerat (*entangled*) qubit-qubit tersebut agar terlindung dari dekoherensi. Ini adalah upaya yang sangat besar dan berat, namun justru di sinilah masa depan komputasi kuantum dipertaruhkan.

Untungnya, dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan teknologi telah memungkinkan kita untuk menyelami dunia mikroskopis yang misterius dan memukau, tempat jarak diukur dalam skala sepersejuta milimeter. Berbeda dengan apa yang mungkin dibayangkan pada masa

Schrödinger, saat ini kita mampu melakukan eksperimen yang hingga beberapa dekade lalu tampak mustahil. Melalui eksplorasi ranah luar biasa inilah kita harus mencari cara untuk membangun perangkat keras komputer kuantum. Akan tetapi, di dunia ini, segala sesuatunya sangatlah rentan; saat kita melangkah menuju perwujudan nyata elemen-elemen fisik komputer kuantum, kita harus menyadari tantangan dan batasan yang ditimbulkan oleh semesta yang rapuh sekaligus kompleks ini.

Di sinilah letak kunci masa depan teknologi kuantum, namun jalan menuju ke sana menuntut tingkat presisi dan pemahaman yang belum pernah ada sebelumnya. Tantangan pertama yang harus dihadapi adalah bagaimana membangun qubit secara konkret. Hal ini sama sekali tidak sederhana. Qubit pada dasarnya adalah sistem kuantum dengan dua keadaan yang dapat dibedakan, seperti atom yang dapat berada dalam dua keadaan (atau tingkat orbital) yang berbeda. Kedua keadaan ini—yang menjadi inti dari *quantum bit*—idealnya harus terisolasi dari lingkungan luar dan memiliki karakteristik yang jelas: stabilitas dan kemampuan untuk direproduksi. Untungnya, alam menyediakan atom-atom identik dalam jumlah tak terbatas (satu atom hidrogen persis sama dengan atom hidrogen lainnya), namun di sinilah letak kerumitannya.

Atom sangat peka terhadap lingkungan sekitarnya—begitu peka hingga, seperti yang akan kita lihat di Bab 4, atom dapat dimanfaatkan sebagai sensor yang sangat baik! Akan tetapi, kepekaan ini juga berarti bahwa variasi eksternal kecil, seperti fluktuasi medan magnet Bumi, dapat mengubah karakteristik satu atom dibandingkan atom lainnya; akibatnya, qubit-qubit tersebut tidak lagi identik secara sempurna. Hal ini menuntut kemampuan untuk mengarakterisasi, mengendalikan, dan membedakan sistem-sistem yang tidak persis sama, sehingga meningkatkan kompleksitas rekayasa secara drastis. Tantangan ini menjadi semakin berat ketika kita berupaya menambah jumlah qubit dalam komputer—sebuah langkah krusial agar komputer kuantum benar-benar bermanfaat. Ambil contoh apa yang disebut sebagai *qubit superkonduktor*. Ini sebenarnya adalah atom buatan nyata yang diciptakan melalui rangkaian cetak berskala mikrometer (seperseribu milimeter).

Namun, justru karena merupakan hasil rekayasa, qubit-qubit ini tak terelakkan lagi memiliki cacat dan ketidaksempurnaan produksi. Setiap ketidakpresisian kecil dalam proses pembuatan dapat menimbulkan galat, yang pada gilirannya mengganggu stabilitas dan keandalan sistem. Selain itu, saat kita berusaha menambah jumlah qubit demi meningkatkan kemampuan komputer kuantum, muncul tantangan besar lainnya: memastikan bahwa seluruh *qubit* buatan tersebut bekerja secara terkoordinasi dan bebas galat, terlepas dari rumitnya proses pembuatannya. Tantangan lain—yang tampak sederhana namun kenyataannya jauh dari sepele—adalah menginisialisasi komputer kuantum dengan benar, yaitu mempersiapkannya untuk memulai perhitungan. Bayangkan saat kita hendak menulis di selembar kertas: agar tulisan kita terbaca jelas, kita memulainya dengan lembaran kosong, bukan lembaran yang penuh coretan.

Demikian pula, untuk melakukan perhitungan dengan komputer, kita harus menginisialisasinya dalam keadaan yang terdefinisi dengan jelas—seperti keadaan yang merepresentasikan angka nol—yang kemudian kita tambahi angka-angka lain untuk

menjalankan perhitungan yang diinginkan. Pada sempoa, kita menggeser semua manik-manik ke posisi awal tertentu yang melambangkan angka nol; pada komputer klasik, memori diinisialisasi dengan keadaan 00000...; dan pada komputer kuantum, kita harus melakukan hal yang sama: menginisialisasi *qubit* ke keadaan 00000...—artinya, dalam kasus atom, setiap atom harus berada dalam keadaan atomik yang terdefinisi dengan jelas.

Namun, di sinilah letak kesulitannya: menginisialisasi *qubit-qubit* ini sama sekali tidak sederhana. Ambil contoh atom buatan, seperti qubit superkonduktor yang telah kita sebutkan sebelumnya. Karena dibuat di dalam material, komponen-komponen ini biasanya berada pada suhu yang memicu agitasi termal pada atom dan molekul. Semakin tinggi suhunya, semakin kuat agitasi tersebut; akibatnya, qubit kita—alih-alih tetap berada pada keadaan 0 atau "keadaan diam" (*rest state*)—memiliki peluang tertentu untuk melompat ke "keadaan tereksitasi" (*excited state*), yakni beralih dari 0 menjadi 1.

Untuk menghindari masalah ini, komputer kuantum harus didinginkan hingga suhu yang sangat rendah, mendekati nol mutlak (−273,15°C), agar peluang eksitasi atom dapat diminimalkan. Dengan demikian, selain tantangan terkait manipulasi sistem atomik, terdapat pula kompleksitas teknologi kriogenik. Meskipun telah ada kemajuan, hal ini menghadirkan kesulitan teknis dan tantangan baru yang belum terpecahkan, sehingga menjadikan upaya pengembangan komputasi kuantum ini semakin luar biasa. Misalkan kita telah berhasil mengatasi tantangan besar dalam menginisialisasi keadaan komputer kuantum kita dengan presisi yang sangat tinggi. Pada tahap ini, kita harus menghadapi tugas berikutnya: mengimplementasikan rangkaian gerbang logika kuantum yang bersifat "universal". Hal ini berarti membangun serangkaian operasi yang, jika digabungkan dengan cara yang tepat, memungkinkan kita menjalankan algoritma apa pun. Namun, mewujudkan gerbang-gerbang logika ini sama sekali tidak sederhana. Setiap tahap melibatkan serangkaian hambatan eksperimental, yang masing-masing memiliki keterbatasan praktis tersendiri.

Bayangkan, misalnya, daya maksimum laser yang diperlukan untuk memanipulasi atom, atau durasi pulsa yang tidak boleh terlalu lama agar tidak terjadi panas berlebih dan kerusakan pada cip. Untuk mengatasi kendala ini, digunakan sistem kendali optimal, serupa dengan yang dikembangkan untuk mobil swakemudi. Sama halnya dengan mobil yang harus menemukan jalur terbaik untuk mencapai tujuan, dalam kasus gerbang logika kuantum, kita harus "memandu" atom menuju keadaan yang diinginkan—misalnya, dengan menemukan pulsa laser yang tepat untuk mengarahkannya persis ke posisi yang kita tuju. Dan, seperti halnya dalam teknologi kemudi otonom, pengembangan sistem kendali ini semakin terintegrasi dengan kecerdasan buatan, menciptakan titik temu yang menarik antara berbagai teknologi canggih yang sedang membentuk masa depan.

Langkah berikutnya adalah membaca hasil perhitungan—sebuah operasi yang, pada komputer klasik, tergolong sederhana: cukup mengakses memori dan mengambil datanya. Namun, di dunia kuantum, membaca keadaan akhir sistem tidaklah sesederhana itu dan memiliki karakteristik unik, sebagaimana telah disebutkan sebelumnya. Mari kita ambil contoh praktis pengukuran kuantum: bayangkan penggunaan *qubit* yang direpresentasikan oleh ion—yaitu atom bermuatan listrik—yang terperangkap di suatu wilayah ruang. Bagaimana cara kita

menentukan apakah suatu ion berada dalam keadaan 0 atau keadaan 1? Prosedurnya adalah sebagai berikut: ion tersebut disinari dengan berkas laser berfrekuensi tertentu. Jika ion berada dalam keadaan 1, laser akan mengeksitasinya, membawanya ke tingkat energi ketiga yang sangat tidak stabil; dari tingkat ini, ion akan segera meluruh dengan memancarkan foton, yakni cahaya. Cahaya ini dapat ditangkap oleh kamera khusus.

Sebaliknya, jika ion berada dalam keadaan 0, tidak terjadi apa-apa. Hasilnya? Jika ion berada dalam keadaan 1, kita akan melihat titik terang pada layar akibat cahaya yang dipancarkan. Jika ion berada dalam keadaan 0, layar kita akan tetap gelap. Metode pembacaan semacam ini, meskipun menarik, mencerminkan sifat pengukuran yang rumit dan penuh kehati-hatian di dunia kuantum, di mana pengamatan terhadap satu foton saja bisa menjadi penentu keberhasilan atau kegagalan sebuah perhitungan kuantum. Terakhir, syarat krusial lainnya adalah sistem kuantum harus tetap mempertahankan sifat aslinya selama seluruh durasi yang diperlukan untuk melakukan perhitungan. Dekoherensi—yaitu hilangnya sifat-sifat kuantum akibat interaksi yang tak terelakkan dengan lingkungan eksternal—tidak boleh mengganggu kinerja komputer sebelum proses komputasi selesai. Dengan kata lain, waktu dekoherensi (saat di mana komputer kuantum kehilangan keunggulan mekanika kuantumnya) harus lebih lama daripada waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungan.

Jika hal ini tidak terpenuhi, gangguan eksternal akan merusak superposisi dan keterikatan (*entanglement*) yang rentan, sehingga melenyapkan potensi kuantum sistem tersebut. Tanpa superposisi dan keterikatan, efisiensi komputer kuantum tidak lebih baik daripada komputer klasik, dan segala upaya pengembangannya akan sia-sia. Oleh karena itu, keberhasilannya bergantung pada kemampuan untuk melindunginya dari gangguan-gangguan tersebut selama seluruh durasi perhitungan—sebuah tantangan yang menarik sekaligus mendasar. Deretan panjang persyaratan yang harus dipenuhi—atau lebih tepatnya, tantangan yang harus diatasi—ini mungkin tampak cukup menggentarkan, dan pembaca tentu telah memahami betapa besarnya kompleksitas yang melekat dalam pembuatan komputer kuantum. Namun, kemajuan yang dicapai dalam beberapa tahun terakhir sungguh luar biasa dan melampaui segala perkiraan.

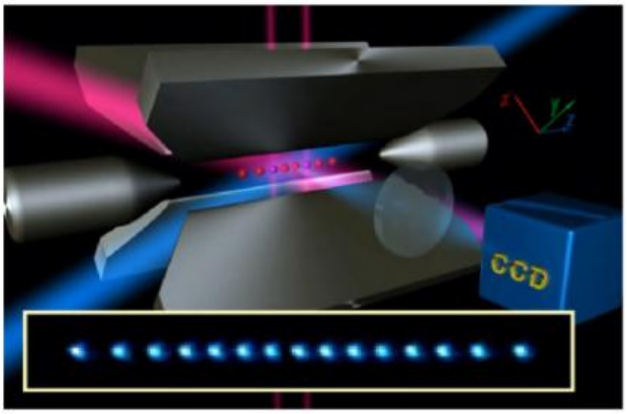
Selanjutnya, kita akan meninjau beberapa arsitektur paling menjanjikan yang sedang dikembangkan di bidang ini. Kemungkinan besar, dalam beberapa tahun ke depan, komputer kuantum yang tersedia bagi kita akan mengalami kemajuan signifikan lebih lanjut; dan cukup beralasan pula untuk meyakini bahwa fondasi yang mendasari sistem-sistem ini akan tetap kokoh untuk waktu yang lama. Evolusinya berlangsung cepat, namun fondasinya dirancang untuk bertahan lama.

Ion yang terperangkap

Pada suatu musim panas menjelang akhir abad tersebut, sebuah konferensi internasional mengenai fisika atom diselenggarakan di pegunungan Colorado yang megah. Dalam kesempatan itu, komunitas ilmiah mengetahui adanya dua penemuan penting. Peter Shor baru saja memaparkan algoritma kuantum revolusionernya untuk faktorisasi bilangan bulat, sebuah hasil yang mengancam akan membuat sistem kriptografi yang ada saat itu menjadi usang.

Pada waktu yang hampir bersamaan, Artur Ekert telah mengembangkan protokol untuk transmisi informasi secara aman dengan memanfaatkan sifat-sifat unik mekanika kuantum. Penemuan-penemuan ini membuka jalan bagi skenario yang mengubah tatanan (disruptif) dalam dunia teknologi dan keamanan informasi. Peter Zoller dan rekan mudanya, Ignacio Cirac, yang hadir dalam konferensi tersebut, mengemukakan sebuah gagasan yang memicu perlombaan global untuk membangun komputer kuantum. Usulan mereka? Menggunakan ion—yaitu atom yang bermuatan listrik—dengan cara mengurungnya dalam "jebakan" khusus di suatu ruang hampa udara dan mendinginkannya hingga suhu yang sangat rendah. Dua tingkat energi ion, yang bersesuaian dengan dua orbit elektron yang berbeda, dapat digunakan untuk merepresentasikan dua keadaan, yaitu 0 dan 1, dari sebuah qubit.

Namun, kunci utamanya adalah karena ion-ion tersebut bermuatan, maka terjadi interaksi elektrostatik di antara mereka. Interaksi ini menghasilkan keterikatan (*entanglement*), yang merupakan syarat mutlak bagi operasi komputer kuantum. Akan tetapi, karena memiliki muatan yang sama, ion-ion tersebut cenderung saling tolak-menolak dan bergerak menjauh. Bagaimana cara mengatasi masalah ini dan tetap menjaga agar ion-ion tersebut terperangkap di wilayah yang presisi sehingga dapat dimanipulasi? Jawabannya terletak pada penggunaan medan listrik yang dihasilkan oleh elektroda—berupa bilah dan ujung runcing (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2)—yang membentuk jebakan tersebut dan memungkinkan ion-ion tetap terkendali, sehingga membuka jalan bagi manipulasi dan komputasi kuantum.



Gambar 2.2 Ion yang terperangkap (diperbesar di bagian bawah) oleh medan listrik (pelat dan ujung runcing pada gambar). Manipulasi dan pengukuran (pengukuran dilakukan melalui kamera khusus yang disebut CCD) terhadap keadaan ion dilakukan dengan memancarkan cahaya laser (atas izin Rainer Blatt, Universitas Innsbruck).

Bayangkan sebuah wadah cekung yang penuh dengan bola: biasanya, bola-bola tersebut akan mengendap di dasar dan berkumpul menjadi satu. Namun, perilaku ion berbeda: karena bermuatan, ion-ion tersebut saling tolak-menolak. Alih-alih menggumpal, ion-ion tersebut mencapai keseimbangan dengan menempatkan diri pada jarak tertentu satu sama lain, membentuk struktur teratur yang dikenal sebagai "kristal ion". Dalam skema ini, setiap ion berperan sebagai satu *qubit*. Gerbang logika diwujudkan menggunakan pulsa laser: urutan pulsa yang tepat ditetapkan untuk setiap gerbang. Berkat interaksi listrik di antara

mereka, *qubit-qubit* tersebut dapat saling berinteraksi, sehingga memungkinkan pelaksanaan operasi seperti gerbang logika dua-qubit—contohnya, gerbang *CNOT*. Dengan demikian, melalui penggabungan rangkaian pulsa laser, algoritma kuantum apa pun dapat dijalankan.

Mengingat teknologi pemerangkapan dan pendinginan ion sudah mapan, dalam waktu satu tahun—tepatnya pada tahun 1995—para peneliti dari kelompok David Wineland di *National Institute of Standards and Technology* (NIST) di Boulder, Colorado, berhasil mewujudkan gerbang logika *CNOT* menggunakan ion berilium. Sebuah langkah fundamental telah tercapai. Sejak saat itu, kemajuan yang dicapai sungguh luar biasa. Banyak masalah rumit yang disebutkan sebelumnya telah—jika tidak sepenuhnya terpecahkan—setidaknya cukup teratasi untuk memungkinkan pembuatan purwarupa komputer kuantum. Saat ini, selain berbagai laboratorium pembelajaran yang bekerja tanpa lelah untuk menyempurnakan teknologi ini, terdapat pula perusahaan dan perusahaan rintisan (*startup*) yang lahir dari lingkungan akademis, serta pusat-pusat pembelajaran, yang menjual komputer kuantum berbasis ion terperangkap (*trapped-ion*) atau menawarkan akses ke mesin-mesin tersebut. Meskipun komputer-komputer ini mampu melakukan perhitungan yang kompleks, kemampuannya masih terbatas oleh jumlah ion—dan dengan demikian jumlah *qubit*—yang relatif sedikit yang dapat diperangkap dan dimanipulasi dengan tingkat presisi yang diperlukan. Namun, langkah-langkah ini menandai dimulainya era baru dalam komputasi, di mana impian mengenai komputasi kuantum semakin menjadi kenyataan yang nyata.

Saat ini, komputer kuantum hanya dapat menangani paling banyak beberapa puluh *qubit* dan hanya mampu menjalankan beberapa puluh operasi logis secara berurutan—seperti gerbang CNOT—sebelum fenomena dekoherensi muncul dan mengganggu potensi perhitungan tersebut. Untuk mendapatkan gambaran seberapa jauh jarak kita dari performa komputer klasik, bayangkan saja superkomputer klasik Frontier di Oak Ridge Laboratory, yang pada bulan Mei 2022 berhasil melampaui ambang batas *exaflop*. Hal ini berarti komputer tersebut mampu menjalankan satu miliar miliar (yaitu angka 1 diikuti oleh 18 angka nol) operasi per detik.

Perjalanan ke depan masih panjang, namun kemajuan yang dicapai dalam waktu singkat ini memberikan gambaran masa depan yang menjanjikan. Keterbatasan komputer kuantum saat ini tidak menyurutkan semangat para peneliti, yang terus mengeksplorasi solusi-solusi inovatif untuk mengatasi tantangan dekoherensi. Salah satu gagasan yang paling menjanjikan adalah apa yang disebut sebagai "perangkap tersegmentasi" (se*gmented traps*). Pendekatan ini melibatkan integrasi beberapa perangkap pada satu cip yang sama—masing-masing berisi beberapa puluh ion—dengan kemungkinan untuk memindahkan ion-ion tersebut di antara berbagai perangkap yang berbeda.

Hanya beberapa tahun yang lalu, gagasan untuk memindahkan *qubit* tunggal (ion) dengan cepat tanpa mengubah kondisinya mungkin tampak seperti fiksi ilmiah. Namun saat ini, hal tersebut telah menjadi kenyataan konkret yang sedang dikaji, yang menunjukkan betapa pesatnya perkembangan bidang komputasi kuantum. Kemajuan-kemajuan ini memberikan pandangan optimis akan masa depan di mana keterbatasan saat ini dapat diatasi.

Superkonduktor

Ketika arus listrik mengalir melalui kawat, arus tersebut menghadapi hambatan: kawat menjadi panas dan bahkan bisa berpijar. Seolah-olah material tersebut melawan pergerakan elektron dan berusaha menghalangi alirannya. Untuk mempertahankan arus, energi harus dipasok secara terus-menerus, dan hal ini tentu saja memerlukan biaya. Namun, terdapat material khusus yang disebut superkonduktor yang, di bawah suhu tertentu, memungkinkan arus listrik mengalir tanpa hambatan sama sekali.

Pada material ini, arus dapat dipertahankan dalam waktu yang sangat lama dan mencapai intensitas yang sangat tinggi. Fenomena luar biasa ini telah dimanfaatkan dalam berbagai teknologi, berkat fakta bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet. Medan magnet semacam itu digunakan, misalnya di Jepang dan Tiongkok, pada kereta levitasi magnetik; di sini, superkonduktor yang didinginkan hingga suhu sangat rendah (dipasang di dalam kriostat khusus) berfungsi mengangkat kereta. Teknologi yang sama menjadi dasar bagi mesin *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR) berpresisi tinggi yang digunakan untuk diagnosis klinis.

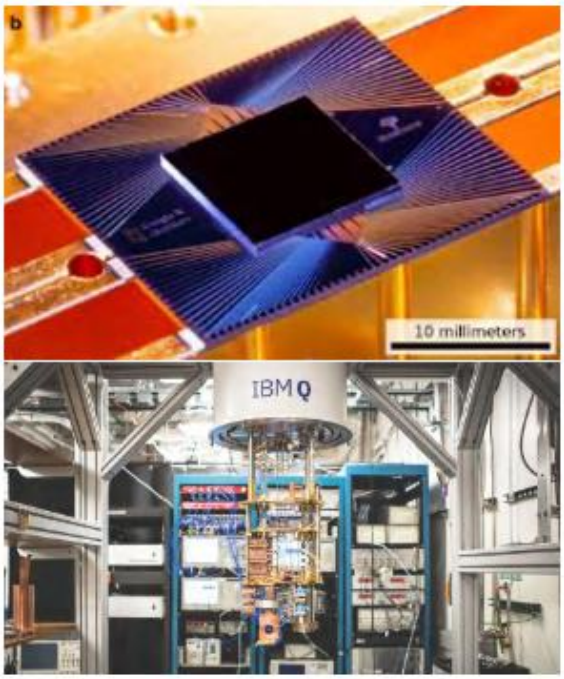
Berbeda dengan kabel listrik biasa di rumah kita, pada superkonduktor, bukan elektron individual yang mengalir melalui material untuk membentuk arus listrik. Pada material ini, ketika didinginkan di bawah suhu kritis tertentu, terjadi sesuatu yang luar biasa: elektron-elektron berpasangan membentuk apa yang disebut "pasangan Cooper" (*Cooper pairs*), yang dinamai menurut Leon Cooper, salah satu ilmuwan yang berkontribusi pada penemuan superkonduktivitas dan memenangkan Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1972. Pasangan Cooper ini mampu mengalir melalui material tanpa hambatan, sehingga memungkinkan terjadinya superkonduktivitas.

Teknologi berbasis superkonduktor berbeda dari teknologi ion terperangkap (*trapped ions*) dalam hal penggunaan komponennya: alih-alih menggunakan sistem atom nyata secara langsung, teknologi ini menggunakan rangkaian yang berperilaku layaknya "atom buatan" yang nyata. Rangkaian ini memungkinkan terciptanya superposisi keadaan kuantum dan keterikatan (*entanglement*), yang merupakan elemen penting bagi komputasi kuantum. Dalam pendekatan ini, qubit diwujudkan dengan memanfaatkan pasangan Cooper: rangkaian yang terbuat dari material superkonduktor dicetak sedemikian rupa sehingga beberapa bagiannya berfungsi sebagai kotak kecil (disebut "Kotak Pasangan Cooper" atau *Cooper Pair Boxes*), tempat pasangan Cooper dapat masuk secara terkendali. Qubit kemudian didefinisikan berdasarkan ada atau tidaknya pasangan Cooper di dalam kotak-kotak tersebut. Melalui rangkaian dan pulsa listrik yang tepat, qubit-qubit ini dapat dikelola dan dimanipulasi, menjadikan rangkaian superkonduktor sebagai platform yang sangat menjanjikan untuk komputer kuantum.

Saat ini, beberapa perusahaan multinasional terbesar sedang menjajaki jalur ini untuk mengembangkan komputer kuantum masa depan. Contoh luar biasa dari hal ini adalah cip Sycamore milik Google, yang ditampilkan pada Gambar 2.3; cip ini merupakan hasil karya laboratorium mereka yang dipimpin oleh seorang pelopor di bidang tersebut, John Martinis. Ia dianugerahi Hadiah Nobel Fisika tahun 2025—bersama John Clarke dan Michel Devoret—atas eksperimen yang dilakukan pada tahun 1980-an yang membuktikan bahwa efek kuantum

tidak terbatas pada partikel mikroskopis, sehingga membuka jalan bagi pengembangan qubit superkonduktor. Cip Sycamore, yang terdiri dari 53 qubit (awalnya 54, namun satu mengalami kerusakan), membuat Google mengumumkan pada Oktober 2019 bahwa mereka telah mencapai "supremasi kuantum" yang banyak diperbincangkan; artinya, mereka berhasil melakukan perhitungan yang secara praktis mustahil dilakukan oleh superkomputer klasik mana pun.

Sementara itu, dengan menggunakan teknologi yang sama, IBM telah mengembangkan infrastruktur yang mengesankan untuk pengembangan algoritma kuantum dan bahasa pemrograman di masa depan. Selain itu, dengan dampak pendidikan yang besar, IBM memungkinkan universitas untuk menjalankan algoritma dari jarak jauh pada komputer kuantum mereka, yang dapat diakses melalui *cloud* lewat antarmuka web.



Gambar 2.3 Cip Sycamore milik Google (atas) dan perangkat pendingin komputer kuantum superkonduktor IBM (bawah). Gambar diambil dari *https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5 (atas) dan https://www.ibm.com/quantum (bawah).*

Menatap masa depan, arsitektur superkonduktor masih harus menghadapi berbagai tantangan. Tantangan pertama, dan mungkin yang paling signifikan, adalah kebutuhan untuk mempertahankan suhu yang sangat rendah agar komputer kuantum dapat beroperasi. Hal ini membuat kecil kemungkinannya kita akan memiliki mesin semacam itu langsung di meja kerja kita; sebaliknya, mesin-mesin tersebut kemungkinan besar akan ditempatkan di pusat komputasi khusus dan diakses melalui *cloud*. Kendala suhu rendah itu sendiri bukanlah hambatan yang tidak dapat diatasi; masalah sebenarnya terletak pada biaya tinggi yang diperlukan serta kompleksitas rekayasa sirkuit yang jauh lebih rumit, yang juga menyulitkan skalabilitas—yaitu kemampuan untuk menambah jumlah qubit. Namun, terlepas dari berbagai

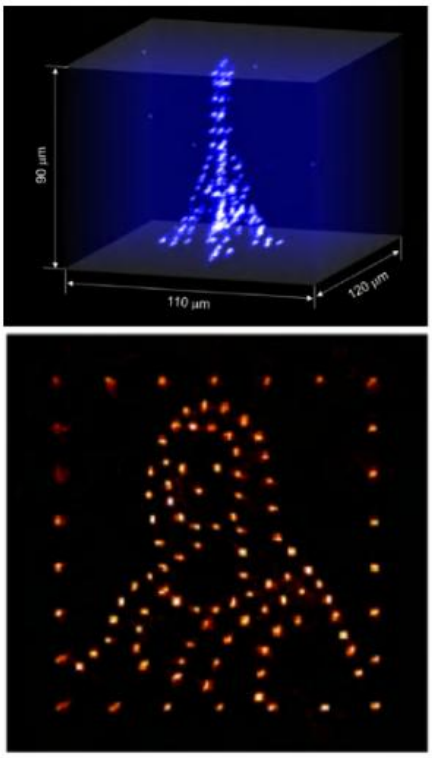
kesulitan tersebut, harapan perusahaan-perusahaan multinasional yang mengembangkan teknologi ini sangatlah ambisius. Perusahaan-perusahaan ini berencana mencapai ribuan qubit dalam beberapa tahun mendatang, yang mengisyaratkan bahwa revolusi kuantum dapat memengaruhi kehidupan kita jauh lebih cepat daripada yang diperkirakan oleh prediksi-prediksi yang lebih berhati-hati.

Atom Rydberg

Kami mengakhiri pemantauan mengenai berbagai arsitektur yang bersaing dalam pembuatan komputer kuantum dengan membahas kandidat baru—sebuah pihak luar yang baru saja memasuki perlombaan namun berkembang pesat. Dalam hal ini, qubit dibentuk oleh atom netral yang tidak memiliki muatan listrik. Untuk memanipulasi atom-atom ini, mereka dibawa ke keadaan eksitasi ekstrem, menciptakan apa yang dikenal sebagai "atom Rydberg"—dinamai menurut fisikawan Swedia Johannes Rydberg, yang hidup pada pergantian abad ke-19 dan ke-20.

Rydberg mempelajari apa yang terjadi pada atom ketika satu atau lebih elektron didorong ke orbit yang sangat jauh dari inti atom. Sebagai analogi, hal ini ibarat memindahkan Bumi ke orbit yang jaraknya ribuan kali lebih jauh dari Matahari, bahkan lebih jauh daripada jarak Pluto. Sebagai gambaran, ukuran atom pada umumnya berada dalam skala nanometer (sepersejuta milimeter), sedangkan ukuran atom Rydberg berada dalam skala mikron (seperseribu milimeter); dengan kata lain, atom-atom tersebut secara efektif menjadi seribu kali lebih besar. Atom Rydberg mempertahankan semua sifat kuantum yang ingin kita manfaatkan untuk melakukan komputasi kuantum, namun memiliki dimensi yang jauh lebih besar sehingga jauh lebih mudah untuk dimanipulasi.

Sebagai contoh, atom-atom ini dapat diperangkap dan dipindahkan dengan presisi tinggi menggunakan alat yang disebut "pinset optik" (*optical tweezers*). Alat ini menggunakan sinar laser untuk mengarahkan atom Rydberg tunggal ke posisi yang tepat, dengan resolusi dalam skala mikron. Teknik ini sangat canggih sehingga beberapa laboratorium berhasil membentuk pola-pola yang dapat dikenali, seolah-olah atom Rydberg tunggal tersebut adalah piksel. Gambar 2.4 menampilkan beberapa hasil menarik yang diperoleh di laboratorium Antoine Browaeys di Paris. Kemajuan terkini dalam teknologi ini—yang berpotensi merevolusi pengembangan komputer kuantum—akan dibahas lebih lanjut dalam Bab 5. Selain itu, sistem berbasis atom Rydberg juga berada di garis depan dalam aplikasi penting fisika kuantum lainnya: simulasi kuantum.



Gambar 2.4 Atom Rydberg dalam konfigurasi artistik yang diperoleh dengan memosisikan atom-atom tersebut (titik-titik dalam gambar) menggunakan pinset optik. Gambar diambil *dari https://www. usinenouvelle.com/article/calcul-quantique-pasqal-s-impose-dans-la-cour-des-grands-avec-ses-atomes-froids.N1809802 (atas) dan dari https://journals.aps.org/pra/abstract/10.1103/PhysRevA.102.063107 (bawah).*

2.8 PERAN DAN POTENSI SIMULATOR KUANTUM

Optimalisasi proses produksi kini telah mencapai tingkat kerumitan yang luar biasa. Bayangkan, misalnya, upaya mengoptimalkan karakteristik aerodinamis pesawat antariksa, pesawat terbang, perahu balap, atau mobil balap. Banyak sektor mutakhir yang semakin bergantung pada kemampuan kita untuk menyempurnakan sistem yang sangat kompleks dan memprediksi perilakunya, bahkan dalam kondisi ekstrem: mulai dari komponen mobil balap yang dirancang agar tahan terhadap suhu ekstrem, hingga bangunan yang direkayasa agar mampu bertahan menghadapi gempa bumi.

Namun, hal ini bukan sekadar soal teknologi canggih. Banyak keputusan kita sehari-hari juga didasarkan pada kemampuan membuat prediksi yang akurat. Ambil contoh cuaca: dalam jangka pendek, cuaca memengaruhi rencana perjalanan akhir pekan dan peringatan perlindungan sipil; dalam jangka menengah, cuaca menentukan hasil panen dan strategi investasi di sektor pertanian-pangan; dalam jangka panjang, cuaca membentuk respons kita terhadap perubahan iklim.

Di bidang-bidang yang sama pentingnya, kemampuan merancang antena yang semakin efisien—dan dengan demikian memahami bagaimana medan elektromagnetik merambat di atmosfer atau di dalam material—memengaruhi pengembangan ponsel, cip komputer, dan

infrastruktur komunikasi generasi baru. Lebih jauh lagi, pemahaman mengenai bagaimana atom bergabung membentuk molekul, makromolekul, dan akhirnya protein atau enzim, merupakan hal mendasar untuk mempercepat penciptaan material, obat-obatan, dan vaksin baru. Dengan demikian, kemampuan kita untuk melakukan optimalisasi dan prediksi menjadi kunci dalam menjawab tantangan teknologi dan sains di masa kini.

Secara umum, sistem-sistem yang baru saja dijelaskan—seperti halnya sebagian besar fenomena yang menarik dari sisi ilmiah, sosial, dan ekonomi (misalnya arus migrasi atau pasar saham)—pada dasarnya memiliki sifat yang kompleks. Dinamika sistem tersebut—yaitu perkembangannya seiring berjalannya waktu—sering kali sangat sulit diprediksi. Perhitungan yang diperlukan untuk mengantisipasi perilaku sistem-sistem ini tidak dapat dilakukan hanya dengan pena dan kertas, melainkan membutuhkan penggunaan komputer yang sangat tangguh.

Akan tetapi, agar dapat beroperasi, komputer-komputer tersebut bergantung pada algoritma khusus yang dirancang untuk memecahkan masalah yang ada. Namun, dalam banyak kasus, algoritma yang tersedia begitu rumit sehingga membutuhkan waktu komputasi yang sangat lama, bahkan bisa melampaui kemampuan superkomputer paling canggih di dunia saat ini. Hal inilah yang menjelaskan, misalnya, mengapa kita tidak mampu memprediksi cuaca secara akurat untuk jangka waktu lebih dari beberapa hari ke depan. Kompleksitas sistem serta keterbatasan teknologi kita saat ini menjadikan prediksi semacam itu sebagai upaya yang masih berada di luar jangkauan kita.

Dalam situasi tertentu, terdapat cara yang sama sekali berbeda untuk mengatasi kesulitan-kesulitan ini—sebuah pendekatan yang dapat menghasilkan hasil yang jauh lebih cepat dan efisien. Pendekatan ini melibatkan simulasi sistem yang diteliti dalam lingkungan terkendali serta pengamatan terhadap perilakunya. Dalam praktiknya, model akurat dari sistem yang ingin dipelajari—yaitu simulator kita—dibuat dan digunakan untuk menguji serta menyempurnakan teknologi yang ada. Contoh ikonik dari pendekatan ini adalah terowongan angin (*wind tunnel*): untuk mengembangkan pesawat terbang, kapal, atau mobil baru serta mengoptimalkan kinerjanya, kita menganalisis bagaimana udara atau air berinteraksi dengan kendaraan tersebut dalam berbagai kondisi. Secara teoretis, pergerakan suatu objek yang melintasi fluida, seperti air atau udara, dapat dideskripsikan secara presisi melalui persamaan matematika yang sudah dikenal luas: persamaan dinamika fluida. Namun, menyelesaikan persamaan-persamaan ini untuk sistem yang realistis merupakan tugas raksasa yang membutuhkan daya komputasi luar biasa besar.

Oleh karena itu, alternatifnya adalah membangun terowongan angin; di sini, model berskala dari pesawat baru—misalnya—diuji dalam kondisi turbulensi atmosfer yang disimulasikan. Dengan cara ini, masalah tidak diselesaikan melalui komputer umum—betapapun hebatnya komputer tersebut—melainkan melalui simulator fisik, yang dalam kasus kita adalah terowongan angin. Alat ini mampu menyelesaikan masalah spesifik dengan efisiensi tinggi, serta memberikan hasil cepat dan terperinci yang jika tidak demikian akan sulit diperoleh. Berkat simulasi-simulasi ini, kita dapat memperoleh informasi berharga tanpa harus melakukan perhitungan numerik yang sangat rumit, sehingga secara signifikan mempercepat

kemajuan teknologi. Hasil akhirnya adalah terciptanya kendaraan yang lebih cepat atau lebih hemat energi, yang sekaligus meningkatkan setiap aspek kinerjanya.

Gagasan untuk mengembangkan simulator—alih-alih komputer universal yang mampu memecahkan beragam masalah—juga memiliki penerapan yang sangat efektif dalam dunia kuantum. Sebagaimana telah disebutkan, membangun komputer kuantum yang sesungguhnya merupakan hal yang sangat rumit, dan tantangan dalam menyimulasikan sistem yang kompleks akan tetap menjadi hambatan besar di masa mendatang. Oleh karena itu, jalur yang berpotensi lebih efektif adalah menciptakan mesin yang lebih sederhana: simulator kuantum, yang mampu mereplikasi perilaku spesifik dari suatu sistem tertentu sehingga memungkinkan kita untuk mempelajarinya secara mendalam. Contoh luar biasa dari gagasan ini terwujud pada akhir tahun 2020, dengan digunakannya simulator berbasis atom Rydberg. Perangkat ini mampu mereplikasi perilaku material yang terdiri dari lebih dari 200 atom—sebuah pencapaian yang berada di ambang batas kemustahilan bagi superkomputer klasik mana pun.

Salah satu bidang yang paling menjanjikan—dan mungkin yang paling alami—untuk penerapan simulator kuantum adalah studi mengenai material beserta sifat-sifatnya yang luar biasa. Kita telah menyinggung material superkonduktor sebagai elemen kunci dalam mewujudkan qubit, namun hal yang belum kita tekankan adalah minimnya pemahaman kita mengenai mekanisme yang mendasari superkonduktivitas, khususnya yang terjadi pada suhu mendekati suhu ruang. Kesenjangan pemahaman ini membatasi kemampuan kita untuk mengoptimalkan material tersebut guna meningkatkan kinerjanya.

Di sinilah potensi simulator kuantum berperan: dalam waktu dekat, perangkat ini dapat menjadi sarana fundamental untuk memperdalam pemahaman kita tentang superkonduktivitas dan mempercepat pengembangan material maju, dengan penerapan yang mampu memberikan dampak besar bagi berbagai sektor. Sebagai contoh, simulator ini dapat memecahkan masalah kimia yang kompleks, yang mana simulasi molekul sangat rumit menggunakan komputer klasik hampir mustahil untuk dilakukan. Kemampuan untuk mereplikasi reaksi kimia yang kompleks melalui simulasi kuantum dapat membuka jalan bagi penemuan-penemuan mengejutkan di bidang kimia dan kedokteran.

Dalam beberapa tahun terakhir, muncul sebuah bidang pembelajaran baru yang menarik: pembuatan simulator kuantum untuk mengeksplorasi sifat-sifat penyusun dasar alam semesta, yaitu partikel elementer. Sejauh ini, salah satu alat paling luar biasa untuk mempelajari partikel-partikel tersebut adalah Hadron Collider milik CERN, sebuah raksasa teknologi yang memungkinkan penemuan boson Higgs pada tahun 2012—yang dikenal luas sebagai "partikel Tuhan". Upaya kolosal ini membutuhkan waktu pengerjaan selama beberapa dekade, kontribusi dari ribuan fisikawan dan insinyur, serta pembangunan cincin pemercepat partikel sepanjang 27 kilometer, lengkap dengan teknologi mutakhir untuk mengoperasikannya dan menganalisis datanya. Di dalam akselerator ini, berkas partikel bertabrakan dengan kecepatan yang sangat tinggi, menghasilkan reaksi yang ingin dipelajari oleh para fisikawan. Namun, saat ini, beberapa ilmuwan mengincar sesuatu yang bahkan lebih mengejutkan: simulator kuantum untuk mempelajari tumbukan antarpartikel. Ini adalah

proyek yang sangat ambisius dan membutuhkan pengembangan bertahun-tahun untuk mencapai kematangan yang diperlukan guna menghasilkan temuan yang bermanfaat bagi pembelajaran. Akan tetapi, gagasan untuk dapat menggantikan eksperimen kolosal CERN dengan eksperimen yang dilakukan di atas meja optik sederhana di ruangan biasa sungguhlah memikat.

Masalah lain yang tak kalah menarik—di mana simulator kuantum terbukti bermanfaat—adalah eksplorasi mengenai batas misterius antara dunia klasik dan dunia kuantum. Pada bagian awal buku ini, kami telah memperkenalkan konsep-konsep seperti superposisi dan keterikatan (*entanglement*), serta menekankan bahwa sifat-sifat ini tidak dapat eksis di dunia klasik. Namun, di manakah sebenarnya letak batas antara kedua ranah ini, klasik dan kuantum? Sebuah atom jelas beroperasi dalam dunia kuantum, sementara kita—yang terdiri dari miliaran atom—hidup di dunia klasik. Akan tetapi, di antara kedua ekstrem ini, pasti terjadi semacam transisi yang sifatnya masih diselimuti misteri: apakah transisi itu terjadi secara tiba-tiba atau bertahap? Sebagai contoh, di manakah posisi sepuluh atom? Dan bagaimana dengan sebuah sel? Kemungkinan besar, sekumpulan sepuluh atom termasuk dalam dunia kuantum, sedangkan sebuah sel tampaknya termasuk dalam dunia klasik.

Teka-teki ini menghadapkan kita pada sebuah pertanyaan yang sangat menggugah rasa ingin tahu. Kami telah menyebutkan bagaimana kelompok Anton Zeilinger, bertahun-tahun yang lalu, menunjukkan bahwa efek superposisi kuantum dapat diamati pada molekul *fullerene* yang terdiri dari enam puluh atom karbon. Saat ini, sejumlah peneliti berupaya melampaui batasan tersebut lebih jauh lagi dengan mencoba menciptakan kondisi laboratorium yang memungkinkan bakteri berada dalam superposisi dua keadaan yang berbeda. Terakhir, dalam dunia pembelajaran kuantum, sebuah "perlombaan" nyata sedang berlangsung untuk menciptakan superposisi kuantum sebesar mungkin di laboratorium—semacam "kucing Schrödinger" raksasa yang terdiri dari jumlah qubit terbanyak. Pada tahun 2020, sebuah pencapaian penting yang mengesankan berhasil diraih menggunakan simulator kuantum berbasis atom Rydberg: terciptanya keadaan terjerat (*entangled state*) yang melibatkan dua puluh qubit.

Hasil ini merupakan tonggak sejarah, namun perjalanan kita baru saja dimulai. Perlombaan ini terus berlanjut dan menjanjikan berbagai kejutan, karena kemampuan untuk menciptakan keadaan kuantum dengan jumlah qubit yang semakin besar merupakan hal mendasar bagi pelaksanaan komputasi yang kian kompleks. Apa tujuan akhirnya? Pembuktian yang jelas dan tak terbantahkan mengenai keunggulan komputer kuantum dibandingkan komputer klasik: supremasi kuantum.

Supremasi kuantum

Pada musim gugur tahun 2019, sebuah kebocoran informasi tak terduga dari pusat data NASA menggemparkan dunia akademis dan, tak lama kemudian, sampai ke telinga masyarakat umum: Google siap mengumumkan bahwa mereka telah mencapai "supremasi kuantum" yang telah lama dinanti-nantikan. Selama satu dekade, Google telah bekerja tanpa lelah demi mencapai hasil ini, meluncurkan program pengembangan perangkat keras dan perangkat

lunak yang mengesankan yang, dalam beberapa tahun, menempatkan mereka di garis depan perlombaan pengembangan komputer kuantum masa depan.

Pada pertengahan tahun 2019, Sycamore diperkenalkan—sebuah cip 53-qubit yang menjadi langkah maju menjanjikan bagi komputasi kuantum. Namun, memiliki cip mutakhir saja tidaklah cukup: diperlukan pula pembuktian kemampuan untuk melakukan perhitungan yang tidak dapat direplikasi oleh superkomputer klasik mana pun di dunia—sebuah upaya yang menjadi rumit akibat terbatasnya jumlah qubit dan masalah dekoherensi.

Untuk mengatasi tantangan ini, tim Google memilih algoritma khusus—algoritma yang tidak memiliki aplikasi praktis langsung, namun cukup kompleks untuk menguji kemampuan cip tersebut. Algoritma ini melibatkan penerapan urutan gerbang logika acak, yang menghasilkan keadaan kuantum yang sangat kompleks. Untuk mereplikasi perhitungan yang sama pada komputer klasik, diperlukan pendefinisian sebanyak 253 angka (angka-angka ini diperlukan untuk menentukan keadaan umum sistem kuantum dengan 53 qubit). Jumlah informasi ini setara dengan penulisan lebih dari sepuluh juta miliar angka, yang akan memakan memori sebesar puluhan petabyte.

Selain itu, verifikasi kebenaran keadaan kuantum ini akan memerlukan pelaksanaan operasi dalam jumlah yang sangat masif (skala astronomis), yang semakin meningkatkan kompleksitas masalah tersebut. Tim Google memperkirakan bahwa superkomputer klasik akan membutuhkan waktu sekitar 10.000 tahun untuk menyelesaikan perhitungan yang sama dengan yang diselesaikan oleh cip kuantum Sycamore hanya dalam beberapa menit. Dengan hasil luar biasa ini, supremasi kuantum tampaknya akhirnya telah terbukti, menandai titik balik bersejarah dalam bidang teknologi informasi.

Pengumuman Google tersebut memicu kehebohan dan kemungkinan besar akan dikenang sebagai titik balik dalam pengembangan komputer kuantum. Namun, tak lama kemudian, salah satu pesaing utama Google, IBM, mengklaim bahwa superkomputer klasik mereka dapat melakukan perhitungan yang sama dalam beberapa hari, sehingga meredam antusiasme awal tersebut. Perlu dicatat, bagaimanapun, bahwa klaim ini tidak pernah didukung oleh demonstrasi konkret atau perhitungan yang dapat diverifikasi, sehingga tetap hanya sebatas pernyataan mengenai kemungkinan pelaksanaannya.

Yang lebih menarik, sebuah artikel ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2020 menunjukkan bahwa, melalui metode aproksimasi dan kompresi informasi (berdasarkan apa yang disebut jaringan tensor, yang dikembangkan oleh para fisikawan untuk menyimulasikan sistem kuantum), hasil Google dapat direproduksi secara akurat menggunakan laptop biasa hanya dalam waktu beberapa jam. Studi ini membuka perspektif baru, yang menunjukkan bahwa "supremasi kuantum" tidaklah sesederhana atau sejelas yang terlihat—setidaknya untuk saat ini. Terlepas dari perdebatan seputar pencapaian nyata supremasi kuantum, satu hal yang pasti: pengembangan perangkat keras kuantum sedang berlangsung dengan pesat. Meskipun istilah "supremasi kuantum"—yang kini semakin sering digantikan oleh "keunggulan kuantum" (*quantum advantage*) untuk menghindari konotasi historis yang kurang nyaman—mungkin belum sepenuhnya terbukti, sulit untuk menyangkal bahwa kita sedang menyaksikan fajar era teknologi baru. Jika apa yang disebut Hukum Neven—yang dirumuskan pada tahun

2018 oleh Hartmut Neven, direktur program komputasi kuantum Google—terbukti benar, kita dapat mengharapkan percepatan luar biasa dalam pengembangan komputer kuantum di masa mendatang. Hukum ini memprediksi bahwa daya komputasi komputer kuantum akan tumbuh secara eksponensial ganda (yaitu, eksponensial dari eksponensial—jauh lebih cepat daripada pertumbuhan eksponensial sederhana yang digambarkan dalam legenda firaun dan papan catur). Jika tren ini berlanjut, di tahun-tahun mendatang, komputasi dan simulasi kuantum tidak hanya akan berfungsi sebagai alat pembelajaran canggih, tetapi juga akan mengubah dunia kita secara radikal.

Namun, seperti yang sering terjadi dalam perkembangan teknologi, masa depan tetap sulit diprediksi: Hukum Neven didasarkan pada pengamatan empiris, dan sulit untuk memperkirakan sampai kapan hukum tersebut akan tetap berlaku. Pada tahun 2020, sebuah tim yang dipimpin oleh Jian-Wei Pan di University of Science and Technology di Hefei, Tiongkok, mengumumkan eksperimen baru yang diklaim telah mencapai keunggulan kuantum yang selama ini dicari-cari—kali ini dengan memecahkan masalah spesifik yang dikenal sebagai *Boson Sampling*. Berbeda dengan eksperimen lainnya, eksperimen ini menggunakan jenis perangkat keras kuantum yang berbeda: foton yang dimanipulasi di dalam sirkuit optik.

Penggunaan foton juga mulai menjadi teknik standar dalam bidang teknologi kuantum krusial lainnya—yaitu komunikasi aman—yang menjanjikan ketahanan terhadap segala bentuk upaya peretasan. Kita akan membahas topik ini lebih lanjut pada bab berikutnya. Al-Khwarizmi, yang hidup antara tahun 780 dan 850 M, bekerja di Baghdad di Bayt al-Hikma, sebuah institusi luar biasa yang didirikan oleh Khalifah Al-Ma’mun. Pusat ini merupakan jantung yang dinamis bagi pembelajaran ilmiah dan budaya pada masa itu, tempat naskah-naskah Yunani, India, dan Persia diterjemahkan serta dipelajari. Istilah "algoritma" berasal dari bentuk Latin nama beliau, "Algoritmi", dan menyebar melalui terjemahan bahasa Latin dari risalah beliau mengenai aritmetika.

Perlu dicatat bahwa aritmetika Presburger tidak memuat proposisi yang tidak dapat diputuskan. Namun, sistem ini tidaklah "cukup kuat", karena dirancang untuk bilangan asli (yaitu himpunan bilangan 0, 1, 2, 3...) yang hanya melibatkan operasi penjumlahan. Proposisi yang tidak dapat diputuskan justru muncul dalam sistem aritmetika yang lebih kuat—aritmetika Peano—yang juga mencakup operasi perkalian. Faktanya, satu jenis gerbang saja—seperti gerbang *NAND*—sudah cukup dan dapat diwujudkan menggunakan transistor. Gerbang *NAND* pada dasarnya merupakan kebalikan (negasi) dari gerbang *AND*: gerbang ini menghasilkan keluaran 1 saat gerbang *AND* menghasilkan keluaran 0, dan sebaliknya. *Breakthrough Prize* didirikan oleh Sergey Brin, Priscilla Chan, Mark Zuckerberg, Yuri dan Julia Milner, serta Anne Wojcicki. Besaran hadiahnya adalah 3 juta dolar AS, kira-kira tiga kali lipat dari Hadiah Nobel.

BAB 3
KOMUNIKASI KUANTUM: GARIS DEPAN BARU DALAM KEAMANAN

3.1 AKAR KEAMANAN: KRIPTOGRAFI KLASIK

Pada abad ke-5 hingga ke-4 SM, Yunani mengalami masa keemasan yang ditandai dengan pesatnya perkembangan seni, sastra, dan filsafat. Tokoh-tokoh seperti Plato, Aristoteles, Euklides, dan Hippokrates mendominasi kancah intelektual pada masa itu. Karya-karya tragedi agung dari Aeschylus, Sophocles, dan Euripides dipentaskan di teater-teater Athena. Dalam konteks budaya dan politik inilah hidup Herodotus, salah satu sejarawan terbesar zaman kuno, yang dikenal karena kisahnya mengenai Perang Persia melawan Yunani. Bahkan pada masa itu, peperangan tidak hanya dilakukan dengan senjata, tetapi juga dengan cara-cara lain yang tingkat kecanggihannya beragam. Sebagaimana dikisahkan oleh Herodotus, para utusan diberi tugas untuk menyampaikan pesan, dan mereka sering kali harus melintasi wilayah musuh dengan risiko pesan dicegat atau mereka sendiri tertangkap. Oleh karena itu, perlindungan terhadap isi pesan menjadi suatu keharusan. Sebuah teknik untuk menyembunyikan pesan dijelaskan oleh Herodotus dalam Buku V, bagian 35 dari karyanya, *Histories* (ditulis sekitar tahun 440–429 SM):

> *...tepat pada saat itu, seorang utusan tiba dari Susa—dikirim oleh Aristagoras—dengan tanda-tanda yang ditato di kepalanya yang mendesak Aristagoras untuk memberontak melawan raja. Sebab Histiaeus, yang ingin mengirim pesan kepada Aristagoras untuk memerintahkannya agar bangkit melawan raja, tidak memiliki cara yang cukup aman untuk memberi peringatan, karena semua jalan berada dalam pengawasan ketat; maka ia mencukur kepala pelayan kepercayaannya, menato tanda-tanda di sana, menunggu rambutnya tumbuh kembali, dan segera setelah rambut itu tumbuh, ia mengirim utusan tersebut ke Miletus dengan satu-satunya misi: begitu tiba di sana, ia harus meminta Aristagoras untuk mencukur kepalanya dan melihat tanda-tanda tersebut.*

Herodotus juga mengisahkan bahwa Demaratus, seorang tokoh Yunani yang hidup dalam pengasingan di istana Persia, memperingatkan Sparta mengenai invasi yang akan segera dilancarkan oleh Xerxes, raja Persia, dengan cara berikut: ia menyingkirkan lapisan lilin dari sebuah papan tulis, mengukir pesannya pada permukaan kayu di baliknya, menutupinya kembali dengan lilin untuk menyembunyikan pesan tersebut, dan akhirnya mengirimkan papan itu yang—karena tampak seperti papan yang belum terpakai—berhasil sampai ke tujuannya. Upaya-upaya awal untuk menjaga kerahasiaan pesan ini didasarkan pada gagasan menyembunyikan pesan itu sendiri. Teknik ini disebut steganografi, yang berasal dari kata bahasa Yunani *steganos* (tertutup atau tersembunyi) dan *graphein* (menulis). Sebuah metode

steganografi yang lebih modern (dan tidak terlalu rumit) dijelaskan oleh filsuf sekaligus ilmuwan Italia, Giambattista Della Porta, dalam karyanya *De Furtivis Literarum Notis* : metode ini melibatkan penulisan pesan pada kulit telur rebus menggunakan campuran satu liter cuka dan 60 gram tawas sebagai "tinta". Karena sifat kulit telur yang berpori, tinta tersebut dapat meresap ke dalamnya tanpa meninggalkan bekas apa pun di permukaan luar. Penerima telur rebus tersebut kemudian dapat mengupas kulitnya dan membaca pesan yang tertulis di dalamnya.

Steganografi memainkan peran penting pada masa lampau dan terus berkembang selama berabad-abad seiring dengan kemajuan teknologi. Salah satu teknik yang lebih canggih dan digunakan pada masa kini adalah *microdot* (titik mikro). Teknik ini melibatkan pengecilan ukuran teks melalui proses fotografi hingga kurang dari satu milimeter. Dengan demikian, pesan dapat disembunyikan di bawah tanda titik atau koma dalam sebuah surat biasa. Badan intelijen Jerman, Abwehr, secara rutin menggunakan *microdot* selama Perang Dunia II untuk mengirimkan pesan rahasia. Metode ini terbukti sangat efektif dan hanya dapat terungkap melalui kegiatan spionase.

Di tengah masyarakat yang semakin saling terhubung saat ini, kebutuhan untuk berkomunikasi secara aman terus meningkat dan telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari kita. Kita semua ingin berkomunikasi secara aman saat daring dan mencegah pesan kita dibaca oleh pihak ketiga. Hal ini terutama berlaku untuk transaksi keuangan, penggunaan tanda tangan digital, dan sebagainya. Untuk melindungi privasi serta menjaga keamanan data pribadi—terutama data yang bersifat sensitif—dari pihak-pihak yang tidak berwenang, metode yang digunakan secara luas saat ini adalah kriptografi, yaitu seni dan ilmu komunikasi rahasia. Kriptografi merupakan proses yang mengubah informasi (misalnya isi pesan) agar tidak memiliki makna bagi siapa pun yang tidak memiliki kunci untuk mendekripsinya. Oleh karena itu, kriptografi bukanlah cara untuk mencegah serangan siber, melainkan teknik untuk membuat data tidak dapat digunakan oleh pihak yang mencegatnya secara tidak sah.

Berbeda dengan steganografi, kriptografi (yang berasal dari kata Yunani *kryptos*, berarti "tersembunyi") didasarkan pada gagasan untuk mengubah pesan sedemikian rupa sehingga maknanya tidak dapat dipahami. Kriptografi memiliki sejarah panjang dan menarik yang bermula ribuan tahun lalu pada peradaban kuno Mesir dan Mesopotamia. Sebagai contoh, Kode Hammurabi yang terkenal—sebuah kumpulan hukum yang dibuat di Babilonia sekitar tahun 1754 SM—menyebutkan penggunaan pesan rahasia untuk menyampaikan informasi. Para sejarawan meyakini bahwa bangsa Babilonia menggunakan sandi substitusi sederhana untuk menyandikan pesan mereka, di mana setiap huruf dalam alfabet digantikan oleh huruf atau simbol lain.

Sandi Atbash, yang digunakan dalam Kitab Yeremia, membalik urutan huruf dalam alfabet Ibrani: huruf pertama alfabet (*aleph*) ditukar dengan huruf terakhir (*tav*), huruf kedua (*beth*) dengan huruf kedua dari belakang (*shin*), dan seterusnya; Kata "*Atbash*" sendiri tampaknya merupakan akronim yang terdiri dari empat huruf: "Aleph-Tav-Beth-Shin". Dengan menggunakan sandi ini, dalam Kitab Yeremia, Babel—ibu kota Kekaisaran Babilonia—disebut

sebagai "Sheshach". Faktanya, huruf-huruf dalam kata "Sheshach" dapat disusun ulang untuk membentuk kata "Babel" atau "Babylon" (yang berarti "gerbang Allah"). Namun, untuk menghindari kesalahpahaman, perlu ditekankan bahwa Kitab Yeremia—salah satu kitab dalam Alkitab Ibrani dan Perjanjian Lama Kristen—pada dasarnya merupakan kumpulan pesan nubuat, puisi, dan narasi sejarah yang dikaitkan dengan Nabi Yeremia. Tujuan utama teks tersebut adalah menyampaikan pesan nubuat kepada khalayak umum, bukan menyembunyikan maknanya melalui kriptografi. Penggunaan sandi Atbash merupakan contoh kriptografi yang tergolong langka dalam sastra Ibrani kuno.

Namun, asal-usul kriptografi bermula jauh lebih awal lagi. Wisatawan yang berkunjung ke Beni Hasan, di tepi timur Sungai Nil di Mesir Tengah, dapat melihat kompleks makam yang mengesankan. Salah satu yang paling menonjol adalah Makam 3 yang megah, milik Khnumhotep II, seorang bangsawan yang hidup pada masa pemerintahan Firaun Amenemhat II, sekitar abad ke-20 SM. Dinding makam tersebut dihiasi dengan lukisan yang menggambarkan berbagai peristiwa dalam kehidupan Khnumhotep II serta kehidupan masyarakat pada masa itu secara umum. Lukisan-lukisan ini menampilkan realisme dan ketelitian yang luar biasa, memberikan gambaran hidup mengenai budaya dan kehidupan Mesir Kuno, sekaligus memperlihatkan hierarki sosial yang berlaku saat itu. Sekilas, hieroglif dalam lukisan-lukisan tersebut tampak hanya sebagai hiasan biasa. Namun, jika diamati lebih saksama, terlihat bahwa beberapa di antaranya ditulis secara terbalik atau dalam posisi jungkir-balik, dan sejumlah simbol digantikan oleh simbol lain yang memiliki makna berbeda namun serupa.

Dengan demikian, kita berhadapan dengan salah satu contoh kriptografi. Alasan bangsa Mesir merasa perlu menyamarkan tulisan-tulisan ini kemungkinan besar adalah untuk merahasiakan informasi mengenai upacara keagamaan mereka dari kalangan rakyat jelata, atau sekadar sebagai pilihan estetika maupun upaya untuk memukau para pengunjung. Contoh-contoh kriptografi lainnya juga ditemukan pada makam dan prasasti dari periode ini, yang mengindikasikan bahwa teknik tersebut merupakan sarana penting untuk melindungi rahasia dan pengetahuan dalam masyarakat Mesir Kuno. Kriptografi yang digunakan oleh Khnumhotep II dan bangsa Mesir Kuno tergolong sederhana menurut standar modern. Kendati demikian, hal ini menunjukkan adanya hasrat manusia sejak masa lampau untuk melindungi informasi dari akses pihak yang tidak berwenang.

Tentu saja, kriptografi juga memiliki peran luas dalam bidang militer. Sebagai contoh, selama Perang Peloponnesos yang mempertemukan dua kekuatan besar, Sparta dan Athena, pihak Sparta mengirimkan pesan terenkripsi menggunakan *scytale* (atau skytale). Alat ini berupa tongkat yang dililiti perkamen secara spiral; teks kemudian ditulis memanjang mengikuti poros tongkat, baris demi baris (lihat Gambar 3.1). Saat dilepas dari tongkat, perkamen tersebut menampilkan deretan huruf yang tampak tidak bermakna. Pesan itu kemudian dikirimkan kepada penerima yang memiliki tongkat identik dengan yang digunakan untuk enkripsi awal; dengan melilitkan kembali perkamen tersebut pada tongkat itu, pesan aslinya akan muncul kembali.



Gambar 3.1 Contoh *scytale*. Tulisan yang terlihat pada pita yang dililitkan itu berbahasa Italia ("LA SCITALE/E' UN ANTICO"), yang dapat diterjemahkan ke dalam bahasa Inggris sebagai "THE SCYTALE/IS AN OLD. . .".

Sebagaimana dikisahkan oleh Plutarch dalam *Life of Lysander* (Riwayat Hidup Lysander), setelah Perang Peloponnesos, sekitar tahun 400 SM, satrap Persia bernama Pharnabazus—sekutu Sparta—mengeluh kepada para *ephor* (pejabat tinggi Sparta) mengenai penjarahan yang dilakukan oleh *navarch* (laksamana) Sparta, Lysander, dan letnannya, Thorax:

> *Para ephor, yang awalnya marah, menghukum mati teman sekaligus rekan seperjuangan Lysander, Thorax, karena mereka menemukan perak di rumahnya; sementara kepada Lysander sendiri, mereka mengirimkan scytale yang memerintahkannya untuk kembali. Scytale dibuat dengan cara berikut: ketika para ephor mengirimkan laksamana atau jenderal untuk memimpin pasukan, mereka menyiapkan dua batang kayu bulat dengan ketebalan dan panjang yang sama, yang potongan ujungnya sangat presisi satu sama lain; satu batang mereka simpan, dan yang lainnya mereka berikan kepada warga yang mereka utus; batang-batang inilah yang disebut scytale. Ketika mereka hendak menyampaikan hal penting yang harus dirahasiakan, mereka mengambil selembar kulit kayu yang panjang dan sempit—mirip tali kulit—lalu melilitkannya secara spiral pada scytale mereka hingga menutupi seluruh permukaan kayu tanpa menyisakan celah yang terlihat. Setelah itu, mereka menuliskan pesan yang diinginkan pada pita atau kertas yang telah dililitkan tersebut. Kemudian, mereka melepas kertas berisi tulisan itu dan mengirimkannya kepada sang komandan tanpa menyertakan batangnya. Saat menerima kiriman tersebut, sang komandan tidak dapat membaca huruf-huruf yang tampak acak dan terputus-putus itu; namun, dengan mengambil scytale-nya sendiri dan melilitkan kembali kertas tersebut sesuai urutan semula, ia dapat membaca tulisan yang utuh dan berkesinambungan. Kertas itu pun disebut scytale, sama seperti nama batangnya, ibarat benda yang diukur disebut dengan nama alat ukurnya.*

Meskipun berhasil digunakan oleh bangsa Sparta, *scytale* tentu tidak menjamin keamanan mutlak: begitu cara kerjanya diketahui, musuh dapat membuat batang kayu dengan bentuk serupa dan memecahkan pesan tersebut. Sistem kriptografi yang lebih canggih kemudian diciptakan oleh Julius Caesar. Selama Perang Galia, komunikasi dengan pasukan menjadi sulit karena mustahilnya mempertahankan kendali penuh atas jalur komunikasi di wilayah asing. Pesan dapat dengan mudah dicegat, dan musuh bisa mengetahui informasi militer yang

strategis. Untuk mengatasi masalah ini, Caesar merancang sebuah metode penyandian yang menggunakan namanya: "sandi Caesar" (*Caesar cipher*). Metode ini melibatkan pergeseran huruf-huruf alfabet sejauh jumlah langkah tertentu (yang menjadi kunci sandi tersebut).

Sebagai contoh, dengan menggunakan kunci 3, huruf A berubah menjadi D, B menjadi E, C menjadi F, dan seterusnya; ketika mencapai akhir alfabet, penghitungan 3 langkah dilakukan kembali dari awal, misalnya Z berubah menjadi C. Dengan metode penyandian ini, pesan "*OMNIA GALLIA EST DIVISA IN PARTES TRES*" dienkripsi menjadi "*RPQLD JDOOLD HVW GLYLVD LQ SDUWHV WUHV*". Untuk mendekripsinya, cukup dengan mengetahui kuncinya—dalam hal ini 3—lalu menghitung mundur 3 langkah untuk setiap huruf: R kembali menjadi O, P menjadi M, Q menjadi N, dan seterusnya. Agar sandi ini lebih rumit dan sulit dipecahkan, berbagai varian pun diciptakan. Salah satu varian menarik dari sandi Caesar adalah mengganti huruf-huruf tersebut dengan salah satu permutasi yang mungkin; artinya, urutan huruf dalam alfabet diubah, mirip dengan cara menyusun anagram dari sebuah kata. Jika kita memiliki dua huruf, terdapat dua kemungkinan permutasi: AB dan BA; dengan tiga huruf, jumlahnya menjadi enam: ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA; sedangkan dengan 26 huruf dalam alfabet bahasa Inggris, jumlah permutasi yang mungkin menjadi sangat besar.

Meskipun demikian, varian-varian sandi Caesar ini pun mudah dipecahkan saat ini, karena huruf-huruf alfabet muncul dengan frekuensi yang berbeda dalam sebuah teks. Sebagai contoh, huruf vokal muncul lebih sering dibandingkan huruf konsonan. Oleh karena itu, untuk memecahkan kode tersebut, analisis statistik sederhana terhadap teks terenkripsi sudah cukup memadai. Namun, terlepas dari kesederhanaan dan kerentanannya, sandi Caesar tetap menjadi upaya yang menarik dalam melindungi informasi sensitif. Sandi ini merupakan tonggak penting dalam evolusi kriptografi dan terus menjadi sarana edukasi yang berharga untuk memperkenalkan siswa pada dunia keamanan siber yang kompleks. Sebagai contoh, sandi ini dapat dengan mudah diimplementasikan pada komputer sebagai latihan yang bermanfaat bagi siswa.

Gagasan untuk mengenkripsi pesan melalui permutasi alfabet ditemukan dalam cakram sandi yang indah karya Leon Battista Alberti, yang dijelaskan dalam risalahnya D*e cifri*s—salah satu naskah awal mengenai kriptografi. Alberti adalah tokoh kunci dalam kancah budaya Renaisans Italia. Kehidupannya diwarnai oleh rasa ingin tahu intelektual, semangat menuntut ilmu, dan komitmen untuk menciptakan karya-karya bernilai seni dan budaya tinggi. Selain menulis risalah tentang kriptografi, ia juga seorang arsitek, penulis, matematikawan, dan musisi. Konsep cakram sandinya (lihat Gambar 3.2) secara garis besar adalah sebagai berikut: huruf-huruf alfabet yang digunakan untuk *plaintext* (teks asli) ditulis dengan huruf kapital pada cakram luar. Pada cakram dalam yang dapat diputar, huruf-huruf alfabet ditulis dengan huruf kecil namun dalam urutan yang acak; huruf-huruf ini digunakan untuk *ciphertext* (teks sandi). Cakram dalam juga memuat simbol khusus (simbol "et" pada gambar). Sebuah kunci ditetapkan, misalnya huruf I. Cakram dalam diputar sedemikian rupa sehingga simbol khusus tersebut sejajar dengan huruf I pada cakram luar. Hal ini menciptakan korespondensi antara huruf kapital yang digunakan untuk *plaintext* dan huruf kecil pada cakram dalam yang digunakan untuk *ciphertext*.

Kunci tersebut—yaitu huruf kapital tadi—kemudian sering diubah selama proses enkripsi pesan, dengan memutar cakram dalam setiap kalinya untuk menempatkan kunci baru agar sejajar dengan karakter khusus tersebut. Pada dasarnya, Alberti tidak lagi menggunakan satu alfabet enkripsi tunggal untuk menyandikan pesan, melainkan sistem polialfabetik; alfabetnya berubah setiap kali huruf kapital diganti, sehingga kode tersebut jauh lebih sulit dipecahkan. Penerima, yang memiliki cakram serupa, dapat membaca pesan tersebut dengan mudah. Caranya cukup sederhana: setiap kali menerima huruf kapital, mereka memutar cakram bagian dalam agar huruf tersebut menjadi kunci baru, lalu melanjutkan proses dekripsi.



Gambar 3.2. Contoh cakram sandi karya Leon Battista Alberti. Korespondensi antara huruf-huruf pesan asli (*plaintext*) dan pesan terenkripsi diperoleh dengan memosisikan karakter khusus "et". Di sini, "et" berkorespondensi dengan huruf I, yang merupakan kunci kode tersebut. Dengan demikian, kita mengetahui bahwa huruf L disandikan sebagai m, M sebagai z, N sebagai d, dan seterusnya.

Penemuan Alberti menjadi landasan penting bagi pengembangan teknik kriptografi yang lebih canggih pada abad-abad berikutnya. Perlu diingat pula "sandi Jefferson" (*Jefferson cipher*) yang canggih, sebuah penemuan Thomas Jefferson—presiden ketiga Amerika Serikat, salah satu tokoh utama Revolusi Amerika, dan penulis Deklarasi Kemerdekaan Amerika Serikat yang disahkan pada 4 Juli 1776 (sebuah fakta menarik mengenai kepribadiannya: dalam deklarasi tersebut, Jefferson berbicara dengan sangat fasih membela hak-hak kodrati manusia dan, dalam tulisan-tulisannya, menyatakan bahwa perbudakan adalah kejahatan politik dan moral; namun, semasa hidupnya, ia membeli budak dan saat meninggal dunia memiliki lebih dari enam ratus budak di perkebunan Monticello miliknya di Virginia).

Jefferson sangat tertarik pada kriptografi sepanjang hidupnya dan, bahkan selama masa kepresidenannya (1801–1809), ia secara pribadi mengembangkan kode rahasia untuk komunikasi diplomatik dan keperluan militer. Roda (atau silinder) Jefferson terdiri dari cakram-

cakram kayu yang dipasang pada sebuah batang logam. Huruf-huruf alfabet diukir di sepanjang tepi setiap cakram, dengan menggunakan permutasi yang berbeda untuk setiap cakramnya. Cakram-cakram tersebut kemudian diputar hingga pesan asli muncul dalam satu baris (seperti contoh pada Gambar 3.3: "*COOL JEFFERSON WHEEL CIPHER*"). Urutan huruf pada baris lain kemudian dikirimkan (misalnya, pada gambar tersebut, dua baris di atas pesan asli terdapat urutan "*IECHTFA*..."). Urutan huruf ini merupakan pesan sandi (*ciphertext*) yang dapat didekripsi oleh penerima yang memiliki roda dengan urutan cakram yang sama (yaitu, permutasi alfabet yang sama); penerima menyelaraskan cakram-cakram tersebut sehingga pesan sandi muncul pada satu baris, lalu membaca pesan asli pada baris lainnya.



Gambar 3.3 Contoh silinder Jefferson yang digunakan sebagai sandi polialfabetik. Setiap cakram memuat permutasi huruf-huruf alfabet. Pada satu baris, pesan teks asli (*plaintext*) ditampilkan ("*COOL JEFFERSON WHEEL CIPHER*"); baris lainnya dapat digunakan sebagai pesan terenkripsi yang mudah dipecahkan oleh siapa pun yang memiliki silinder Jefferson dengan urutan cakram (permutasi alfabet) yang sama. Gambar diambil dari *https://www.monticello.org/research-education/thomas-jefferson-encyclopedia/ wheel-cipher/*

Silinder Jefferson menjadi dasar bagi mesin sandi M-94 yang terkenal—yang kala itu dianggap mustahil dipecahkan—dan tetap digunakan hingga tahun 1942. Perlu diingat kembali bahwa mesin sandi secara otomatis mengubah huruf-huruf teks asli menjadi huruf-huruf teks sandi (*ciphertext*) dan sebaliknya.

3.2 EVOLUSI PEMECAHAN KODE

Sejauh ini, kita telah membahas perkembangan kriptografi selama berabad-abad serta peningkatan teknik enkripsi pesan—yaitu menyembunyikan maknanya—yang terus berkembang. Proses ini pada gilirannya mendorong studi mengenai teknik dekripsi pesan dan cara memahami maknanya tanpa memiliki kunci. Sejarah kriptografi pada hakikatnya merupakan sejarah panjang pertarungan antara upaya menemukan cara terbaik untuk menyembunyikan makna pesan di satu sisi, dan pencarian cara-cara baru yang lebih canggih untuk mengungkap makna tersebut di sisi lain. Pertarungan ini masih terus berlangsung. Kriptoanalisis berkembang seiring dengan kriptografi—yang karenanya terdorong untuk terus memperbaiki diri—dan begitu pula sebaliknya.

Pada masa peradaban Arab abad pertengahan, yang berlangsung kira-kira dari abad ke-7 hingga abad ke-13, terjadi perkembangan penting dalam bidang kriptoanalisis dan kriptografi. Di masa kejayaan peradaban Arab ini, para cendekiawan Muslim mencapai kemajuan luar biasa dalam berbagai disiplin ilmu, termasuk matematika, aljabar, dan teori bilangan; hal ini turut berkontribusi pada penyempurnaan teknik enkripsi dan dekripsi. Sekitar tahun 1000 Masehi, di Arab Saudi, teknik analisis frekuensi pertama kali muncul dan mampu memecahkan kode yang menggunakan metode substitusi monoalfabetik.

Faktanya, hingga Abad Pertengahan Tinggi (*High Middle Ages*), sistem kriptografi yang berbasis pada pergeseran atau permutasi masih terus digunakan. Sistem tersebut telah berkembang sedemikian rupa hingga tampak mustahil untuk dipecahkan. Namun, sistem itu memiliki kelemahan: huruf-huruf dalam sebuah pesan muncul dengan frekuensi yang berbeda (sebagai contoh, dalam teks berbahasa Inggris, huruf A, T, dan E muncul lebih sering dibandingkan huruf-huruf lainnya). Dengan menganalisis frekuensi huruf dalam pesan terenkripsi (menggunakan metode substitusi monoalfabetik) dan membandingkannya dengan frekuensi yang diharapkan pada pesan teks asli (*plaintext*), dimungkinkan untuk mengaitkan setiap huruf terenkripsi dengan huruf teks asli yang memiliki frekuensi serupa, sehingga teks tersebut dapat dipecahkan. Kegiatan kriptanalisis ini bermula dari kajian mendalam terhadap Al-Qur'an, di mana para cendekiawan berupaya menentukan—di samping berbagai karakteristik lainnya—frekuensi penggunaan huruf-huruf di dalamnya.

Sejak abad ke-9, filsuf dan matematikawan Arab terkemuka, Al-Kindi, menerbitkan "Risalah tentang Pemecahan Pesan Terenkripsi". Karya ini melahirkan bentuk kriptanalisis sejati yang pertama: ia mengusulkan pemeriksaan teks asli (*plaintext*) yang cukup panjang dan pengurutan huruf-hurufnya berdasarkan frekuensi kemunculannya. Dengan melakukan hal yang sama pada pesan terenkripsi, korespondensi antara huruf terenkripsi dan huruf aslinya dapat ditemukan, sehingga pesan tersebut dapat dipecahkan. Pengetahuan luas bangsa Arab di bidang kriptologi didokumentasikan dalam bagian terkait dari sebuah ensiklopedia besar yang rampung pada tahun 1412 dan terdiri dari 14 jilid: "Fajar bagi Mereka yang Rabun dalam Seni Komposisi" karya al-Qalqashandi, seorang sejarawan dan matematikawan Mesir yang bekerja sebagai juru tulis di kantor administrasi Mamluk di Kairo. Perlu ditekankan bahwa karya-karya ini menjadi bukti adanya keterkaitan antara budaya ilmiah dan budaya sastra dalam peradaban Arab pada masa itu.

Kemajuan dalam kriptanalisis yang dicapai oleh para cendekiawan Arab meletakkan dasar bagi evolusi besar dalam kriptografi yang terjadi pada masa Renaisans, dengan Leon Battista Alberti sebagai tokoh utamanya. Sejak saat itu, keamanan informasi tidak lagi dipandang hanya untuk kepentingan militer; pentingnya aspek ini bagi tujuan komersial dan ekonomi pun perlahan menjadi semakin nyata. Hal ini memberikan dorongan kuat bagi evolusi kriptografi menuju sistem yang terlindungi dari segala kemungkinan serangan.

3.3 VERNAM, SHANNON, DAN KERAHASIAAN MUTLAK

Sandi pertama yang tidak dapat dipecahkan, yaitu sandi Vernam, diciptakan pada tahun 1917 selama Perang Dunia I oleh Gilbert Vernam, seorang insinyur Amerika; meskipun

demikian, bukti matematis mengenai sifatnya yang tidak dapat dipecahkan itu baru diperoleh lebih dari tiga puluh tahun kemudian oleh Claude Shannon, bapak teori informasi modern. Sandi ini memainkan peran krusial dalam menjaga kerahasiaan komunikasi selama perang berlangsung. Protokol Vernam menggunakan langkah-langkah berikut:

(1) Pesan ditulis sebagai urutan biner yang terdiri dari angka 0 dan 1 (lihat contoh di bawah).

(2) Kunci rahasia berupa urutan biner angka 0 dan 1 yang sepenuhnya acak, dengan panjang yang sama dengan *plaintext* (teks asli).

(3) *Ciphertext* (teks tersandi) diperoleh dengan menjumlahkan kunci ke pesan, bit demi bit, secara modulo 2. Penjumlahan modulo 2 mengikuti aturan: 0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1 + 0 = 1, 1 + 1 = 0. Sebagai contoh:
pesan: 0 0 1 0 1 0 0 1 1
kunci rahasia: 1 0 0 1 1 1 0 1 0
ciphertext: 1 0 1 1 0 1 0 0 1

(4) Untuk mendekripsi pesan, cukup dengan menjumlahkan (secara modulo 2) kunci rahasia ke *ciphertext*, bit demi bit.

Untuk mengubah pesan menjadi urutan angka, seseorang dapat menggunakan, misalnya, kode Baudot yang diciptakan pada tahun 1874 oleh insinyur Prancis Emile Baudot untuk mengirimkan pesan teks melalui jaringan telegraf. Setiap karakter dikodekan menggunakan urutan 5 bit; misalnya, huruf A dengan 11000, huruf E dengan 10000, dan spasi pemisah antar-kata dengan 00000.

Total kemungkinan urutan 5 bit adalah 32 (00000, 00001, 00010, 00011, ..., 11111); jumlah ini cukup untuk mengodekan 26 huruf alfabet bahasa Inggris, ditambah spasi antar-kata serta instruksi seperti *line feed*, *carriage return*, dan sebagainya. Tabel 3.1 memperlihatkan pengodean biner untuk frasa "*alea iacta est*" beserta enkripsinya melalui penjumlahan modulo 2 bit demi bit menggunakan kunci rahasia. Kode Vernam juga dikenal sebagai *One-Time Pad* (secara harfiah berarti "buku catatan sekali pakai"), karena kunci rahasianya—yang harus memiliki panjang yang sama dengan pesan—tidak dapat digunakan kembali. Faktanya, seorang mata-mata yang mencegat dua pesan terenkripsi dengan kunci yang sama dapat menjumlahkan keduanya (selalu dengan operasi modulo 2). Hasil penjumlahan ini akan sama dengan jumlah dari kedua pesan asli (sebelum enkripsi), dan pengetahuan mengenai hal tersebut memungkinkan diperolehnya informasi tentang pesan-pesan aslinya.

Tabel 3.1 Contoh pengodean biner.

Pesan JPG		**Kunci Rahasia JPG**	**Teks Sandi JPG**
a	11000	01101	10101
l	01001	01100	00101
e	10000	01110	11110
a	11000	01010	10010
	00000	10001	10001

i	01100	11110	10010
a	11000	11010	00010
c	01110	10010	11100
t	00001	01101	01100
a	11000	10111	01111
	00000	10000	10000
e	10000	11100	01100
s	10100	10101	00001
t	00001	11010	11011

Meskipun merupakan sistem kriptografi yang aman terhadap serangan kriptanalisis, kode Vernam memiliki kekurangan. Pertama, kode ini memerlukan kunci yang sangat panjang: panjang kunci bertambah seiring dengan panjang pesan. Namun, kelemahan utamanya—meskipun sekilas mungkin tampak aneh—terletak pada fakta bahwa menghasilkan deret acak yang panjang bukanlah masalah yang sepele. Terlebih lagi, menentukan apakah suatu deret angka bersifat acak atau tidak juga bukan hal yang mudah. Ini adalah masalah yang telah dipelajari oleh para matematikawan, yang telah menciptakan algoritma untuk menghasilkan deret acak atau, lebih tepatnya, deret acak semu (*pseudo-random*). Akan tetapi, deret semacam itu—jika sangat panjang—selalu mengandung pola keteraturan tertentu, yang dapat membahayakan keamanan protokol kriptografi.

Menarik untuk dicatat bahwa mekanika kuantum juga telah dimanfaatkan untuk menghasilkan angka acak. Faktanya, telah dipelajari berbagai skema pembangkitan angka acak yang memanfaatkan sifat keacakan intrinsik dari proses pengukuran dalam mekanika kuantum. Selain itu, perangkat penghasil angka acak yang berbasis, misalnya, pada detektor foton tunggal kini telah tersedia secara komersial. Perangkat ini merupakan perkembangan penting yang bernilai praktis dalam teknologi kuantum saat ini. Contoh ini mengajak kita merenungkan bagaimana kemajuan ilmiah di suatu bidang dapat membantu memecahkan masalah di bidang yang sama sekali berbeda, sekaligus menyadarkan kita akan pentingnya mendukung pembelajaran bebas yang tidak diarahkan pada tujuan yang telah ditetapkan sebelumnya. Faktanya, kita tidak mungkin menentukan *a priori* (sebelumnya) penemuan apa yang akan dihasilkan oleh suatu pembelajaran. Akan sangat bermanfaat jika aspek ini dipertimbangkan oleh kalangan politisi suatu negara maupun oleh lembaga-lembaga yang memutuskan alokasi dana pembelajaran.

Mengingat sulit dan mahalnya penyediaan kunci acak baru untuk setiap pesan yang akan dikirimkan, sandi Vernam saat ini terutama digunakan untuk komunikasi diplomatik-militer yang penting. Sandi ini pernah digunakan, misalnya, selama Perang Dingin oleh badan intelijen Blok Timur dan untuk saluran "telepon merah" antara Washington dan Moskow (sebenarnya, saluran ini bukan berupa telepon, melainkan dua mesin teletipe yang dihubungkan melalui kabel—sebagian besar berada di bawah laut—untuk saling bertukar pesan tertulis terenkripsi). Selain itu, masih ada masalah mengenai distribusi kunci rahasia

yang aman. Bagaimana kita bisa memastikan bahwa seorang mata-mata tidak mencegat amplop (atau sarana komunikasi lainnya) yang berisi kunci tersebut, lalu menyalinnya untuk kemudian digunakan pada saat yang tepat guna mendekripsi pesan rahasia? Seperti yang akan kita lihat nanti, mekanika kuantum memungkinkan pemecahan masalah ini.

3.4 ENIGMA: MESIN YANG TAK TERKALAHKAN

Pada periode di antara dua perang dunia, kendala yang dihadapi terkait kode Vernam mendorong pembuatan mesin sandi polialfabetik. Mesin yang paling terkenal adalah Enigma, yang diciptakan oleh insinyur Jerman Arthur Scherbius sekitar tahun 1920. Enigma merupakan mesin elektromekanis yang awalnya dikembangkan untuk komunikasi komersial rahasia, namun kemudian diadopsi oleh angkatan bersenjata Jerman untuk keperluan militer selama Perang Dunia II. Cara kerja Enigma sangat kompleks, namun secara sederhana dapat diuraikan sebagai berikut: sebuah papan ketik yang memuat 26 karakter alfabet Inggris digunakan untuk memasukkan huruf-huruf dari pesan asli (*plaintext*). Papan ketik tersebut terhubung ke sebuah rotor, yaitu piringan yang memuat ukiran karakter alfabet. Dengan cara ini, enkripsi substitusi monoalfabetik sederhana dapat diterapkan—yang mana, seperti telah kita ketahui, mudah untuk dipecahkan. Kecerdikan Enigma terletak pada fakta bahwa setiap kali tombol ditekan, rotor akan berputar, sehingga mengubah korespondensi antara karakter pada papan ketik dan karakter pada rotor. Lebih tepatnya, rotor secara otomatis berputar sejauh 1/26 putaran setelah enkripsi setiap huruf, yang memungkinkan penggunaan 26 alfabet sandi.

Dengan demikian, huruf alfabet yang sama dalam satu pesan sandi (*ciphertext*) yang sama akan dienkripsi dengan cara yang berbeda. Pada dasarnya, Enigma melakukan enkripsi substitusi polialfabetik, yang menjadikannya sangat kompleks dan sulit untuk didekripsi. Kemudian, untuk meningkatkan tingkat keamanan mesin, Scherbius menambahkan dua rotor lagi yang berputar berdasarkan aturan yang berbeda. Dengan cara ini, digunakanlah $26 \times 26 \times 26 = 17.576$ alfabet sandi yang berbeda. Kunci untuk enkripsi dan dekripsi terdiri dari konfigurasi awal rotor, yang berubah setiap harinya. Konfigurasi ini dikirimkan ke unit-unit lapangan melalui buku panduan harian, sehingga penerima pesan dapat mengetahui cara mengatur posisi awal rotor untuk mendekripsi pesan tersebut dengan benar. Enigma tercatat dalam sejarah sebagai mesin yang dianggap tak tertembus sejak awal kemunculannya. Namun, menjelang akhir tahun 1932, enkripsi ini berhasil dipecahkan oleh tiga matematikawan Polandia: Marian Rejewski, Henryk Zygalski, dan Jerzy Różycki. Di sisi lain, antara tahun 1938 dan 1939, pihak Jerman mengubah aturan enkripsi dan menambah jumlah rotor dari 3 menjadi 5. Metode Polandia pun tidak dapat lagi digunakan, dan Enigma kembali menjadi sistem yang tak tertembus.

Pada bulan September 1939, Inggris menyatakan perang terhadap Jerman, dan salah satu langkah awal pemerintah Inggris adalah memperkuat pusat kriptoanalisis di Bletchley Park, yang juga dikenal sebagai Station X. Lokasi yang terletak 80 kilometer di barat laut London ini telah dibeli pada bulan Mei 1938 oleh Laksamana Sir Hugh Sinclair, kepala Secret Intelligence Service (atau MI6). Komitmen pemerintah sangatlah besar; buktinya, pada bulan Januari 1945—saat upaya pemecahan kode mencapai puncaknya—terdapat sekitar sembilan

ribu pegawai yang bekerja di Bletchley Park. Mereka mencakup banyak matematikawan—termasuk Alan Turing, salah satu tokoh perintis komputasi dan kecerdasan buatan yang telah kita kenal di bab kedua—serta orang-orang dengan latar belakang budaya yang beragam, mulai dari ahli bahasa hingga juara catur. Surat kabar *The Daily Telegraph* bahkan diminta untuk mengadakan kompetisi teka-teki silang; setelah itu, para peserta yang paling menjanjikan dihubungi secara diam-diam dan ditawari "pekerjaan khusus".

Lima minggu sebelum pecahnya perang, Biuro Szyfrów memberi tahu pihak Inggris mengenai hasil yang mereka peroleh dalam memecahkan kode Enigma. Dengan memanfaatkan informasi dari Polandia tersebut, Alan Turing berhasil memecahkan pesan-pesan yang disandikan menggunakan mesin Enigma. Pekerjaan yang dilakukan di Bletchley Park berperan penting dalam mengalahkan kapal selam U-boat milik Angkatan Laut Jerman pada Pertempuran Atlantik, serta dalam pertempuran di Afrika Utara melawan pasukan Jerman yang dipimpin oleh Jenderal Rommel. Sebelum pendaratan D-Day pada bulan Juni 1944, pihak Sekutu telah mengetahui posisi 56 dari 58 divisi Jerman di Front Barat. Ketika Italia terjun ke dalam perang pada tahun 1940, negara itu mulai menggunakan versi mesin Enigma yang telah disempurnakan. Namun, pesan-pesan Angkatan Laut Italia berhasil dipecahkan sebelum Pertempuran Tanjung Matapan pada bulan Maret 1941, yang turut mendukung kemenangan Inggris. Faktanya, di Tanjung Matapan, Laksamana Iachino telah memutuskan untuk mengerahkan sebagian besar armada laut Italia.

Perlu dicatat bahwa, dalam beberapa kasus, informasi yang berhasil didekripsi oleh pihak Inggris bahkan tidak dimanfaatkan, demi menjaga kerahasiaan fakta bahwa Inggris mampu memecahkan pesan-pesan tersebut. Keputusan yang diduga diambil untuk tidak melakukan intervensi guna menyelamatkan nyawa—yakni mengorbankan orang-orang tersebut alih-alih membiarkan Jerman mengetahui bahwa kode Enigma telah berhasil dipecahkan—telah memicu perdebatan sengit; contohnya adalah kasus pengeboman *Coventry*, yang menelan korban jiwa lebih dari 1.200 orang. *Churchill* disebut-sebut pernah menyatakan bahwa Turing adalah sosok yang memberikan kontribusi terbesar bagi kemenangan Sekutu atas Jerman. Namun, pada tahun 1952, Turing dinyatakan bersalah atas tuduhan homoseksualitas dan memilih menjalani pengebirian kimiawi demi menghindari hukuman penjara. Ia mengakhiri hidupnya sendiri pada tahun 1954, dan permintaan maaf resmi dari Perdana Menteri Inggris Gordon Brown baru disampaikan pada tahun 2009. Pengampunan anumerta kemudian diberikan oleh Ratu Elizabeth II pada tahun 2013.

Hal menarik lainnya adalah pembuatan salah satu komputer elektronik terprogram pertama dalam sejarah, Colossus, yang dilakukan di Inggris selama Perang Dunia II. Komputer ini dibuat untuk memecahkan pesan dari mesin sandi Lorenz, yang digunakan Nazi sebagai pelengkap Enigma guna mengamankan komunikasi antara Hitler dan para jenderalnya. Oleh karena itu, upaya berkelanjutan yang mengandalkan kecerdikan manusia—di satu sisi untuk mengembangkan kode kriptografi yang semakin aman dan di sisi lain untuk memecahkannya—telah menjadi faktor fundamental dalam perkembangan komputer.

3.5 KOMUNIKASI AMAN SAAT INI DAN BILANGAN PRIMA

Saat ini, untuk aktivitas umum seperti menarik uang dari ATM atau melakukan pembelian daring menggunakan kartu kredit, digunakan teknik kriptografi yang disebut kriptografi kunci publik. Teknik ini sangat berbeda dari metode-metode yang telah dibahas sebelumnya. Gagasan penggunaan kunci publik untuk mengenkripsi pesan merupakan langkah maju dalam evolusi kriptografi, karena metode ini berhasil memecahkan masalah pengiriman kunci rahasia secara aman. Penemuan brilian ini merupakan hasil karya Whitfield Diffie dan Martin Hellman. Demi penyederhanaan, di sini kita berfokus pada skema enkripsi RSA yang diperkenalkan oleh Ronald Rivest, Adi Shamir, dan Leonard Adleman pada tahun 1977.

Faktanya, menurut pemerintah Inggris, kriptografi kunci publik pada awalnya ditemukan di *Government Communications Headquarters* (GCHQ) di Cheltenham, namun penemuan tersebut tetap dirahasiakan hingga tahun 1997. Hal ini sebenarnya tidak mengherankan, mengingat kriptografi merupakan bidang ilmu khusus yang tidak bertujuan menyebarluaskan hasil yang diperoleh, melainkan justru berupaya meminimalkan informasi yang tersedia bagi calon lawan. Dalam kriptografi kunci publik RSA, kedua pihak yang berkomunikasi—yang seperti biasa kita sebut Alice dan Bob—tidak saling bertukar kunci rahasia. Salah satu pihak, misalnya Bob, membuat kunci yang tersedia untuk umum (kunci publik), yang kemudian digunakan oleh Alice untuk mengenkripsi pesan. Berbeda dengan kode Vernam, metode ini tidak menghadapi masalah pengiriman kunci rahasia secara aman yang berisiko intersepsi. Tentu saja, pesan tersebut tidak dapat didekripsi menggunakan kunci publik, melainkan hanya dengan kunci lain (kunci privat) yang hanya dimiliki oleh Bob.

Pada dasarnya, terdapat dua jenis kunci: kunci publik (yang tersedia untuk umum dan hanya dapat digunakan untuk mengenkripsi pesan) dan kunci privat. Sebagai analogi, bayangkan Bob menyiapkan sebuah brankas untuk setiap pesan; brankas itu awalnya dibiarkan terbuka dan dilengkapi dua kunci pengaman, yang masing-masing memiliki kuncinya sendiri. Satu kunci bersifat publik dan digunakan Alice untuk mengunci brankas setelah pesan dimasukkan. Setelah itu, hanya Bob yang dapat membuka brankas dan membaca isinya menggunakan kunci privat miliknya.

Tantangan utama dalam prosedur ini adalah bagaimana menciptakan dua kunci sedemikian rupa sehingga kunci privat tidak dapat diturunkan dari kunci publik. Rivest, Shamir, dan Adleman berhasil memecahkan masalah ini dengan memanfaatkan bilangan prima. Pada dasarnya, jika diketahui dua bilangan prima, hasil perkalian keduanya mudah dihitung. Sebagai contoh, 53 dan 139 adalah dua bilangan prima yang jika dikalikan menghasilkan 7367. Sebaliknya, jauh lebih sulit untuk menentukan bilangan-bilangan prima pembentuk suatu bilangan bulat jika hanya angka hasil perkaliannya yang diketahui. Dalam contoh sebelumnya, jika diketahui angka 7367, menemukan kembali faktor-faktor primanya (yaitu 53 dan 139) bukanlah hal yang mudah dari segi waktu komputasi. Keamanan protokol RSA justru didasarkan pada prinsip ini. Faktanya, dengan komputer dan algoritma yang tersedia saat ini, hampir mustahil untuk melakukan faktorisasi pada bilangan yang memiliki lebih dari 500 digit desimal.

Program kriptografi yang tersedia saat ini menggunakan kunci 2048-bit (setara dengan 309 digit desimal) yang praktis tidak dapat ditembus. *National Institute of Standards and Technology* (NIST) AS merekomendasikan ukuran kunci minimum 2048 bit, namun penggunaan kunci 4096-bit dianggap bermanfaat dalam situasi di mana data harus dilindungi dari penyerang yang mungkin memiliki sumber daya komputasi mutakhir. Badan Keamanan Siber Uni Eropa, dalam salah satu laporan terbarunya mengenai masalah kriptografi, juga merekomendasikan penggunaan kunci 3072-bit.

Berikut ini kami sajikan contoh cara kerja algoritma RSA (pembaca yang merasa paragraf ini membosankan dapat melewatinya tanpa mengurangi pemahaman terhadap bagian buku selanjutnya). Bob menghasilkan dua bilangan prima yang berbeda, p dan q; misalnya, p= 5 dan q= 11. Kita sebut N= p × q= 55 sebagai hasil kalinya. Selanjutnya, Bob menghitung apa yang disebut sebagai "fungsi *totient Euler*" dari kedua bilangan tersebut, yaitu z= (p− 1) × (q− 1) = 40, lalu memilih bilangan bulat e yang koprima dengan z—artinya, pembagi persekutuan terbesar (FPB) dari z dan e adalah 1. Dalam contoh ini, kita bisa mengambil e= 3. Kemudian, Bob menghitung bilangan d sebagai invers dari e modulo z; dalam kasus ini d= 27, karena d × e = 27 × 3 = 81, dan dalam modulo z = 40 nilainya sama dengan 1 (jika kita membagi 81 dengan 40, sisanya adalah 1). Pada tahap ini, Bob memublikasikan pasangan bilangan (e, N), sementara bilangan d tetap dirahasiakan dan hanya diketahui olehnya. Pasangan (e, N) tersebut merupakan kunci publik yang memungkinkan siapa saja mengirim pesan terenkripsi kepada Bob. Teks atau gambar dapat diubah menjadi urutan bilangan asli; sebagai contoh, kita sebelumnya telah melihat cara mengodekan teks "*alea iacta est*".

Di sini, kita perlu mengenkripsi pesan dengan cara membaginya terlebih dahulu menjadi beberapa blok, yang masing-masing dapat dikodekan menggunakan bilangan bulat yang lebih kecil dari N. Jumlah huruf dalam alfabet bahasa Inggris adalah 26 (kurang dari N= 55), sedangkan kemungkinan urutan dua huruf jumlahnya jauh lebih banyak daripada N. Oleh karena itu, satu blok pesan Alice—dalam contoh kita di mana angka Nbernilai kecil—terdiri dari satu huruf saja. Jika sebuah huruf, misalnya, diubah menjadi angka m= 7 (seperti huruf "a", yang merupakan huruf pertama pesan tersebut), Alice mengenkripsinya dengan menghitung angka c = m^e modulo N; jadi, c= 7^3 = 343 modulo 55, yang hasilnya adalah 13 (sisa pembagian 343 oleh 55).

Angka c= 13 tersebut kemudian dikirim oleh Alice kepada Bob melalui saluran publik, misalnya dengan memublikasikannya di sebuah situs web. Namun, untuk mendekripsi c, diperlukan kunci privat d yang hanya dimiliki oleh Bob. Faktanya, dapat dibuktikan bahwa m = c^d modulo N; dalam kasus kita, 13^{27}modulo 55 = 7. Dengan demikian, Bob dapat mendekripsi pesan tersebut menggunakan kunci privatnya dan menemukan angka m = 7 yang bersesuaian dengan huruf "a". Kekuatan algoritma RSA terletak pada kenyataan bahwa untuk menghitung kunci privat d, mengetahui *N* saja tidaklah cukup; diperlukan pula faktor-faktor prima dari N, dan faktor-faktor ini tidak dapat dihitung secara efisien menggunakan komputer klasik.

Munculnya komputer kuantum, melalui penggunaan algoritma Shor untuk menemukan faktor prima dari sebuah bilangan bulat, dapat memecahkan kode kriptografi kunci publik yang saat ini digunakan. Ini kemungkinan besar bukan peristiwa yang akan terjadi

dalam waktu dekat, tetapi ini adalah sesuatu yang harus diperhitungkan jika ada informasi yang ingin kita rahasiakan selama bertahun-tahun. Dampak praktis dari pemecahan kode RSA dengan komputer kuantum akan sangat signifikan dan akan menimbulkan konsekuensi yang mengganggu di bidang keamanan siber. Karena banyak protokol kriptografi menggunakan RSA, pembobolannya dapat membahayakan kerahasiaan komunikasi, integritas data, dan otentikasi dalam berbagai konteks, termasuk layanan online, transaksi keuangan, dan banyak lagi.

Dalam hal ini, langkah signifikan telah diambil oleh pemerintah AS dengan memberlakukan undang-undang yang mengimplementasikan *Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act* (Undang-Undang Kesiapan Keamanan Siber Komputasi Kuantum). Undang-undang ini mewajibkan percepatan migrasi ke kriptografi pasca-kuantum segera setelah NIST merampungkan algoritma yang sesuai. Kriptografi pasca-kuantum bertujuan mengembangkan teknik kriptografi kunci publik—yang saat ini belum cukup dikaji—yang tahan terhadap serangan komputer kuantum yang menggunakan algoritma Shor, sekaligus aman dari serangan komputer klasik. Upaya ini bertujuan menjamin keamanan komunikasi bahkan di masa depan, saat komputer kuantum yang mampu memecahkan protokol RSA telah menjadi kenyataan.

3.6 KOMUNIKASI KUANTUM YANG AMAN: BAGAIMANA MASA DEPANNYA?

Sejauh ini, kita telah membahas evolusi teknik kriptografi dari masa lampau hingga saat ini. Pertanyaan penting berikutnya berkaitan dengan masa depan. Di dunia yang semakin terdigitalisasi dan saling terhubung, informasi akan memainkan peran yang kian signifikan, merambah berbagai aspek kehidupan sehari-hari, ekonomi, ranah politik, dan budaya. Berbagai industry termasuk teknologi informasi, komunikasi, keuangan, dan pemasaran, memanfaatkan pengelolaan informasi secara ekstensif untuk mencapai tujuan mereka.

Faktanya, banyak inovasi teknologi dalam beberapa dekade terakhir lahir dari pengelolaan dan transmisi informasi. Internet, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan teknologi baru lainnya merupakan contoh bagaimana informasi berperan krusial dalam mentransformasi masyarakat. Demikian pula, pengumpulan data dalam skala masif—atau *big data*—menjadi alat yang digunakan dalam berbagai aktivitas bisnis dan ilmiah. Hal ini dikarenakan analisis data memberikan indikasi yang bermanfaat untuk pengambilan keputusan di berbagai sektor, mulai dari pembelajaran ilmiah hingga manajemen bisnis. Dalam konteks ini, muncul dua aspek krusial terkait potensi risiko yang ditimbulkannya. Aspek pertama menyangkut pengelolaan, akses, dan interpretasi kritis terhadap informasi yang dilakukan secara bertanggung jawab. Secara khusus, penyebaran berita palsu atau menyesatkan menuntut perhatian kritis dari masyarakat. Aspek kedua berkaitan dengan keamanan informasi, yang telah menjadi isu sangat penting. Perlindungan data pribadi, pencegahan serangan siber, dan pengelolaan keamanan sistem komputer merupakan tema-tema yang dampaknya semakin meluas dalam masyarakat kita. Hal ini menggarisbawahi pentingnya topik yang dibahas dalam bab ini, khususnya terkait dengan perkembangan di masa mendatang.

Untuk memahami titik balik krusial yang akan terjadi di bidang ini, mari kita mulai dengan perenungan berikut: bagaimana informasi berpindah dari satu kota ke kota lain, atau dari satu benua ke benua lain? Siapa yang membawanya? Dari kurir berkuda di masa lampau, kita telah beralih ke gelombang elektromagnetik yang memungkinkan kita melihat gambar di layar televisi, berbicara melalui telepon seluler, berkomunikasi lewat Internet, dan sebagainya. Pada dasarnya, segala jenis informasi—mulai dari zaman dahulu hingga teknologi paling modern—selalu berpindah menggunakan medium klasik.

Artinya, entitas yang membawa informasi tersebut bergerak sesuai dengan hukum-hukum mekanika klasik. Terlepas dari berbagai sistem canggih yang dirancang untuk melindungi kerahasiaan informasi—seperti yang baru saja kita bahas—terdapat satu kendala yang tak teratasi: mustahil untuk mengetahui dengan kepastian mutlak apakah seorang mata-mata telah memperoleh kunci rahasia atau telah mencegat pesan, menyalinnya, lalu meneruskannya kepada penerima. Alasannya adalah informasi klasik dapat disalin tanpa mengubah pesan aslinya. Faktanya, informasi mau tidak mau harus dikodekan dalam suatu sistem fisik (selembar kertas, sinyal radio, dll.) yang sifat-sifatnya, secara prinsip, dapat diukur secara "pasif".

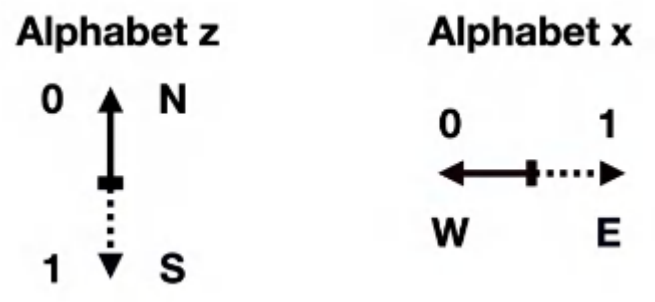
Dengan kata lain, perubahan yang diakibatkan oleh tindakan mata-mata saat membaca pesan dapat diminimalkan hingga ke tingkat yang praktis tidak lagi relevan. Kendala ini dapat diatasi jika informasi bisa dikirimkan bukan melalui medium klasik, melainkan melalui medium kuantum: bukan menggunakan gelombang elektromagnetik klasik, melainkan foton. Kemungkinan ini—yang akan merevolusi dunia informasi—sedang dalam tahap pembelajaran lanjut dan, dalam beberapa kasus, sudah menjadi kenyataan. Inilah topik yang akan kita bahas pada bagian berikutnya.

3.7 INFORMASI MERAMBAT MELALUI KUANTUM

Dalam mekanika kuantum, sebagaimana telah kita lihat pada bab pertama, proses pengukuran umumnya mengganggu sistem yang diukur. Hal ini merupakan konsekuensi dari prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang menyatakan bahwa kita tidak dapat mengukur posisi dan kecepatan suatu partikel secara bersamaan dengan tingkat ketelitian sembarang. Namun, prinsip Heisenberg ini jauh lebih umum cakupannya dan berlaku pula pada qubit. Jika sebuah qubit diukur, keadaannya pasti akan berubah. Sebagaimana akan kita lihat nanti, sifat yang secara inheren bersifat kuantum ini memungkinkan deteksi penyusupan: dengan demikian, Alice dan Bob dapat mengetahui jika ada pihak penyusup yang mencoba memperoleh kunci rahasia yang dikirimkan melalui urutan *qubit*.

Berdasarkan peluang yang ditawarkan oleh mekanika kuantum ini—dan sembari menunggu teknologi masa depan yang memungkinkan transmisi informasi berskala besar melalui medium kuantum—metode untuk melindungi kerahasiaan informasi telah dikembangkan selama sekitar 40 tahun. Dengan demikian, lahirlah bidang pembelajaran baru: kriptografi kuantum, yang mempelajari cara mengirimkan kunci rahasia dengan metode yang secara inheren aman, dengan memanfaatkan karakteristik khas mekanika kuantum.

Protokol kriptografi kuantum pertama ditemukan oleh Charles Bennett dan Gilles Brassard pada tahun 1984. Dalam protokol yang dikenal sebagai BB84 ini, tujuannya adalah mengirimkan kunci rahasia secara aman. Untuk itu, setelah kunci ditulis sebagai urutan angka 0 dan 1, dua "alfabet" berbeda digunakan untuk mengodekan bit-bit tersebut. Pada kasus pertama (alfabet z), nilai bit direpresentasikan melalui keadaan 0 dan 1 dari sebuah qubit yang berorientasi vertikal; yakni 0 bersesuaian dengan Kutub Utara bola dunia dan 1 bersesuaian dengan Kutub Selatan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Visualisasi grafis dari dua alfabet dalam kriptografi kuantum.

Pada kasus kedua, nilai 0 atau 1 dari *bit* klasik direpresentasikan oleh dua keadaan *qubit* yang berorientasi horizontal, yang bersesuaian dengan dua titik antipodal di garis khatulistiwa (sama halnya dengan Quito, ibu kota Ekuador, yang posisinya kira-kira antipodal terhadap kota Pekanbaru di Pulau Sumatra, Indonesia). Kita menyebut N dan S (Utara dan Selatan) sebagai dua keadaan dalam alfabet z, serta W dan E (Barat dan Timur) sebagai dua keadaan dalam alfabet x. Perlu dicatat bahwa, akibat prinsip Heisenberg, kita tidak dapat secara bersamaan mengukur dengan pasti apakah suatu keadaan adalah Utara atau Selatan sekaligus apakah keadaan tersebut adalah Barat atau Timur. Alasannya sama dengan yang telah kita jelaskan pada bab pertama: untuk suatu partikel, kita tidak dapat mengukur posisi dan kecepatannya secara bersamaan.

Protokol BB84 bekerja sebagai berikut:

(1) Alice menghasilkan urutan biner acak yang terdiri dari angka 0 dan 1.

(2) Alice mengodekan setiap bit (bernilai 0 atau 1) dari kunci yang ingin ia kirimkan dengan memilih secara acak antara alfabet x dan alfabet z, misalnya dengan melempar koin (jika, sebagai contoh, koin menunjukkan sisi gambar/kepala, Alice memilih alfabet z; jika menunjukkan sisi angka/ekor, Alice memilih alfabet x). Dengan demikian, untuk mengodekan 0 menggunakan alfabet z, Alice menyiapkan qubit dalam keadaan N; untuk mengodekan 1 menggunakan alfabet x, ia menyiapkan qubit dalam keadaan E.

(3) Urutan qubit yang diperoleh dengan cara tersebut kemudian dikirimkan kepada Bob. Lebih tepatnya, objek fisiklah yang dikirimkan (dalam praktiknya, foton, yaitu "partikel cahaya" yang membentuk radiasi elektromagnetik), yang masing-masing disiapkan dalam keadaan yang sesuai dengan salah satu dari empat kemungkinan yang dipilih sebelumnya (N, S, W, E).

(4) Untuk setiap qubit yang diterima, Bob juga memilih secara acak alfabet mana yang akan digunakan untuk pengukuran; jika ia memilih alfabet z, kemungkinan hasil yang akan ia peroleh adalah N atau S; jika ia memilih alfabet x, kemungkinan hasilnya adalah W atau E. Jika Bob menggunakan alfabet yang sama dengan Alice, nilai bit yang ditemukan oleh Bob pastilah sama dengan nilai bit yang dikirimkan oleh Alice. Sebaliknya, setiap kali Bob memilih alfabet yang berbeda, hasil pengukurannya sepenuhnya acak. Sebagai contoh, jika Alice telah mengodekan bit 0 menggunakan alfabet z dan Bob mengukur qubit yang diterima menggunakan alfabet x, ia akan menemukan hasil W atau E dengan probabilitas yang sama, yaitu 0 atau 1. Dengan kata lain, nilai yang diukur oleh Bob tidak memiliki kaitan dengan nilai bit yang dikodekan oleh Alice. Lantas, bagaimana kita bisa mendapatkan kunci aman yang dimiliki bersama oleh Alice dan Bob? Gagasannya adalah sebagai berikut:

(5) Bob dan Alice berkomunikasi melalui saluran publik klasik mengenai alfabet yang mereka gunakan untuk mengodekan atau mengukur setiap qubit. Tentu saja, mereka hanya menyebutkan alfabet yang digunakan, bukan nilai yang diperoleh.

(6) Alice dan Bob kemudian membuang data yang berkaitan dengan kasus di mana mereka menggunakan alfabet yang berbeda; data sisanya, yang mereka miliki bersama, menjadi kunci rahasia yang hanya diketahui oleh mereka berdua. Karena Alice dan Bob sama-sama memilih alfabet secara acak, jelas bahwa rata-rata Bob hanya akan memilih alfabet yang sama dengan Alice pada separuh kesempatan.

Tabel 3.2 memperlihatkan contoh penggunaan protokol BB84 untuk menghasilkan kunci rahasia. Inti dari protokol ini adalah bahwa, berdasarkan prinsip Heisenberg, jika terjadi penyusupan oleh pihak pengintai—yang akan kita sebut sebagai Eve—yang mencoba mengukur qubit, hal tersebut pasti akan mengubah keadaan sistem. Faktanya, jika Alice dan Eve sama-sama memilih secara acak antara alfabet x dan alfabet z untuk setiap bit, maka pada separuh kesempatan, alfabet mereka tidak akan sama.

Tabel 3.2 Contoh protokol BB84.

Urutan bit acak	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1
Alfabet Alice	x	z	x	z	x	x	x	z	z	x
Pengodean Alice	T	U	B	U	T	T	B	S	U	T
Alfabet Bob	x	z	x	x	z	x	z	x	z	z
Kunci rahasia	1	0	0			1			0	

Jika hasilnya tidak cocok, pengukuran yang dilakukan Eve—menurut hukum mekanika kuantum—mau tak mau akan mengganggu sistem tersebut, dan hal ini menyebabkan ketidakcocokan pada bit-bit kunci yang dibagikan antara Alice dan Bob. Dengan demikian, mereka dapat dengan mudah mengetahui jika terjadi penyusupan. Caranya cukup dengan

membandingkan nilai bit untuk sebagian kunci melalui saluran publik (bit-bit ini tentu saja kemudian tidak digunakan lagi).

Dengan cara ini, mereka dapat dengan mudah memverifikasi adanya ketidakcocokan yang mengindikasikan adanya tindakan penyadap. Jika hal itu terjadi, mereka akan membuang kunci yang telah diperoleh dan membuat kunci rahasia baru dari awal menggunakan prosedur BB84 yang sama. Setelah dipastikan tidak ada penyusupan, mereka dapat melanjutkan proses penyandian pesan menggunakan sandi Vernam. Berbeda dengan mekanika klasik, mekanika kuantum memungkinkan deteksi penyusupan: Alice dan Bob dapat mengetahui apakah Eve sedang menyadap komunikasi mereka atau tidak.

Pada titik ini, pembaca mungkin mengajukan keberatan: bukankah Eve bisa menyadap qubit yang dikirimkan Alice, membuat salinan dari setiap qubit tersebut, lalu mengukur qubit hasil salinan tanpa menyentuh qubit aslinya, sehingga tidak meninggalkan jejak penyusupan? Jawabannya adalah hal itu tidak mungkin dilakukan. Dalam mekanika kuantum, pembuatan klon atau salinan identik adalah hal yang mustahil. Inilah yang disebut sebagai teorema *no-cloning* (anti-kloning), yang menyatakan bahwa kita tidak dapat menyalin keadaan kuantum secara umum. Mesin fotokopi memang ada di dunia klasik, namun ada perbedaan mendasar di sini: sebuah bit hanya bisa berada di Kutub Utara atau Kutub Selatan, sedangkan sebuah qubit bisa berada di titik mana pun di permukaan bola dunia kita. Membuat salinan—sesuatu yang kita anggap lumrah berdasarkan pengalaman sehari-hari—memang dimungkinkan untuk bit klasik, tetapi tidak untuk qubit.

Sebagai penutup bagian ini, kami juga menyebutkan protokol kriptografi kuantum lainnya yang dikenal sebagai E91. Protokol ini diusulkan oleh Artur Ekert pada tahun 1991 dan berpotensi menarik untuk keperluan penyimpanan kunci rahasia. Bayangkan jika, setelah kunci rahasia terbentuk, Alice dan Bob ingin menyimpannya di dalam brankas mereka sampai saat kunci tersebut dibutuhkan. Namun, kunci tersebut berupa urutan bit klasik dan, pada prinsipnya, dapat disalin. Memang sangat sulit bagi seorang mata-mata untuk membuka brankas, tetapi hal itu mungkin saja dilakukan; tidak ada alasan mendasar yang meniadakan kemungkinan tersebut. Akan tetapi, jika Alice dan Bob mampu berbagi serta mempertahankan keadaan terjerat (*entangled states*), mereka dapat menunda pembentukan kunci rahasia hingga saat pesan perlu dikirimkan.

Faktanya, untuk keadaan terjerat, alfabet yang digunakan dalam transmisi setiap bit kunci belum ditentukan sampai keadaan tersebut diukur. Mirip dengan paradoks EPR yang dijelaskan pada bab pertama, situasinya ibarat Alice dan Bob masing-masing menyimpan separuh bagian prangko, namun baru setelah Alice melakukan pengukuran, dipastikan apakah prangko tersebut dipotong secara horizontal (alfabet x) atau vertikal (alfabet z). Melalui prosedur ini, Alice dan Bob memiliki qubit yang terjerat, namun mereka sendiri pun belum mengetahui kuncinya. Kunci tersebut baru akan terbentuk saat mereka memutuskan untuk mengukur qubit masing-masing, dan kuncinya akan dihasilkan berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan oleh masing-masing pihak di laboratorium mereka sendiri. Jelaslah bahwa kunci yang diperoleh dengan cara ini hanya akan diketahui oleh mereka berdua.

Tentu saja, penerapan gagasan ini terkendala oleh kebutuhan untuk melindungi pasangan keadaan terjerat dari gangguan akibat interaksi dengan lingkungan sekitar dalam jangka waktu yang lama, hingga keputusan untuk menghasilkan kunci diambil. Untuk saat ini, kemungkinan tersebut masih sebatas teori karena berada di luar jangkauan teknologi terkini. Kendati demikian, tetap ada nilai penting secara konseptual terkait kemungkinan berbagi kunci rahasia yang bersifat "potensial"—yang dibiarkan belum ditentukan wujud pastinya dan baru dihasilkan saat diperlukan.

3.8 KRIPTOGRAFI KUANTUM SAAT INI: DARI SERAT OPTIK HINGGA SATELIT

Pada bagian sebelumnya, kita telah melihat beberapa protokol cerdas yang—secara prinsip—memungkinkan penyandian dan transmisi informasi melalui qubit. Namun, sebagaimana telah berulang kali kita tekankan, objek kuantum sangat rentan; interaksi sekecil apa pun dengan lingkungan dapat merusak sifat-sifat dasarnya. Akankah protokol-protokol ini dapat diterapkan secara praktis dalam kehidupan sehari-hari dan mewujudkan teknologi yang mudah diakses untuk komunikasi kuantum yang aman? Taruhannya sangat besar, sehingga upaya keras sedang dilakukan di berbagai laboratorium di seluruh dunia ke arah ini, dan penerapan komersial kriptografi kuantum pun sudah memasuki tahap eksperimental.

Beberapa perusahaan sedang mengembangkan metode kriptografi kuantum untuk berbagai aplikasi, khususnya untuk komunikasi aman dalam transaksi keuangan dan komunikasi antar-pemerintah. Hal ini dimungkinkan berkat kemajuan pesat dalam teknologi serat optik maupun di bidang komunikasi optik ruang bebas (*free-space optical communication*). Pada kedua teknologi tersebut, informasi (berupa kunci rahasia yang dikirimkan) disandikan melalui foton—yang, perlu diingat kembali, merupakan "partikel cahaya" nyata penyusun radiasi elektromagnetik. Keunggulan utama komunikasi kuantum melalui serat optik adalah pemanfaatan infrastruktur yang sudah terpasang untuk komunikasi klasik. Hal ini memungkinkan penggunaan infrastruktur yang ada tanpa perlu membangun jaringan baru. Foton tunggal disuntikkan ke dalam serat optik, dengan masing-masing foton disiapkan dalam salah satu dari empat keadaan yang termasuk dalam dua alfabet—yang secara praktis mewujudkan keadaan N, S, W, dan E dari sebuah qubit.

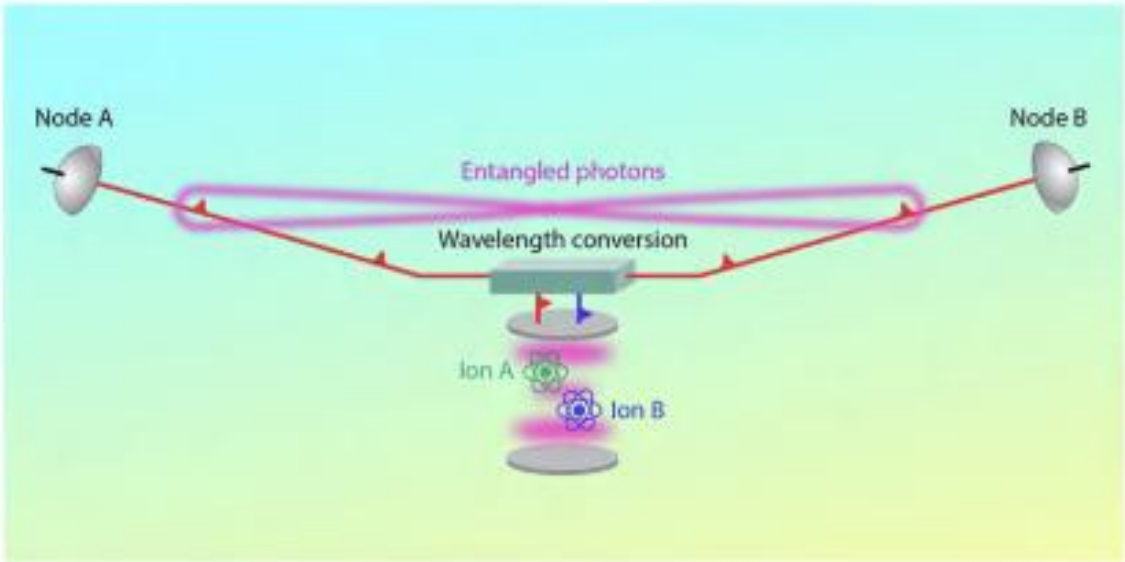
Kekurangan utamanya adalah hilangnya foton selama transmisi melalui serat optik. Secara sederhana, serat optik dapat dibayangkan sebagai dua tabung kaca sangat tipis yang dipasang saling melingkupi. Tabung bagian dalam (inti atau *core*) terbuat dari kaca sangat murni dengan kandungan silika tinggi, sedangkan tabung bagian luar (*cladding*) terbuat dari kaca yang kurang murni dan berfungsi memantulkan cahaya agar tetap berada di dalam inti. Cahaya merambat layaknya di dalam cermin berbentuk tabung melalui serangkaian pantulan di dalam tabung bagian dalam tersebut. Ini ibarat memiliki pipa, namun yang mengalir di dalamnya bukanlah air, melainkan cahaya.

Intinya adalah bahwa bagian dalam serat optik—meskipun terbuat dari kaca dengan tingkat kemurnian sangat tinggi—tidak sepenuhnya menghilangkan penyerapan foton oleh pengotor (impuritas) sisa yang terdapat di dalam kaca tersebut. Demikian pula, kebocoran foton tidak dapat dihilangkan sepenuhnya saat serat melengkung di sepanjang jalurnya (dalam

praktiknya, ketika foton mengenai permukaan lengkung serat alih-alih dipantulkan ke arah dalam, foton tersebut lolos ke luar sehingga tidak dapat lagi digunakan untuk komunikasi). Seiring bertambahnya panjang serat, probabilitas hilangnya foton meningkat secara signifikan. Lebih tepatnya, probabilitas ini meningkat secara eksponensial terhadap panjang serat, dan hal ini menjadi batasan kuat bagi jarak implementasi komunikasi kuantum.

Oleh karena itu, berdasarkan teknologi saat ini, penggunaan serat untuk komunikasi kuantum pada jarak lebih dari beberapa ratus kilometer tampaknya sulit dilakukan. Pada prinsipnya, *quantum repeater* (pengulang kuantum) dapat mengatasi batasan ini dan memungkinkan komunikasi kuantum dilakukan pada jarak yang sangat jauh. Pada dasarnya, sebuah *repeater* menangkap sinyal dan memancarkannya kembali. Sebagai contoh, bayangkan perangkat Wi-Fi yang umum ada di rumah kita. Jika rumah memiliki beberapa lantai, kita biasanya memerlukan *repeater* di setiap lantai agar sinyal Wi-Fi dapat diterima dengan jelas di mana saja, bukan hanya di lantai tempat kabel serat optik masuk.

Demikian pula, *repeater* dapat diwujudkan dalam mekanika kuantum. Saat ini, pembuatan *quantum repeater* masih dalam tahap awal pengembangan. Namun, bidang ini berkembang pesat dan hasil-hasil awalnya menjanjikan, seperti dalam eksperimen yang dilakukan oleh kelompok Ben Lanyon di Innsbruck pada tahun 2023, yang digambarkan secara skematis dalam Gambar 3.5. Mari kita analisis cara kerja *repeater* ini karena hal tersebut memberikan gambaran tentang bagaimana teknologi kuantum dapat diimplementasikan. Dua ion, yang awalnya disiapkan dalam keadaan dasar (*ground state*—yaitu keadaan dengan energi terendah), disinari dengan cahaya laser; ion-ion tersebut menyerap energi dari cahaya itu dan beralih ke keadaan berenergi lebih tinggi.



Gambar 3.5 Skema pengulang kuantum (Gambar diambil dari *https://physics.aps.org/articles/v16/84).* Keterikatan (*entanglement*) antara ion A dan foton yang dikirim ke simpul A (berjarak 25 kilometer) serta antara ion B dan foton yang dikirim ke simpul B (berjarak 25 kilometer) diubah menjadi keterikatan antara kedua foton tersebut (yang terpisah sejauh 50 kilometer).

Selanjutnya, kedua ion tersebut meluruh kembali ke keadaan berenergi rendah. Faktanya, ion-ion tersebut cenderung kembali secara alami ke keadaan energi terendah, sama seperti mobil yang akan meluncur turun dari bukit tanpa mesin jika kita tidak mengeremnya. Dalam proses peluruhan tersebut, setiap ion memancarkan satu foton. Dengan cara ini, terbentuklah dua pasangan ion-foton yang terjerat (*entangled*). Foton-foton tersebut kemudian dikirim melalui serat optik sepanjang 25 kilometer, satu menuju simpul A dan yang lainnya menuju simpul B.

Pada tahap ini, kita dapat melakukan intervensi terhadap keadaan kedua ion tersebut dan—melalui protokol yang tepat—mengubah keterikatan pasangan ion-foton menjadi keterikatan foton-foton, dengan jarak 50 kilometer memisahkan kedua foton tersebut. Dengan cara ini, dua sambungan terikat yang masing-masing sepanjang 25 kilometer dapat diubah menjadi satu sambungan terikat sepanjang 50 kilometer. Setelah titik A dan B memiliki keadaan terikat bersama, protokol kriptografi kuantum—seperti protokol E91 yang telah dijelaskan sebelumnya—dapat diterapkan. Meskipun repeater tunggal yang baru saja dijelaskan merupakan satu-satunya sistem yang saat ini dapat kita wujudkan, secara teknologi dimungkinkan untuk menghubungkan beberapa repeater secara berantai guna mencapai jarak hingga ratusan kilometer.

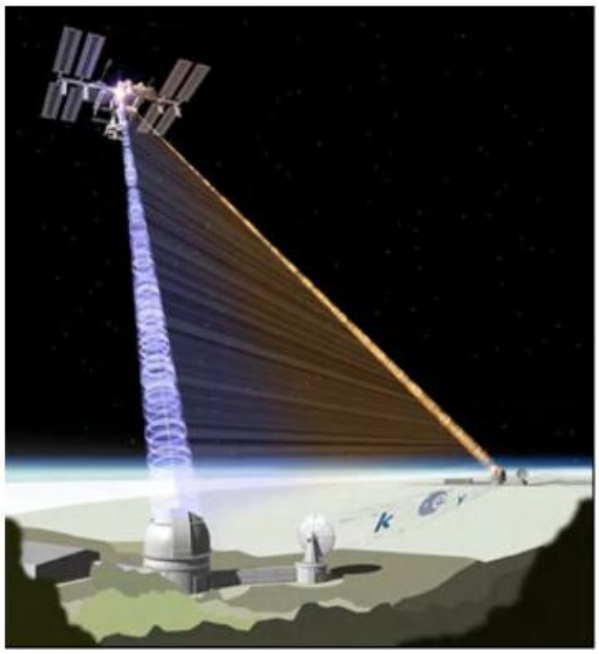
Teknik yang sama sekali berbeda melibatkan penerapan kriptografi kuantum di ruang bebas—yaitu tanpa menggunakan serat optik—seperti yang telah ditunjukkan dalam berbagai eksperimen. Sebagai contoh, protokol BB84 diterapkan pada tahun 2007 dengan jarak 144 kilometer antara La Palma dan Tenerife. Dalam eksperimen ini, sumber foton terikat dipasang di La Palma pada ketinggian 2.400 meter; salah satu foton dari setiap pasangan terikat dikirim ke Tenerife dan diterima di sana oleh teleskop yang juga terletak pada ketinggian 2.400 meter. Koneksi langsung dengan jarak yang jauh lebih besar tidak dimungkinkan di permukaan Bumi, terutama karena terhalang oleh kelengkungan Bumi (untuk dapat melihat puncak gunung yang berada di titik B dari titik A yang terletak di permukaan laut dan berjarak 144 kilometer dari B, gunung tersebut harus memiliki ketinggian setidaknya 1.700 meter).

Keterbatasan ini dapat diatasi melalui pengembangan teknologi kuantum di luar angkasa menggunakan satelit. Untuk menciptakan jaringan komunikasi kuantum berskala global, sebuah satelit yang dijuluki Micius atau Mozi telah digunakan; nama ini diambil untuk menghormati seorang filsuf Tiongkok kuno yang aliran pemikirannya menentang perang serta menganjurkan kasih sayang universal dan semangat saling membantu di antara sesama manusia. Micius juga merupakan orang pertama yang mendeskripsikan prinsip fisika yang mendasari *camera obscura*. Melalui satelit ini, pada tahun 2017 dimungkinkan untuk mendistribusikan pasangan foton terikat ke dua stasiun bumi yang terpisah sejauh 1.203 kilometer.

Pada tahun 2021, para ilmuwan Tiongkok menciptakan jaringan komunikasi kuantum terintegrasi pertama di dunia, yang menggabungkan serat optik berbasis darat (untuk menghubungkan berbagai bank dalam jarak terbatas) dengan dua tautan satelit-Bumi guna mendistribusikan kunci kuantum dalam jarak jauh, hingga mencapai 4.600 kilometer. Tiongkok berada di garis depan dalam pengembangan teknologi ini. Namun, di Eropa pun, sebuah

konsorsium perusahaan—dengan dukungan Badan Antariksa Eropa (ESA) dan Komisi Eropa—sedang merancang sistem satelitnya sendiri untuk mengembangkan jaringan kuantum bagi transmisi data yang aman. Terkait hal ini, peluncuran satelit (Eagle-1) direncanakan pada akhir tahun 2026.

Perlu ditekankan bahwa, selain kepentingan praktis untuk menciptakan jaringan kriptografi kuantum berskala global di masa depan, komunikasi kuantum jarak jauh melalui satelit juga penting karena alasan-alasan mendasar lainnya. Faktanya, hal ini memungkinkan dilakukannya studi mengenai pengaruh medan gravitasi terhadap *entanglement* (keterikatan kuantum), yang dapat memberikan petunjuk bermanfaat mengenai hubungan antara gravitasi dan mekanika kuantum—sebuah hubungan yang hingga kini masih belum terungkap sepenuhnya.



Gambar 3.6 Ilustrasi skematis distribusi keterikatan (*entanglement*) melalui satelit. Pasangan foton yang terikat didistribusikan ke dua lokasi di Bumi yang terpisah jarak ribuan kilometer. Gambar diambil dari *https://www.newscientist.com/article/dn14113-space-station-to-be-quantumcommunicationshub/*

3.9 TELEPORTASI KUANTUM: FIKSI ILMIAH MENJADI SAINS NYATA

Di antara berbagai perangkat yang dibayangkan dalam karya fiksi ilmiah, teleportasi menempati posisi istimewa bagi para penggemar genre ini. Teleportasi dipopulerkan oleh serial televisi Star Trek, yang telah memikat imajinasi banyak orang dan menjadi tema ikonik dalam dunia fiksi spekulatif. Faktanya, teleportasi sebagaimana digambarkan dalam fiksi ilmiah memungkinkan pemindahan instan suatu objek (baik makhluk hidup maupun benda mati) dari satu tempat ke tempat lain.

Namun, dalam pengertian tersebut, teleportasi bertentangan dengan teori relativitas, yang tidak mengizinkan kecepatan transfer melebihi kecepatan cahaya. Cahaya memiliki kecepatan terbatas—meskipun sangat tinggi (300.000 kilometer per detik)—sehingga, sebagai

contoh, dibutuhkan waktu rata-rata sekitar 13 menit bagi cahaya untuk menempuh perjalanan dari Bumi ke Mars. Oleh karena itu, teleportasi instan tidak dapat dicapai. Di sisi lain, teleportasi kuantum informasi pada partikel subatomik merupakan kenyataan yang telah dibuktikan di laboratorium. Terlebih lagi, jika teknologi teleportasi kuantum berskala besar berhasil dikembangkan, berbagai aplikasi dapat muncul, terutama yang berkaitan dengan komunikasi kuantum dan komputasi kuantum.

Mari kita perjelas poin ini. Teleportasi kuantum tidak berarti transmisi instan objek material dari satu titik ke titik lain, melainkan transmisi informasi—yaitu keadaan kuantum—dari satu partikel ke partikel lainnya, tanpa pemindahan fisik objek itu sendiri sebagaimana yang terjadi dalam Star Trek. Dalam pengertian ini, teleportasi merupakan fenomena nyata dan menarik yang telah dikonfirmasi melalui berbagai eksperimen. Selain itu, tidak ada pertentangan dengan teori relativitas, karena teleportasi terjadi pada kecepatan perambatan informasi sehingga tidak melebihi kecepatan cahaya.

Mari kita ambil sebuah contoh. Misalkan Alice dan Bob masing-masing memiliki sebuah qubit: Alice memiliki atom dua tingkat yang dapat berada dalam superposisi keadaan 0 dan 1, sedangkan Bob memiliki foton. Melalui teleportasi, keadaan atom Alice beralih menjadi keadaan foton Bob, namun Alice tetap memiliki atomnya dan Bob tetap memiliki fotonnya. Seperti yang dapat kita lihat, tidak ada pemindahan materi, melainkan pemindahan informasi—yaitu informasi yang mendeskripsikan keadaan suatu qubit. Sebagaimana ditulis oleh Bennett, Brassard, Crépeau, Jozsa, Peres, dan Wootters dalam artikel tahun 1993 yang memperkenalkan konsep teleportasi kuantum, "suatu keadaan kuantum yang tidak diketahui dapat diurai dan kemudian direkonstruksi kembali"; artinya, apa pun keadaan awal qubit Alice, pada akhir proses teleportasi, keadaan tersebut menjadi keadaan baru bagi qubit Bob. Pada saat yang sama, qubit Alice tidak lagi berada dalam keadaan semula, melainkan dalam keadaan yang berbeda. Dengan demikian, melalui teleportasi, yang dipindahkan bukanlah sistem fisiknya, melainkan keadaan sistem tersebut: keadaan qubit telah ditransfer dari Alice ke Bob.

Perlu dicatat bahwa operasi teleportasi keadaan qubit yang tidak diketahui ini sekilas tampak sebagai upaya yang mustahil atau tidak mungkin diwujudkan. Faktanya, kita telah melihat bahwa menurut mekanika kuantum, pengukuran terhadap qubit akan mengganggu keadaannya dengan cara yang tidak dapat dikendalikan. Setelah pengukuran, qubit dapat ditemukan di Kutub Utara (yang bersesuaian dengan nilai hasil pengukuran 0) atau di Kutub Selatan (yang bersesuaian dengan nilai 1). Berdasarkan informasi ini, kita tentu tidak dapat merekonstruksi kembali keadaan asalnya—yaitu memahami keadaan qubit sebelum pengukuran dilakukan. Meskipun demikian, teleportasi tetap dapat dilakukan.

Berikut ini kami sajikan gambaran mengenai bagaimana hal tersebut dimungkinkan, tanpa membahas rincian teknisnya. Pembaca yang tidak ingin menyimak uraian tentang protokol yang digunakan untuk teleportasi dapat melewati paragraf ini tanpa mengganggu pemahaman terhadap bagian buku selanjutnya. Mari kita mulai dengan menyatakan bahwa kita memerlukan tiga qubit: satu qubit untuk diteleportasi, ditambah sepasang qubit yang terjerat (*entangled*) dan dimiliki bersama oleh Alice dan Bob; satu *qubit* dari pasangan tersebut secara fisik berada di laboratorium Alice, sedangkan yang lainnya di laboratorium Bob. Pada

dasarnya, Alice mengambil qubit miliknya yang merupakan bagian dari pasangan terjerat tersebut dan membuatnya berinteraksi dengan qubit yang ingin ia teleportasikan ke Bob. Ia melakukan pengukuran terhadap kedua qubit yang berinteraksi ini dan memperoleh dua bit informasi klasik.

Misalkan Alice memperoleh hasil 10 dan mengirimkan informasi ini kepada Bob melalui saluran komunikasi klasik biasa. Poin krusialnya adalah bahwa Bob, berdasarkan informasi klasik tersebut, dapat menentukan secara pasti operasi apa yang harus diterapkan pada qubit miliknya (yang berasal dari pasangan terjerat awal) untuk merekonstruksi keadaan asli qubit Alice yang hendak diteleportasikan (kami tidak membahas secara rinci di sini bagaimana Bob memilih operasi tersebut). Setelah operasi ini selesai, Bob memiliki qubit yang kondisinya persis sama dengan keadaan awal qubit Alice, tanpa qubit tersebut harus berpindah secara fisik dari Alice ke Bob. Selain itu, keadaan aslinya musnah saat pengukuran dilakukan; dengan demikian, pada akhirnya, keadaan qubit Alice telah berpindah (diteleportasikan) dari qubit Alice ke qubit Bob.

Penjelasan di atas memperjelas bahwa teleportasi tidak memungkinkan komunikasi informasi yang lebih cepat daripada cahaya. Faktanya, Alice harus mengirimkan dua bit informasi agar Bob dapat merekonstruksi keadaan tersebut. Informasi ini, sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, dikirimkan melalui cara klasik dengan kecepatan yang—sesuai dengan teori relativitas—tidak akan melebihi kecepatan cahaya. Teleportasi juga sepenuhnya selaras dengan teorema *no-cloning* yang telah kita bahas dalam bab ini. Faktanya, keadaan kuantum qubit ditranspor jarak jauh (*teleported*) dari Alice ke Bob, sementara qubit asli milik Alice—setelah teleportasi—berada di Kutub Utara (keadaan 0) atau Kutub Selatan (keadaan 1), bergantung pada hasil pengukuran Alice. Dengan demikian, *qubit* Alice, yang awalnya berada dalam keadaan kuantum yang tidak diketahui, tidak dikloning melainkan lenyap dari laboratorium Alice dan muncul kembali di laboratorium Bob.

Realisasi eksperimental pertama teleportasi kuantum dicapai bertahun-tahun yang lalu, tepatnya pada tahun 1997, menggunakan foton, oleh kelompok Francesco De Martini di Roma dan kelompok Anton Zeilinger di Innsbruck. Pada tahun-tahun berikutnya, banyak eksperimen teleportasi lain dilakukan dengan mengodekan keadaan qubit menggunakan partikel atau sistem fisik yang berbeda (foton, atom, elektron, dan sirkuit superkonduktor). Pada tahun 2017, eksperimen teleportasi dari Bumi ke satelit menggunakan foton yang terjerat (*entangled*) juga dilakukan pada jarak hingga 1.400 kilometer oleh kelompok Jian-Wei *Pan di University of Science and Technology of China di Hefei*.

Sebagaimana telah kita amati, realisasi teleportasi yang mirip dengan yang digambarkan dalam acara televisi seperti *Star Trek* tentu memicu imajinasi kita, namun hal itu tetaplah sekadar angan-angan belaka. Faktanya, proses tersebut mengharuskan kita untuk "membongkar" tubuh di satu tempat, mentransmisikan informasi yang presisi ke tujuan, dan kemudian merekonstruksinya menggunakan informasi tersebut. Sebuah objek atau bahkan manusia akan dipindai dan dikodekan, lalu transmisi informasi dalam jumlah sangat besar akan memungkinkan penciptaan ulang objek atau manusia tersebut di tempat tujuan. Sayangnya, tantangan yang terkait dengan proses ini sangatlah besar dan jauh melampaui kemampuan

kita saat ini. Terlepas dari perkembangan yang memukau dalam fisika kuantum, sulit untuk membayangkan bahwa teleportasi akan benar-benar menjadi moda perjalanan yang nyata.

Akan tetapi, teleportasi kuantum dapat memberikan dampak signifikan di berbagai sektor. Sebagai contoh, teknologi ini bisa menjadi sarana penting untuk mentransmisikan informasi dalam komputer kuantum di masa depan, yakni dengan menghubungkan jaringan prosesor kuantum. Dengan demikian, dimungkinkan untuk melakukan operasi secara lokal pada prosesor-prosesor individual guna mewujudkan gerbang logika kuantum, lalu membuat prosesor-prosesor tersebut bekerja sama melalui teleportasi untuk menjalankan algoritma komputasi kuantum. Jika kita melangkah lebih jauh lagi, teleportasi dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan sinkronisasi antara teleskop antariksa yang berjauhan—sehingga memperbaiki resolusi pengamatan—atau untuk menyinkronkan pengukuran sensor kuantum dalam jarak jauh. Akan tetapi, saat ini berbagai penerapan tersebut masih sebatas dugaan teoretis semata dan memerlukan kemajuan signifikan dalam teknologi kuantum.

3.10 ENERGI, INFORMASI, DAN TELEPORTASI

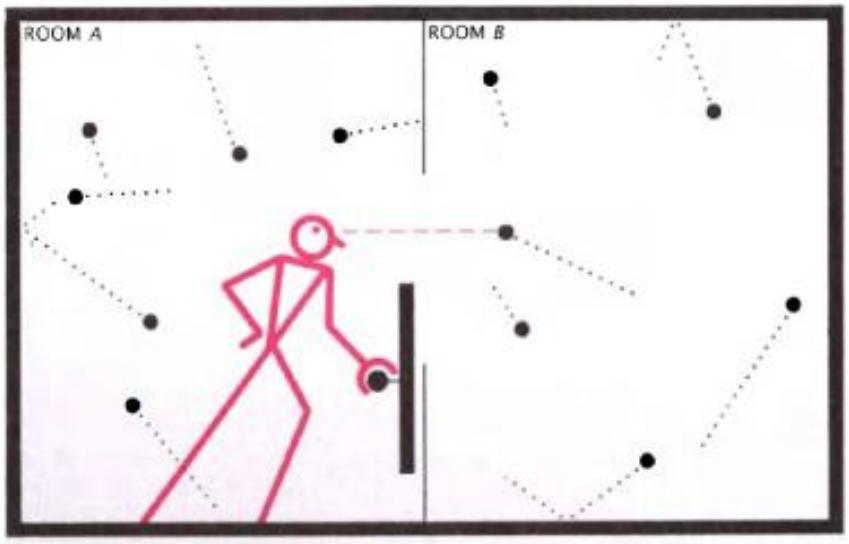
Energi dan informasi adalah dua sumber daya mendasar yang mencirikan era tempat kita hidup saat ini. Keduanya memainkan peran sentral dan berkaitan erat dengan kehidupan kita sehari-hari. Wajar jika kita bertanya apakah kedua elemen yang begitu penting ini memiliki keterkaitan satu sama lain. Mungkinkah, misalnya, mengubah informasi menjadi energi dan sebaliknya? Setidaknya pada pandangan pertama, jawabannya tampaknya negatif. Kita tahu bahwa di rumah kita, energi diubah menjadi panas, dan perbedaan suhu digunakan untuk menghasilkan energi. Kemungkinan terjadinya transformasi semacam inilah yang menjadi akar Revolusi Industri dan perkembangan masyarakat modern.

Kita juga tahu, sebagaimana diajarkan oleh Einstein, bahwa massa dapat diubah menjadi energi sesuai dengan persamaan yang dikenal luas, $E = mc^2$, di mana E adalah energi, m adalah massa, dan c adalah kecepatan cahaya. Namun, informasi tampak bagi kita sebagai sesuatu yang bersifat non-material dan subjektif, sedangkan ketika memikirkan energi, kita membayangkan sesuatu yang terkait dengan sistem fisik—seperti energi listrik, energi angin, energi termal, dan sebagainya. Bagaimana mungkin terjadi suatu transformasi yang pada akhirnya menghasilkan, misalnya, berkurangnya informasi—artinya kita menjadi lebih tidak tahu—namun memiliki lebih banyak energi?

Untuk memahaminya, mari kita kembali ke masa paruh kedua abad ke-19, ketika dasar-dasar mekanika statistik diletakkan melalui karya para ilmuwan besar seperti Ludwig Boltzmann dan James Clerk Maxwell. Pembahasan mengenai hubungan antara informasi dan energi dapat ditelusuri kembali ke paradoks "setan Maxwell", yang diperkenalkan oleh Maxwell dalam risalah terkenalnya tentang teori panas, *Theory of Heat*, pada tahun 1872: Jika kita membayangkan adanya suatu makhluk yang memiliki kemampuan sangat tajam sehingga ia dapat mengikuti pergerakan setiap molekul, maka makhluk tersebut akan mampu melakukan hal yang saat ini mustahil bagi kita. Sebab, kita telah melihat bahwa molekul-molekul di dalam wadah berisi udara dengan suhu seragam bergerak dengan kecepatan yang sama sekali tidak seragam Sekarang, mari kita andaikan sebuah wadah dibagi menjadi dua

bagian, A dan B, oleh suatu sekat yang memiliki lubang kecil, dan ada sesosok makhluk yang mampu melihat molekul-molekul secara individual. Makhluk ini membuka dan menutup lubang tersebut sedemikian rupa sehingga hanya molekul yang bergerak lebih cepat yang dapat berpindah dari A ke B, dan hanya molekul yang bergerak lebih lambat yang dapat berpindah dari B ke A. Dengan demikian, tanpa perlu melakukan usaha, ia akan menaikkan suhu di bagian B dan menurunkan suhu di bagian A—hal yang bertentangan dengan hukum kedua termodinamika.

Fisikawan Inggris ternama, Lord Kelvin, menjuluki makhluk ini sebagai "setan Maxwell" (*Maxwell's demon*) karena kemampuannya membalikkan jalannya peristiwa secara alami. Suhu di bagian A dan bagian B wadah tersebut pada akhirnya menjadi berbeda karena suhu—pada hakikatnya—merupakan ukuran energi rata-rata molekul, yang pada gilirannya ditentukan oleh kecepatan rata-rata molekul tersebut. Dengan demikian, kita dapat memanfaatkan perbedaan suhu ini untuk menghasilkan usaha, sebagaimana yang terjadi pada semua mesin kalor. Kita pun dapat menjalankan berbagai mesin tanpa memerlukan minyak, gas, uranium, dan sebagainya.



Gambar 3.7 Gambar skematis paradoks iblis Maxwell. Iblis tersebut, dengan membuka dan menutup pintu kecil, memisahkan molekul-molekul yang lebih cepat dari yang lebih lambat. Gambar diambil dari https://www.jstor.org/stable/24979551.

Paradoks ini muncul dari fakta bahwa iblis tersebut mampu mengubah kalor yang berasal dari satu sumber bersuhu seragam (wadah) menjadi kerja. Namun, transformasi ini bertentangan dengan hukum kedua termodinamika, sehingga hal tersebut mustahil terjadi. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa tidak semua proses yang sesuai dengan prinsip kekekalan energi benar-benar terjadi di alam. Jika kita awalnya memanaskan hanya separuh bagian wadah lalu membiarkan molekul-molekul bergerak melewati lubang pemisah, pada akhirnya suhu gas di seluruh bagian wadah akan menjadi sama.

Iblis tersebut melakukan proses sebaliknya; ia "mengatur" molekul-molekul, membuat molekul yang lebih lambat terkumpul di satu sisi dan yang lebih cepat di sisi lainnya, sehingga

suhu kedua bagian wadah menjadi berbeda. Proses semacam ini tidak pernah terjadi secara spontan di alam. Prinsip-prinsip termodinamika memainkan peran mendasar dalam deskripsi fenomena alam dan dianggap memiliki keberlakuan universal. Mengutip kata-kata Einstein, "termodinamika adalah satu-satunya teori yang memiliki kandungan universal, dan saya yakin bahwa landasan konseptualnya tidak akan pernah digugurkan".

Setelah masa Maxwell, selama sekitar seratus tahun, berbagai upaya dilakukan untuk mendamaikan konsep iblis tersebut dengan hukum-hukum termodinamika. Semua upaya itu terbukti keliru. Perlu dicatat bahwa Maxwell sendiri meyakini kebenaran hukum kedua termodinamika. Namun, pertanyaan yang muncul lebih mendalam: kita tidak dapat melanggar prinsip kedua karena kita tidak mampu melakukan apa yang dilakukan iblis tersebut; tetapi seandainya ada makhluk cerdas yang mampu melakukannya, apakah pelanggaran terhadap prinsip kedua itu mungkin terjadi?

Solusi untuk paradoks tersebut diusulkan oleh Charles Bennett dan Rolf Landauer berdasarkan prinsip yang dirumuskan pada tahun 1961 oleh Landauer sendiri, seorang fisikawan Amerika kelahiran Jerman. Prinsip ini menyatakan bahwa setiap kali satu bit informasi dihapus, sejumlah energi—setidaknya dalam jumlah minimum—akan dilepaskan ke lingkungan. Energi minimum ini sebanding dengan suhu melalui sebuah konstanta universal yang dikenal sebagai konstanta Boltzmann.

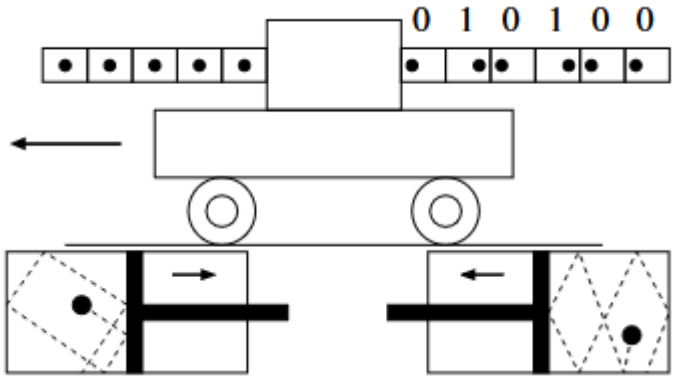
Sang "iblis" melakukan pengukuran terhadap molekul-molekul tersebut, dan hasil pengukurannya harus disimpan di dalam ingatannya. Karena kapasitas ingatannya terbatas—sebagaimana semua sumber daya untuk proses apa pun di alam semesta ini selalu terbatas—iblis tersebut pada akhirnya harus menghapus data itu untuk mengosongkan "sel-sel memori"-nya agar dapat melakukan pengukuran baru. Operasi penghapusan ini melibatkan pelepasan energi, sebagaimana dirumuskan dalam prinsip Landauer. Pada intinya, prinsip Landauer memperjelas bahwa informasi tidak dapat dihapus tanpa biaya: diperlukan energi untuk melakukannya.

Saat ini, superkomputer terbaik dalam hal efisiensi energi mampu melakukan hingga sekitar 50 miliar operasi (seperti penjumlahan atau perkalian dua angka) per detik untuk setiap watt daya yang dikonsumsi. Tingkat konsumsi ini sekitar seratus juta kali lebih tinggi daripada penggunaan energi minimum yang diprediksi oleh prinsip Landauer. Dengan demikian, komputer saat ini masih jauh dari efisien secara energi (perlu dicatat bahwa efisiensinya jauh di bawah otak manusia, yang memiliki sekitar 85 miliar neuron dan ribuan sinapsis per neuron untuk transmisi informasi, namun hanya mengonsumsi daya sebesar 10 watt). Untuk mendapatkan gambaran mengenai kemajuan yang telah dicapai, kita bisa melihat salah satu komputer elektronik pertama, ENIAC, yang mulai beroperasi pada tahun 1946 di Amerika Serikat; komputer ini menempati area seluas 180meter persegi dan memiliki berat 30ton (pada saat itu transistor belum ditemukan, sehingga konstruksinya menggunakan 18.000 tabung vakum termionik) serta mengonsumsi energi sekitar seribu miliar kali lebih banyak per operasi dibandingkan superkomputer masa kini.

Untuk lebih memahami hubungan antara informasi dan energi, ada baiknya kita meninjau contoh sederhana yang dirancang oleh Charles Bennett. Contoh ini menunjukkan bagaimana informasi dapat digunakan sebagai "bahan bakar" untuk menggerakkan sebuah kereta dorong. Bayangkan sebuah kereta dorong yang berada di lingkungan dengan suhu konstan. Sebuah pita yang terdiri dari deretan kotak kecil, dengan masing-masing kotak berisi satu molekul dimasukkan ke dalam kereta dorong tersebut (lihat bagian atas Gambar 3.8). Misalkan kita mengetahui posisi kiri atau kanan setiap molekul di dalam kotaknya. Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja yang diperlukan guna menggerakkan kereta dorong tersebut. Caranya adalah sebagai berikut:

masukkan sebuah piston tepat di tengah-tengah setiap kotak. Dengan mengetahui posisi molekul, kita dapat menentukan posisi piston yang tepat (lihat bagian bawah Gambar 3.8). Jika molekul berada di sisi kiri kotak, ia akan mendorong piston ke arah dinding kanan; jika molekul berada di sisi kanan, ia akan mendorong piston ke arah dinding kiri. Dalam kedua kasus tersebut, kita mengetahui arah pergerakan piston, yang memungkinkan kita menghasilkan kerja yang sebanding dengan suhu dan jumlah kotak.

Kerja ini kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan kereta. Perlu dicatat bahwa saat pita keluar dari kereta, molekul-molekul tersebut bisa berada di mana saja di dalam kotak masing-masing informasi mengenai posisi awal mereka telah hilang sepenuhnya karena telah "digunakan" sebagai bahan bakar untuk menggerakkan kereta. Pada akhirnya, kita memiliki lebih sedikit informasi namun lebih banyak energi. Sebaliknya, jika kita tidak mengetahui posisi molekul sejak awal, kita tidak akan bisa menghasilkan kerja yang bermanfaat. Memasukkan piston tanpa informasi ini sama saja dengan menebak-nebak: dalam separuh waktu, gas akan melakukan kerja terhadap piston, dan dalam separuh waktu lainnya, kita harus melakukan kerja terhadap gas—sehingga rata-rata kerja bersih yang dihasilkan adalah nol.



Gambar. 3.8 Pemanfaatan informasi untuk menghasilkan kerja. Informasi yang masuk (nilai bit 0 atau 1 yang merepresentasikan posisi kiri atau kanan molekul di dalam kotak) hilang pada tahap keluaran.

Yang menarik, konsep "iblis Maxwell" telah berhasil diwujudkan secara eksperimental. Sebagai contoh, pada tahun 2014, tim peneliti yang dipimpin oleh Jukka Pekola dari Universitas Aalto di Finlandia menciptakan sistem yang serupa dengan sebuah kotak berisi satu molekul. Mereka menggunakan satu elektron yang dapat berpindah di antara dua pulau logam berukuran sangat kecil (masing-masing berukuran sekitar satu mikron). Sebuah transistor elektron tunggal (versi teknologi modern dari sang iblis) digunakan untuk melacak posisi elektron tersebut. Dengan menghapus informasi posisi tersebut, tim peneliti berhasil menghasilkan kerja, mirip dengan cara informasi digunakan sebagai bahan bakar untuk menggerakkan kereta pada contoh sebelumnya.

Masih terlalu dini untuk memastikan apakah kemajuan eksperimental terkini ini akan menghasilkan cip komputer baru yang lebih efisien dalam hal panas di masa depan. Meski demikian, sungguh menarik bahwa paradoks "setan Maxwell" serta perdebatan lanjutan mengenai hubungan antara informasi dan energi kini dapat diteliti dalam lingkungan laboratorium. Setelah menelusuri hubungan mendalam antara energi dan informasi, kita dapat melangkah lebih jauh: teleportasi energi. Ya, dimungkinkan untuk mentransfer tidak hanya informasi, tetapi juga energi, seolah-olah energi tersebut "diteleportasikan" dari satu lokasi ke lokasi lain. Rahasianya terletak pada hubungan kuantum luar biasa yang dikenal sebagai *entanglement* (keterikatan): Alice dan Bob harus terlebih dahulu berbagi keadaan yang saling terikat (*entangled state*). Ibaratnya, mereka memegang untaian tak kasat mata dari jaringan kuantum, siap untuk mentransmisikan tidak hanya data, tetapi juga daya.

Pertama, kita perlu mengingat konsekuensi utama dari prinsip ketidakpastian: sistem kuantum tidak dapat berada dalam keadaan diam sempurna. Bayangkan sebuah jam bandul jika tidak diputar secara berkala, jam itu pada akhirnya akan berhenti di posisi kesetimbangannya, dengan bandul menggantung tegak lurus ke bawah. Namun, bandul kuantum tidak akan pernah bisa berhenti sepenuhnya. Jika hal itu terjadi, kita bisa mengetahui posisi sekaligus kecepatannya secara bersamaan yang berarti melanggar prinsip ketidakpastian Heisenberg. Ini berarti energinya tidak akan pernah bernilai tepat nol. Ini adalah aturan umum: energi sistem kuantum tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, bahkan dalam keadaan energi

terendah yang mungkin (yang dikenal sebagai "keadaan vakum"). Terlebih lagi, prinsip ketidakpastian berarti kita tidak dapat mengetahui energi dan waktu secara bersamaan dengan presisi mutlak. Akibatnya, bahkan dalam keadaan vakum, energi berfluktuasi seiring waktu dengan nilai kecil namun tidak nol. Akan tetapi, fluktuasi energi ini tidak dapat digunakan untuk menggerakkan mesin, karena fluktuasi pada titik mana pun bersifat sepenuhnya acak. Jika kita mencoba menghubungkan baterai ke sistem dalam keadaan vakum, separuh waktu fluktuasi tersebut akan mengisi daya baterai, dan separuh waktu lainnya justru akan mengurasnya.

Sekali lagi, *entanglement* hadir sebagai solusinya. Jika Alice dan Bob berbagi keadaan terjerat (yang dapat kita bayangkan sebagai dua qubit terjerat, satu dipegang oleh Alice dan yang lainnya oleh Bob), fluktuasi energi di laboratorium Alice berkorelasi dengan fluktuasi di laboratorium Bob. Dengan demikian, meskipun sistem keseluruhan berada dalam keadaan energi terendah, Bob dapat mengekstrak energi dengan cara berikut: Alice mengukur qubit miliknya dan mengirimkan hasil pengukuran tersebut kepada Bob melalui saluran komunikasi klasik. Dapat ditunjukkan bahwa Bob, dengan menggunakan informasi ini, dapat melakukan operasi pada qubit miliknya untuk menaikkannya ke tingkat energi yang lebih tinggi daripada keadaan dasarnya (*ground state*). Pada intinya, Bob memanfaatkan pesan Alice dan keterjeratan awal yang mereka bagi untuk meningkatkan energi qubitnya seolah-olah ia telah "mengisi daya" sebuah "baterai kuantum". Satu-satunya batasan operasi ini adalah kecepatan cahaya, yang menentukan transmisi pesan klasik Alice kepada Bob.

Teleportasi energi pertama kali diusulkan pada tahun 2008 oleh Masahiro Hotta dari Universitas Tohoku di Jepang. Pada tahun 2023, tim Raymond Laflamme di Universitas Waterloo di Kanada mendemonstrasikannya secara eksperimental untuk pertama kalinya menggunakan teknik resonansi magnetik nuklir. Penerapan di masa depan dapat mencakup penyediaan energi lokal bagi qubit individu dalam komputer kuantum memasok daya yang dibutuhkan untuk menjalankan algoritma kuantum. Dari sudut pandang konseptual, hal yang menarik adalah bahwa mekanika kuantum tidak hanya mempertahankan hubungan antara informasi dan energi, tetapi juga memperkuatnya, sehingga memungkinkan teleportasi keduanya.

BAB 4
SENSOR KUANTUM DAN TEKNOLOGI PENGUKURAN MASA DEPAN

4.1 INTERNET OF THINGS DAN PERKEMBANGAN SENSOR

Dunia modern kini semakin dipenuhi oleh sensor perangkat ini ada di mana-mana dan ukurannya terus mengecil. Pertumbuhan jumlah yang sangat besar serta potensi teknologi yang ditawarkan oleh sensor yang terintegrasi ke dalam berbagai perangkat elektronik di sekitar kita telah mewujudkan visi dan pengembangan *Internet of Things* (IoT). Visi yang memikat ini kini menjadi kenyataan, menjanjikan revolusi dalam kehidupan sehari-hari kita dengan dampak transformatif yang setara dengan Internet selama beberapa dekade terakhir. Pengaruh Komputer, jam tangan pintar (*smartwatch*), peralatan rumah tangga, kendaraan, dan banyak lagi perangkat-perangkat ini tidak hanya menjalankan fungsi utamanya, tetapi juga berperan sebagai "bagian hidup" dari ekosistem digital yang lebih luas. Perangkat-perangkat tersebut berinteraksi dan berkomunikasi dengan perangkat elektronik lain dalam suatu lingkungan seperti gedung atau bahkan seluruh kota sehingga memunculkan konsep rumah pintar (*smart home*) dan kota pintar (*smart city*). Saat ini, prospek yang menjanjikan ini membentuk pasar bernilai sekitar 300 miliar dolar AS, dengan perkiraan tingkat pertumbuhan tahunan sekitar 20% di masa mendatang.

Sudah banyak contoh nyata dari hal ini: alarm yang berbunyi lebih awal jika terdapat kemacetan lalu lintas dalam perjalanan menuju tempat kerja; pemberian insulin otomatis yang diatur berdasarkan pemantauan terus-menerus terhadap kadar glukosa pada pasien diabetes; pengelolaan otomatis peralatan rumah tangga agar beroperasi di luar jam sibuk konsumsi energi; jam tangan pintar yang menampilkan pesan atau surel secara instan sekaligus memantau performa atletik dan tanda-tanda vital seperti tekanan darah dan detak jantung; serta bel pintu video dan sistem alarm yang terhubung ke jaringan dan dapat dikendalikan dari jarak jauh melalui ponsel pintar. Di sektor otomotif dan transportasi, sensor sangat penting bagi kendaraan untuk mendeteksi lingkungan sekitarnya, sehingga memungkinkan sistem kemudi otonom yang aman. Dalam bidang pertanian, sensor digunakan untuk memantau kualitas tanah, pertumbuhan tanaman, dan pengelolaan air. Terakhir, sensor memegang peranan mendasar dalam kota pintar untuk mengumpulkan data terkait manajemen lalu lintas, penerangan umum, kualitas udara, dan banyak lagi. Realitas yang dinamis ini menghidupkan eksistensi kita, menjalin kehidupan kita semakin erat dengan teknologi, membuatnya kian "terhubung" dari hari ke hari, serta meningkatkan kualitasnya dengan cara-cara yang sebelumnya tak terbayangkan.

Pertumbuhan IoT berjalan beriringan dengan perkembangan kecerdasan buatan (AI). Teknik-teknik AI memungkinkan pengumpulan dan pemrosesan data secara *real-time* dari kendaraan yang bergerak untuk memantau dan mengelola kondisi lalu lintas, atau menyinkronkan lampu lalu lintas saat terjadi kecelakaan yang menimbulkan korban jiwa agar ambulans dapat tiba lebih cepat. AI juga dapat mendeteksi perilaku mengemudi yang berisiko, sehingga membantu menciptakan jalan raya yang lebih aman. Di balik berbagai prospek

menarik ini, muncul pula tantangan signifikan terkait keamanan dan privasi. Sebagai contoh, kita perlu mencegah pihak-pihak yang berniat jahat membuka pintu depan rumah atau mematikan sistem alarm kita dari jarak jauh. Selain itu, data sensitif seperti informasi kesehatan memerlukan perlindungan maksimal. Inilah sebabnya mengapa keamanan siber menjadi isu yang semakin mendesak dalam masyarakat modern tanpa langkah-langkah keamanan yang memadai, siapa pun dapat mengakses berbagai aspek kehidupan pribadi seseorang secara tidak sah. Dalam gambaran masa depan yang distopia, IoT bahkan bisa dipandang sebagai alat untuk membatasi kebebasan individu dengan cara mengontrol aktivitas, kontak, dan pergerakan orang. Beberapa cara konkret di mana IoT dapat memengaruhi kebebasan individu meliputi:

1) **Pemantauan perangkat pribadi**: Jika benda sehari-hari atau perangkat yang dapat dikenakan (*wearable devices*) dilengkapi dengan sensor dan koneksi IoT, aktivitas sehari-hari atau data kesehatan seseorang dapat dipantau.
2) **Geolokasi**: Jika perangkat yang terhubung dilengkapi teknologi geolokasi, hal ini dapat menyebabkan pemantauan lokasi seseorang secara terus-menerus, yang berdampak pada kebebasan bergerak dan privasi aktivitas mereka.
3) **Otomatisasi rumah**: Sistem otomatisasi rumah berbasis IoT dapat mengumpulkan data mengenai kebiasaan dan rutinitas rumah tangga individu. Jika informasi ini jatuh ke tangan yang salah, data tersebut dapat disalahgunakan untuk tujuan tidak etis, seperti pencurian identitas atau perencanaan tindak kriminal.
4) **Berbagi data kesehatan**: Perangkat medis yang terhubung dapat mengirimkan data kesehatan secara *real-time*. Jika data ini tidak dilindungi dengan memadai, pihak ketiga dapat mengaksesnya.

Untuk mengatasi kekhawatiran ini, sangatlah penting untuk menyusun regulasi yang tepat serta kebijakan keamanan yang tangguh, sekaligus memberdayakan masyarakat agar dapat mengendalikan data pribadi mereka. Menyeimbangkan inovasi teknologi dengan penghormatan terhadap privasi merupakan hal krusial guna memastikan bahwa IoT berkontribusi pada kesejahteraan sosial tanpa mengorbankan kebebasan individu.

4.2 SENSOR DAN SISTEM PENGUKURAN

Dari sudut pandang praktis, benda-benda sehari-hari yang terintegrasi ke dalam dunia digital melalui IoT mampu memperoleh dan mempertukarkan informasi mengenai lingkungan sekitarnya lewat berbagai jenis sensor. Pada dasarnya, IoT sangat bergantung pada kemampuan untuk menanamkan sensor ke dalam perangkat yang semakin ringkas dan hemat biaya. Oleh karena itu, jelaslah bahwa sama halnya dengan mikroprosesor pada komputer modern arah alami pengembangan sensor adalah menciptakan sensor yang lebih kecil dan lebih presisi. Sekali lagi, kita mungkin bertanya: Apa yang akan terjadi jika ukuran sensor hanya sebesar beberapa atom? Jawabannya adalah aturan mekanika kuantum akan mulai berperan; hal ini bisa menjadi batasan di satu sisi, namun di sisi lain, dapat membuka berbagai kemungkinan baru yang tidak dapat dicapai oleh sensor klasik. Mari kita coba memahami apa

itu sensor dan apakah aturan mekanika kuantum dapat meningkatkan fungsi utamanya, yaitu memperoleh informasi mengenai besaran fisik tertentu.

Pembaca tidak perlu heran jika kami mengalokasikan sebagian pembahasan dalam buku ini untuk topik sensor, mengingat perannya yang akan semakin menyatu dengan kehidupan kita dalam berbagai aspek. Evolusi menuju Industri 4.0 (yang dikenal sebagai Revolusi Industri Keempat) sangat bergantung pada integrasi sensor untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Penggunaannya akan terus meluas, serta berkontribusi pada peningkatan efisiensi, keselamatan, dan kualitas hidup. Hal ini sangat penting bagi Industri 5.0, yang merupakan evolusi signifikan dari Industri 4.0 dengan penekanan lebih besar pada interaksi manusia-mesin serta tujuan optimalisasi yang tidak hanya bersifat teknologis, tetapi juga sosial dan ekologis. Oleh karena itu, kami memandang penting untuk menelaah bagaimana sensor akan berkembang dalam waktu dekat melalui penerapan teknologi kuantum.

Sensor dapat didefinisikan sebagai perangkat yang kondisinya bergantung pada nilai suatu besaran fisik eksternal. Pengguna harus dapat membaca hasil pengukuran yang dilakukan oleh perangkat, sehingga memperoleh informasi mengenai besaran fisik yang ingin diketahui. Aktivitas ini terasa begitu alami hingga kita melakukannya setiap hari tanpa sadar untuk menafsirkan berbagai aspek lingkungan tempat kita tinggal. Namun, sering kali proses ini menuntut tingkat abstraksi dan standardisasi yang canggih.

Perhatikan saat kita memeriksa suhu ruangan di rumah atau mengukur suhu tubuh saat demam: dalam kedua situasi tersebut, kita menggunakan sensor yaitu termometer. Termometer elektronik modern telah sangat menyederhanakan proses ini dengan menampilkan suhu pada layar sehingga sangat mudah dibaca. Akan tetapi, kondisinya tidak selalu demikian. Termometer air raksa, yang digunakan hingga belum lama ini, memerlukan persiapan awal secara manual. Termometer harus diguncang dengan teknik yang tepat agar posisi air raksa turun di bawah tanda awal sebelum pengukuran dapat dimulai. Selanjutnya, termometer harus ditempatkan secara presisi pada tubuh, dan kita harus menunggu hingga air raksa bereaksi terhadap suhu serta naik di dalam tabung. Pembacaan hasil akhirnya yang bisa dianggap sebagai semacam "ritual" bagi anak-anak memerlukan keterampilan khusus dalam memegang perangkat agar dapat membaca suhu yang ditunjukkan oleh kolom air raksa secara akurat.

Proses pengukuran ini sebenarnya menyembunyikan prosedur yang sangat kompleks: penentuan skala dan satuan ukur untuk besaran yang sedang diukur. Meskipun derajat Celsius (yang juga disebut centigrade) terasa wajar bagi kita, perlu diingat bahwa hingga saat ini berabad-abad setelah skala tersebut pertama kali diusulkan oleh astronom Swedia, Anders Celsius, pada tahun 1742 belum ada satu standar internasional tunggal yang berlaku. Sebagian besar dunia masih menggunakan derajat Fahrenheit. Situasi serupa berlaku untuk semua satuan ukur yang umum digunakan (seperti panjang, massa, dan suhu), di mana terdapat penggunaan bersama antara Sistem Internasional (panjang dalam meter, massa dalam kilogram, waktu dalam detik, suhu dalam Celsius), sistem *centimeter-gram-second* (CGS), dan Sistem Imperial yang masih digunakan di Inggris Raya serta, dengan beberapa modifikasi, di

Amerika Serikat (panjang dalam inci atau kaki, massa dalam ons atau pon, suhu dalam Fahrenheit, dll.). Untuk satuan ukur lainnya, bahkan terdapat beberapa skala yang digunakan secara bersamaan, biasanya karena alasan historis. Hal ini terjadi, misalnya, pada pengukuran medan magnet, di mana satuan Gauss atau Tesla digunakan secara setara. Situasi menjadi lebih rumit karena skala yang berbeda terkadang digunakan untuk mengukur aspek yang berbeda dari fenomena fisik yang sama: satu skala mengukur nilai besaran fisik tersebut, sementara skala lainnya mengukur dampaknya terhadap manusia atau lingkungan. Saat kita mendengar berita tentang gempa bumi di televisi, informasi pertama yang disampaikan adalah intensitasnya.

Terkadang intensitas ini dinyatakan dalam skala Mercalli, dan di lain waktu dalam skala Richter. Keduanya merupakan skala yang berbeda: skala pertama mengukur dampak gempa terhadap permukaan bumi, sedangkan skala kedua mengukur energi yang dilepaskan oleh peristiwa seismik tersebut. Kedua skala ini tidak memiliki korelasi langsung, karena kerusakan yang ditimbulkan pada permukaan bumi dan dengan demikian peringkat pada skala Mercalli tidak hanya bergantung pada energi gempa, tetapi juga pada kondisi tanah, kekokohan bangunan, dan faktor-faktor lainnya. Penerapan satuan ukur universal yang disepakati bersama merupakan hal mendasar untuk menjamin keadilan dan ketepatan dalam perdagangan dan kegiatan ekonomi. Meskipun konsep ini tampak sederhana, penerapannya telah mengalami evolusi berkelanjutan yang didorong oleh inovasi teknologi. Dalam peradaban kuno, mulai dari Mesopotamia dan Mesir hingga Yunani dan Roma, *cubit* (hasta) digunakan sebagai satuan panjang. Istilah ini merujuk pada panjang lengan bawah, dari siku hingga ujung jari tengah. Dalam Kitab Kejadian, tertulis bahwa "panjang bahtera itu harus tiga ratus hasta, lebarnya 50 hasta, dan tingginya 30 hasta" setara dengan panjang sekitar 133 meter, lebar 22 meter, dan tinggi 13 meter, dengan asumsi panjang satu hasta Ibrani adalah 44,45 sentimeter. Namun, penggunaan hasta sebagai ukuran menimbulkan masalah yang cukup besar. Panjangnya sangat bervariasi antarwilayah, berkisar antara 43 hingga 50 sentimeter, dan juga dapat berubah seiring waktu bergantung pada panjang lengan bawah penguasa yang sedang memerintah.

Tidak adanya standar pengukuran yang seragam juga sering menjadi celah kecurangan dalam transaksi perdagangan. Salah satu contohnya adalah *vara* Meksiko, yang digunakan pada masa kekuasaan Spanyol di Amerika Latin. *Vara* merupakan satuan panjang yang setara dengan sekitar 0,84 meter, yang digunakan untuk pembagian atau penjualan tanah. Namun, nilai pastinya bisa sangat berbeda antara satu wilayah dengan wilayah lainnya. Dalam penjualan atau pemberian konsesi tanah, penjual bisa saja mengklaim bahwa ukuran satu *vara* lebih panjang daripada yang sebenarnya, sehingga memperbesar luas tanah yang tampak dan, pada akhirnya, meningkatkan harga jualnya.

Seiring dengan berkembangnya perdagangan dan Revolusi Industri, kebutuhan untuk menyeragamkan pengukuran panjang menjadi semakin mendesak. Pada tahun 1791, Majelis Nasional Prancis mengambil keputusan yang bisa disebut revolusioner: meter didefinisikan sebagai sepersepuluh juta bagian dari jarak antara Khatulistiwa dan Kutub Utara, yang diukur sepanjang garis meridian yang melewati Paris. Selanjutnya, tingkat presisi semakin

ditingkatkan melalui definisi "meter prototipe" sebuah batang platina-iridium dengan dua tanda yang menentukan panjangnya, yang disimpan di Sèvres, dekat Paris. Akan tetapi, bahkan bahan platina-iridium pun tidak kebal terhadap pengaruh waktu: perubahan suhu dan hilangnya beberapa atom akibat penguapan dapat mengubah panjangnya selama berabad-abad. Upaya untuk mendapatkan pengukuran yang jauh lebih andal menghasilkan definisi meter yang benar-benar baru. Pada tahun 1983, Konferensi Umum tentang Berat dan Ukuran yang ketujuh belas menetapkan definisi yang didasarkan pada prinsip dasar alam. Meter adalah jarak yang ditempuh cahaya dalam ruang hampa selama selang waktu yang didefinisikan secara tepat, yaitu 1/299.792.458 detik. Definisi ini memanfaatkan konstanta universal yaitu kecepatan cahaya dalam ruang hampa yang, sebagaimana dinyatakan dalam teori relativitas, bernilai sama di mana pun di alam semesta. Dengan demikian, tidak hanya presisi pengukuran yang belum pernah ada sebelumnya dapat terjamin, tetapi satuan pengukuran tersebut juga memiliki nilai yang bersifat universal. Definisi ini tidak bergantung pada kondisi peradaban kita di Bumi ataupun dimensi planet kita, melainkan mempertahankan maknanya sepanjang masa dan di segala tempat, baik yang berkaitan dengan Bumi dan manusia maupun tidak.

Pada titik ini, kami tidak dapat menahan diri untuk menyinggung sedikit mengenai makna konstanta universal. Memang benar bahwa kecepatan cahaya merupakan konstanta universal sebuah landasan bagi pengetahuan kita. Namun, nilai numeriknya bergantung pada satuan pengukuran yang digunakan; dalam hal ini, meter dan detik. Di alam semesta kita, terdapat konstanta universal yang bahkan lebih menarik karena tidak dipengaruhi oleh satuan pengukuran apa pun: konstanta ini berupa bilangan murni. Inilah yang dikenal sebagai konstanta struktur halus (*fine-structure constant*), yang dilambangkan dengan α, dengan nilai numerik sebagai berikut:

$$\alpha = 2\pi \frac{e^2}{hc} \approx \frac{1}{137.036}$$

Besaran ini yang, selain faktor 2π, merupakan rasio antara kuadrat muatan elektron dan hasil kali konstanta Planck (h) dengan kecepatan cahaya (c) memiliki arti yang sangat mendasar. Jika nilainya sedikit saja berbeda, alam semesta kita akan menjadi sangat lain, dan kita sebagai manusia mungkin tidak akan pernah ada. Fakta bahwa konstanta ini memiliki nilai yang persis seperti itu dan bukan nilai lainnya tetap menjadi salah satu misteri besar dalam sains; sebuah tantangan intelektual yang terus memancing rasa ingin tahu serta imajinasi para peneliti di seluruh dunia. Richard Feynman, salah satu pemikir paling cemerlang dalam fisika abad ke-20, menulis bahwa alasan mengapa konstanta ini memiliki nilai tersebut tetaplah "sebuah misteri, dan semua fisikawan teoretis yang hebat memajang angka ini di dinding mereka serta memikirkannya secara mendalam."

4.3 SENSOR DAN GAYA DASAR ALAM

Mari kita kembali membahas sensor. Seperti yang telah kita lihat, sensor hanyalah alat untuk mengukur besaran fisik. Proses pengukuran tersebut melibatkan suatu dialog (interaksi) yang sering kali tak kasatmata antara alat ukur dan alam semesta yang ingin kita pahami. Ambil contoh termometer: alat ini menunjukkan suhu ruangan yakni hasil "pengukuran" melalui interaksi dengan udara di sekitarnya. Apa yang kita persepsikan sebagai suhu sebenarnya adalah energi molekul-molekul udara yang bergerak secara acak saat bertumbukan dengan termometer. Namun, jika kita mengamati peristiwa ini dari dekat melalui lensa yang mampu membawa kita ke dunia partikel mikroskopis kita akan mendapati bahwa konsep "tumbukan" kita berubah. Atom dan molekul bergerak di bawah pengaruh gaya listrik, saling memantul tanpa pernah benar-benar bersentuhan.

Akan tetapi, gaya listrik bukanlah satu-satunya gaya yang ada di alam; di sisi lain, cara kerja sensor bergantung pada gaya yang menjadi perantara interaksinya dengan dunia luar. Jadi, timbul pertanyaan: selain gaya listrik, gaya apa lagi yang ada di alam semesta kita? Hal ini membawa kita kembali ke abad ke-17, saat Newton menunjukkan bahwa gaya yang menjaga kita tetap berpijak di Bumi maupun gaya yang mempertahankan orbit benda-benda langit merupakan perwujudan dari satu gaya yang sama: gaya gravitasi. Kemudian, pada abad ke-19, Faraday dan Ampère menunjukkan bahwa gaya listrik dan gaya magnet sebenarnya adalah gaya yang sama. Selanjutnya, seorang jenius fisika besar, James Clerk Maxwell, menyatukan kedua gaya tersebut dan menemukan keberadaan gelombang elektromagnetik. Saat ini, kita mengetahui bahwa cahaya maupun gelombang radio pada dasarnya adalah gelombang elektromagnetik. Akhirnya, pada abad ke-20, pemahaman kita diperkaya oleh dua gaya lainnya: gaya nuklir lemah dan gaya nuklir kuat. Kedua gaya ini masing-masing menjelaskan fenomena radioaktivitas serta "perekat" yang menyatukan proton di dalam inti atom melawan gaya tolak-menolak alami di antara mereka. Proton, yang memiliki muatan listrik sejenis, cenderung saling tolak-menolak; gaya nuklir kuatlah yang melawan gaya tolak tersebut dan menjaga proton-proton itu tetap terikat di dalam inti atom.

Saat ini, kita mengetahui bahwa semua gaya yang ada di alam dapat dikembalikan pada empat gaya dasar: gaya elektromagnetik antara muatan listrik, gaya gravitasi antara massa, serta gaya lemah dan gaya kuat yang bekerja di dalam inti atom. Keempat gaya dasar inilah elektromagnetik, gravitasi, lemah, dan kuat yang mengatur jalannya alam semesta. Meskipun dua gaya terakhir bekerja pada skala yang sangat kecil, pemahaman dan pengukuran interaksi elektromagnetik serta gravitasi membuka jalan bagi pemahaman mendalam tentang dunia kita. Sensor, yang merespons gaya-gaya ini, merupakan sarana bagi kita untuk menyimak inti sari alam sebuah langkah maju yang krusial dalam perjalanan sains dan teknologi modern.

Setelah sensor mengubah kondisinya akibat interaksi dengan objek yang diukur, langkah berikutnya adalah menerjemahkan perubahan tersebut menjadi informasi yang diinginkan. Mari kita ambil contoh suhu lagi: Bagaimana termometer, yang berinteraksi dengan molekul udara, dapat menunjukkan suhu yang tepat? Untuk itu, digunakan proses standar yang mencakup titik acuan awal dan skala pengukuran. Semua orang tahu bahwa menurut skala Celsius, air membeku pada suhu 0 derajat dan mendidih pada 100 derajat, dengan asumsi

termometer dikalibrasi pada permukaan laut dan tekanan atmosfer standar. Namun, ini hanyalah salah satu konvensi yang mungkin; seperti yang telah kita lihat, ada konvensi lain yang sama validnya misalnya, skala Fahrenheit.

Prinsip kalibrasi dan konvensi yang sama berlaku untuk semua sensor lainnya, apa pun besaran yang diukur baik itu tekanan, kelembapan, intensitas cahaya, maupun kecepatan angin. Sebagai contoh, untuk menentukan konsentrasi ion dalam suatu larutan, kita memanfaatkan fakta bahwa ion yang merupakan molekul bermuatan menghasilkan arus listrik yang sebanding dengan konsentrasinya. Dengan mengukur arus ini, kita dapat menyimpulkan konsentrasi ion tersebut. Demikian pula, *photoresistor* mengubah arus yang mengalir melaluinya sebagai respons terhadap intensitas cahaya yang diterimanya; dengan mengukur arus ini, kita dapat melacak kembali intensitas sumber cahayanya. Dengan cara yang sama, sensor ultrasonik menghitung jarak ke suatu objek dengan mengukur waktu pantulan gema suara, sementara sensor inframerah yang umum digunakan dalam sistem keamanan mendeteksi radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda hangat seperti tubuh penyusup. Sensor ini hanya aktif jika radiasi melampaui ambang batas tertentu guna menghindari alarm palsu akibat hewan kecil (misalnya, kita tentu tidak ingin alarm berbunyi hanya karena ada kucing yang lewat). Dalam semua kasus ini, kuncinya terletak pada kalibrasi sensor dan pemilihan skala pengukuran. Setelah parameter-parameter ini ditetapkan, sensor dapat memberikan pengukuran yang akurat terhadap besaran fisik yang dimaksud, sehingga hasilnya dapat disampaikan melalui angka sederhana beserta satuan pengukurannya. Sejak akhir abad yang lalu, para peneliti mulai menyusun teori dan melakukan eksperimen laboratorium terkait pembuatan sensor yang mematuhi hukum mekanika kuantum.

Untuk memahami sepenuhnya potensi revolusioner perangkat-perangkat ini, sangatlah penting untuk meninjau transformasi yang dihadirkan oleh mekanika kuantum dalam proses interaksi dan pengukuran. Kita telah menyaksikan manfaat signifikan yang dihasilkannya bagi bidang komputasi dan transmisi informasi. Kini, muncul pertanyaan yang wajar: Bagaimana inovasi kuantum dapat meningkatkan kinerja dan efektivitas sensor? Kami akan berupaya menjawab pertanyaan ini pada bagian selanjutnya dari bab ini.

4.4 OSILASI RABI DAN SENSOR QUBIT

Berbeda dengan persyaratan rumit yang diperlukan untuk menciptakan komputer kuantum, bidang sensor kuantum lebih mudah diakses dan serbaguna, sehingga membuka jalan bagi berbagai kemungkinan dan aplikasi. Inti dari jenis sensor ini terletak pada kemampuannya untuk menyiapkan superposisi keadaan sesuai dengan hukum mekanika kuantum, bahkan tanpa harus menggunakan keterjeratan (*entanglement*) sebuah komponen kunci dalam komputasi kuantum.

Bayangkan kita melihat melampaui apa yang dapat ditangkap oleh mata kita, memasuki ranah partikel dan gelombang. Sejak awal mula mekanika kuantum, kita menyadari bahwa atom unit penyusun dasar materi berperilaku dengan cara yang tampak misterius saat dipengaruhi oleh medan elektromagnetik. Di dunia kuantum, atom memancarkan dan menyerap radiasi hanya pada frekuensi-frekuensi tertentu. Seolah-olah elektron, dalam

pergerakannya mengelilingi inti atom, hanya dapat melakukan lompatan kuantum yang telah ditentukan dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya; lompatan ini hanya terjadi ketika elektron menerima energi yang tepat dari gelombang elektromagnetik yang mengenainya. Skenario ini mengarah pada rumus Planck yang terkenal, yang menghubungkan energi gelombang elektromagnetik dengan frekuensinya, serta mengungkap kuantisasi tingkat energi atom yaitu fakta yang sangat berlawanan dengan intuisi bahwa tidak semua nilai energi mungkin dimiliki oleh atom. Gelombang elektromagnetik dapat memicu lompatan kuantum hanya jika frekuensinya νberkaitan dengan selisih energi Eantara dua tingkat energi atom sesuai dengan rumus Planck$E = h\nu$, di mana h adalah konstanta universal Planck.

Fakta bahwa transisi dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya hanya terjadi pada frekuensi tertentu menunjukkan kepada kita bahwa tidak semua nilai energi dapat dimiliki oleh elektron yang mengorbit inti atom hanya nilai-nilai energi tertentu yang dimungkinkan. Hal ini berarti bahwa tingkat-tingkat energi tersebut bersifat "diskret" atau "terkuantisasi". Fenomena ini merupakan hal yang mendasar bagi perkembangan mekanika kuantum, sekaligus membuktikan bahwa atom dapat menjadi sensor medan elektromagnetik yang sangat baik. Sebagai contoh, kita dapat menggunakannya untuk mendeteksi keberadaan radiasi dengan frekuensi tertentu di suatu ruang. Jika sebuah atom melompat dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya (singkatnya, mengalami "eksitasi") lalu memancarkan cahaya saat kembali ke tingkat asalnya, hal ini berarti terdapat radiasi dengan frekuensi yang "tepat" untuk memicu eksitasi tersebut (sesuai dengan rumus Planck yang baru saja dituliskan). Dengan demikian, atom bukan sekadar pengamat pasif dalam peristiwa kuantum ini, melainkan juga detektor yang peka terhadap medan elektromagnetik.

Namun, bukan itu saja: atom juga dapat menjadi detektor medan magnet statis yang akurat. Berkat efek Zeeman yang ditemukan oleh fisikawan Belanda Pieter Zeeman (penerima Hadiah Nobel Fisika tahun 1902 yang juga seorang pemain biola ulung) kita mengetahui bahwa saat berada dalam medan magnet statis, frekuensi penyerapan radiasi oleh atom bergantung pada intensitas medan magnet itu sendiri. Dengan demikian, pengukuran frekuensi radiasi yang diserap memungkinkan kita menentukan intensitas medan magnet secara presisi, sekaligus membuka jalan bagi generasi baru sensor kuantum yang mampu mengukur pengaruh medan magnet terhadap satu atom tunggal. Sebagai contoh, ion yang diperangkap menggunakan teknik pengembangan komputer kuantum (seperti yang dijelaskan dalam Bab 2) dapat digunakan untuk mengukur variasi spasial intensitas medan magnet secara akurat, dengan resolusi dalam skala beberapa nanometer (satu nanometer setara dengan sepersejuta milimeter).

Namun, bagaimana cara kita mengukur frekuensi penyerapan radiasi oleh atom? Di sinilah peran osilasi Rabi (yang dinamai menurut Isidor Isaac Rabi, penerima Hadiah Nobel Fisika tahun 1944). Bayangkan sebuah arena tempat atom dan berkas radiasi elektromagnetik saling berinteraksi. Fenomena ini menjadi inti dari berbagai perangkat, mulai dari sensor kuantum yang menelusuri batas-batas ilmu pengetahuan dan mesin resonansi magnetik yang memindai tubuh manusia, hingga komponen dasar penyusun komputer kuantum. Kunci untuk memahami osilasi Rabi terletak pada bagaimana atom "merasakan" keberadaan medan

elektromagnetik eksternal. Bayangkan adanya dua tingkat energi, ibarat dua nada dalam partitur musik. Ketika cahaya mengenai atom pada frekuensi yang tepat layaknya seorang konduktor yang mengatur tempo atom mulai berosilasi di antara kedua "nada" tersebut dengan laju yang bergantung pada intensitas cahaya. Osilasi inilah kunci untuk mengetahui intensitas medan elektromagnetik, yang sekaligus mengubah atom menjadi sensor kuantum yang canggih. Setiap kali kita mengukur laju ini, kita memasuki ranah probabilitas; di sini, mekanika kuantum memungkinkan kita memprediksi seberapa sering atom akan berada pada satu nada dibandingkan nada lainnya. Dengan mengulangi eksperimen berkali-kali, kita dapat memperoleh gambaran yang semakin presisi mengenai osilasi tersebut, ibarat sedang menyetem instrumen musik yang sangat halus. Pada dasarnya, dengan mengukur keadaan sistem pada waktu yang berbeda, kita dapat merekonstruksi frekuensi osilasi antara kedua "nada" tersebut. Karena frekuensi ini bergantung pada intensitas medan elektromagnetik eksternal, sensor kuantum pada akhirnya mengukur intensitas tersebut.

Akan tetapi, osilasi ini terganggu oleh interaksi dengan kumpulan atom dan partikel lain yang tak teratur di lingkungan eksternal, yang cenderung meredamnya. Semakin kecil gangguan ini yang dikenal sebagai dekoherensi semakin baik kita dapat memanfaatkan ranah kuantum: semakin banyak osilasi yang dapat kita amati sebelum dekoherensi meredamnya, semakin akurat kita dapat mengukur frekuensinya.

Mempertahankan osilasi Rabi dan dengan demikian, koherensi kuantum untuk durasi yang semakin lama merupakan tantangan bagi teknologi kuantum. Koherensi ini berpotensi merevolusi cara kita mengukur, mengamati, dan berinteraksi dengan dunia pada tingkat subatomik. Berkat osilasi Rabi, kita dapat merancang perangkat yang kelak mungkin mengubah secara radikal cara kita menjalani hidup, bekerja, dan menjaga kesehatan.

4.5 RESONANSI MAGNETIK NUKLIR

Mekanisme dasar yang melandasi penginderaan kuantum juga menjadi dasar bagi Resonansi Magnetik Nuklir (NMR). Berangkat dari wawasan perintis Rabi, teknik ini sebuah permata berharga dalam khazanah teknologi modern telah berkembang berkat pemikiran cemerlang Felix Bloch dan Edward Purcell. Keduanya dianugerahi Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1952 karena berhasil mengubah konsep abstrak menjadi instrumen yang sangat bermanfaat.

Awalnya dieksplorasi oleh para ahli kimia untuk menelisik inti materi dan oleh fisikawan untuk mengungkap rahasia yang tersembunyi dalam struktur material, NMR kini telah menunjukkan fleksibilitas yang luar biasa. Penerapannya mencakup berbagai bidang, mulai dari industri farmasi di mana NMR berperan krusial, misalnya dalam menentukan kemurnian dan kadar bahan aktif saat pengembangan obat baru hingga ke kedalaman Bumi, tempat teknik ini membantu mengungkap komposisi hidrokarbon.

Namun, dalam dunia kedokteranlah NMR memainkan peran utama, dengan membuka jendela untuk melihat dunia tersembunyi di dalam tubuh kita. Teknik ini mampu mendiagnosis tumor serta berbagai penyakit atau kelainan organ dalam lainnya tanpa memerlukan prosedur

invasif ataupun memaparkan pasien pada radiasi berbahaya; hal ini berbeda dengan *Computed Tomography* (CT) yang memiliki risiko terkait paparan sinar-X dosis tinggi.

Penting untuk digarisbawahi bahwa dalam aplikasi medis seperti halnya penggunaan NMR lainnya fokus utamanya bukanlah pada sinyal yang berasal dari satu atom tunggal, melainkan pada sinyal rata-rata yang dihasilkan oleh jenis atom tertentu (misalnya hidrogen) dengan konsentrasi tertentu di dalam jaringan tubuh manusia, di bawah pengaruh medan elektromagnetik yang tepat. NMR menggunakan magnet yang sangat kuat untuk menghasilkan medan magnet intens yang kekuatannya puluhan ribu kali lipat dibandingkan medan magnet Bumi. Saat pasien memasuki medan magnet ini, inti atom hidrogen di dalam tubuh (terutama yang terdapat pada air dan jaringan lemak) akan mensejajarkan diri dengan arah medan magnet tersebut. Setelah inti-inti atom tersebut sejajar, mesin NMR memancarkan gelombang radio (pulsa frekuensi radio) ke arah tubuh. Pulsa berenergi ini menyebabkan inti hidrogen yang tadinya sejajar untuk sementara waktu bergeser dari posisi kesejajaran tersebut. Begitu pulsa frekuensi radio dihentikan, inti-inti atom cenderung kembali ke keadaan semula dan mensejajarkan diri kembali dengan medan magnet.

Saat proses ini berlangsung, mereka memancarkan sinyal radio yang kemudian ditangkap oleh alat penerima khusus. Proses kembalinya inti atom ke keadaan semula ini terjadi dengan kecepatan yang berbeda-beda, bergantung pada jenis jaringan tempat inti atom tersebut berada. Sinyal yang dipancarkan oleh inti atom dikumpulkan dan dianalisis oleh komputer. Perbedaan cara jaringan melepaskan energi dan kembali ke keadaan sejajar semula memungkinkan kita untuk membedakan berbagai jenis jaringan.

Dengan memanfaatkan data tersebut, komputer menghasilkan citra area yang diperiksa; citra ini bisa sangat mendetail dan sangat berguna untuk memvisualisasikan otak, otot, jantung, serta tumor tanpa menggunakan radiasi pengion. Sementara NMR menggunakan kumpulan atom untuk memetakan kondisi internal tubuh manusia, sensor kuantum justru "mendengarkan" sinyal dari satu atom tunggal. Sebagaimana akan kita lihat, dengan memanfaatkan hukum keterikatan kuantum (*quantum entanglement*), sensor kuantum mampu melampaui batasan teknologi klasik pendahulunya, sekaligus membuka jalan menuju ranah baru di mana hakikat realitas dapat diukur dengan tingkat kejelasan yang belum pernah tercapai sebelumnya.

4.6 BATAS HEISENBERG PADA SENSOR KUANTUM

Bayangkan Anda harus mengukur panjang meja makan. Dengan penggaris di tangan, dalam beberapa detik kita bisa menyatakan ukurannya, misalnya, 127 sentimeter. Dalam kehidupan sehari-hari, perkiraan kasar seperti ini sering kali sudah cukup, namun para ilmuwan membutuhkan lebih dari itu: mereka perlu mengetahui seberapa andal pengukuran tersebut. Dengan kata lain, sangatlah penting untuk mengetahui galat (*error*) yang terkait dengannya yaitu, seberapa besar tingkat presisi di balik angka tersebut. Banyak faktor dapat memengaruhi pengukuran: mungkin posisi penggaris tidak sejajar sempurna, mungkin kita hanya melihat sekilas sehingga melewatkan kelebihan satu milimeter atau lebih, atau mungkin gangguan sesaat menyebabkan kita salah menghitung. Terkait pengukuran presisi, sumber

potensi galat sangat beragam dan sering kali tidak kentara banyak yang sulit dikendalikan dan beberapa bahkan tidak diketahui. Hal ini memunculkan pertanyaan: Bagaimana kita bisa benar-benar yakin akan presisi suatu pengukuran?

Solusinya terletak pada protokol estimasi galat yang ketat secara ilmiah dan diakui secara universal. Proses ini, yang sudah dikenal oleh banyak mahasiswa sains sejak tahun pertama kuliah, melibatkan pengulangan pengukuran dalam kondisi yang idealnya identik sebanyak berkali-kali. Gagasan dasarnya adalah jika galat yang terjadi selama pengukuran bukan bersifat sistematis (misalnya, akibat instrumen yang tidak dikalibrasi dengan baik atau digunakan secara keliru), maka semua efek yang tidak diinginkan yang memengaruhi pengukuran akan menghasilkan galat acak yang terkadang meningkatkan dan terkadang menurunkan hasil pengukuran.

Dengan kata lain, jika kita mengukur meja sebanyak seratus kali, kita akan memperoleh daftar hasil yang tidak identik terkadang 127,1 sentimeter, di lain waktu 126,7, dan seterusnya. Dari daftar data ini, bagaimana cara kita merekonstruksi hasil pengukuran serta besaran galat pengukuran itu sendiri? Di sinilah statistik berperan. Dengan mengulangi pengukuran berkali-kali, kita tidak hanya dapat menemukan nilai rata-rata yang memberikan gambaran paling akurat mengenai panjang meja tersebut tetapi juga mengetahui seberapa besar "sebaran" berbagai hasil pengukuran di sekitar nilai rata-rata tersebut. Ukuran dispersi ini dikenal sebagai standar deviasi, dan ia memberikan indikasi berharga mengenai tingkat ketidakpresisian yang lazim dalam pengukuran kita. Dalam praktiknya, metode ini memungkinkan kita menavigasi "rimba" data; ia berfungsi sebagai kompas andal untuk memilah variasi kecil maupun hal-hal yang tampak kontradiktif, serta membantu kita menetapkan hasil pengukuran akhir beserta tingkat presisinya.

Pada dasarnya, dengan mengukur meja tersebut sebanyak seratus kali, kita dapat menyatakan dengan pasti, misalnya, bahwa panjangnya adalah 127 sentimeter (nilai yang dihitung sebagai rata-rata aritmetika dari seluruh pengukuran berulang), dengan margin ketidakpastian sebesar 0,3 sentimeter. Standar deviasi memiliki tingkat kepentingan yang setara dengan nilai rata-rata. Sebagai contoh, dalam tes darah, terdapat nilai acuan berupa batas bawah dan batas atas untuk tes yang dilakukan. Nilai-nilai ini diperoleh berdasarkan distribusi hasil tes tersebut di dalam populasi. Kita baru dapat menganggap suatu hasil sebagai kondisi abnormal jika ditemukan nilai yang menyimpang secara signifikan dari rentang antara batas acuan bawah dan atas yang berarti terdapat penyimpangan sebesar beberapa standar deviasi dari nilai rata-rata populasi.

Kita menginginkan sensor yang memberikan respons dengan presisi setinggi mungkin. Lantas, bagaimana cara meningkatkan presisi pengukuran? Solusinya terletak pada hukum bilangan besar, salah satu aturan dasar statistik: semakin banyak pengukuran yang kita lakukan, semakin dekat nilai rata-rata kita dengan nilai sebenarnya dari objek yang diukur. Terlebih lagi, galat (*error*) dalam pengukuran kita tidak hanya berkurang, tetapi berkurang mengikuti aturan yang pasti: galat tersebut berkurang secara proporsional terhadap akar kuadrat dari jumlah pengulangan pengukuran. Sebagai contoh, jika pengukuran meja sebanyak 100 kali menghasilkan galat sebesar satu milimeter, maka untuk meningkatkan presisi hingga

sepersepuluh milimeter artinya meningkatkan presisi sepuluh kali lipat kita perlu melakukan pengukuran tidak kurang dari 10.000 kali! Lalu, bagaimana jika kita ingin mencapai presisi hingga seperseratus milimeter? Kita harus melakukan pengukuran sebanyak satu juta kali. Dalam praktiknya, ini berarti setiap kali kita melipatgandakan jumlah pengukuran, galat tidak berkurang setengahnya, melainkan hanya berkurang sebesar faktor akar kuadrat dari dua.

Mungkin mengejutkan untuk mengetahui bahwa batasan pengurangan galat ini—yang dikenal sebagai batas *shot noise* bukanlah akibat dari kekurangan dalam kemampuan kita melakukan pengukuran yang akurat, melainkan merupakan batasan teoretis. Hal ini menunjukkan bahwa tidak peduli seberapa jauh kita menyempurnakan teknik atau seberapa tinggi presisi yang kita tanamkan pada alat ukur (bayangkan membuat alat yang sepuluh kali lebih presisi), pengurangan galat melalui pengukuran berulang akan selalu mengikuti aturan yang sama: peningkatan presisi hanya akan terjadi secara proporsional terhadap akar kuadrat dari jumlah pengukuran yang dilakukan.

Namun, apakah ada kemungkinan untuk melampaui batasan yang ditetapkan oleh pengukuran klasik ini? Sekali lagi, mekanika kuantum hadir membantu kita melalui fenomena seperti *entanglement* (keterikatan kuantum), yang menghubungkan partikel atau sistem dengan cara-cara yang melampaui akal sehat. Melalui *entanglement*, sifat-sifat satu partikel dapat terhubung secara langsung dengan sifat partikel lainnya, tidak peduli seberapa jauh jarak yang memisahkan keduanya. Strategi di sini sangat berbeda dari pendekatan klasik tradisional, yang mengharuskan pengulangan pengukuran berkali-kali menggunakan satu sensor untuk meminimalkan galat. Melalui pendekatan kuantum, kita memanfaatkan keterikatan (*entanglement*) untuk menyinkronkan banyak sensor agar beroperasi sebagai satu sistem kompleks yang utuh. Kelompok sensor yang terkoordinasi ini mampu melakukan pengukuran dengan tingkat presisi yang jauh melampaui batasan teknik klasik, sehingga membuka peluang baru dalam pengumpulan data yang akurat dan andal. Dalam konteks ini, apa yang disebut sebagai "keadaan kucing Schrödinger" (*Schrödinger's cat states*) memegang peranan mendasar. Istilah ini diambil dari eksperimen pikiran yang digagas oleh Schrödinger yang telah dibahas pada Bab 2 di mana seekor kucing dianggap berada dalam kondisi hidup sekaligus mati hingga saat pengamatan dilakukan.

Dalam konteks sensor, konsep ini diwujudkan dengan menyiapkan N qubit dalam keadaan superposisi. Keadaan kucing Schrödinger didefinisikan sebagai superposisi antara keadaan di mana seluruh qubit berada di "Kutub Utara" (setara dengan "kucing hidup") dan keadaan di mana seluruh qubit berada di "Kutub Selatan" (setara dengan "kucing mati"). Sensor-sensor ini saling "terkait" (*entangled*) dan berinteraksi secara kolektif dengan objek yang sedang diukur. Inti dari pendekatan ini adalah bahwa alih-alih melakukan N pengukuran secara terpisah, sensor-sensor tersebut melakukan satu pengukuran kolektif. Hasil akhirnya sungguh luar biasa: galat pengukuran tidak berkurang mengikuti hukum akar kuadrat klasik dari jumlah pengukuran, melainkan berkurang secara proporsional terhadap jumlah total sensor yang terlibat. Hal ini merupakan kemajuan yang sangat signifikan dan merevolusi cara kita mengumpulkan serta menafsirkan data.

Pengurangan kesalahan yang signifikan ini yang berkurang secara proporsional dengan jumlah sensor yang terlibat dikenal sebagai batas Heisenberg. Hal ini merepresentasikan tingkat presisi maksimum yang secara teoretis dapat dicapai dalam pengukuran di alam semesta kita, dan diperoleh dengan memanfaatkan sepenuhnya sifat-sifat keterikatan kuantum (*quantum entanglement*). Ini merupakan lompatan kualitatif dibandingkan metode klasik karena, dengan memanfaatkan korelasi kuantum antar-sensor, informasi yang jauh lebih presisi mengenai objek yang diukur dapat diperoleh. Dengan demikian, keterikatan meningkatkan kemampuan sensor kuantum ke tingkat presisi dan sensitivitas yang tidak dapat ditandingi oleh sensor tradisional. Pertimbangkan sebuah eksperimen teoretis: sebuah sensor klasik memiliki presisi sepuluh kali lebih tinggi dibandingkan satu sensor kuantum tunggal. Sekilas, sensor klasik tampak lebih unggul.

Namun, keterikatan mengubah aturan mainnya. Dengan menghubungkan sepuluh sensor kuantum dalam keadaan terikat (*entangled state*), kita mencapai tingkat presisi yang setara dengan sensor klasik. Dengan seratus sensor yang terikat, kita meningkatkan presisi hingga sepuluh kali lipat dibandingkan sensor klasik; dengan seribu sensor, peningkatannya mencapai seratus kali lipat. Kemampuan untuk meningkatkan presisi melalui keterikatan ini menunjukkan skalabilitas dan potensi yang sungguh luar biasa. Hal ini memberikan keunggulan kompetitif yang signifikan bagi sensor kuantum, menjadikannya alat yang berpotensi revolusioner dalam berbagai aplikasi mulai dari fisika partikel hingga kedokteran, serta dari astronomi hingga keamanan siber.

Akan tetapi, perwujudan praktis sensor kuantum terikat berskala besar menghadirkan tantangan teknologi yang luar biasa. Menciptakan dan mempertahankan keadaan terikat di antara banyak sensor memerlukan presisi dan pengendalian kondisi eksperimental yang sangat ketat, serta teknologi canggih untuk memanipulasi dan mengukur sistem kuantum. Terlepas dari tantangan-tantangan tersebut, potensi keuntungan yang sangat besar dari sensor kuantum telah mendorong pembelajaran teoretis maupun terapan yang intensif. Sebagaimana akan kita lihat pada bagian selanjutnya, upaya-upaya ini telah menghasilkan kemajuan signifikan, membuka jalan bagi penemuan dan aplikasi baru yang sebelumnya dianggap hampir seperti fiksi ilmiah. Perkembangan semacam itu tidak hanya menjanjikan peningkatan kemampuan kita dalam mengukur dan mengamati dunia, tetapi juga menawarkan wawasan untuk memahami realitas itu sendiri secara lebih mendalam, sesuai dengan aturan-aturan dunia kuantum.

4.7 PENGEMBANGAN SENSOR KUANTUM

Mari kita cermati lebih dalam dunia sensor kuantum sebuah ranah terdepan yang menjanjikan perluasan signifikan atas kemampuan kita untuk mendeteksi hal-hal yang tak terlihat. Berbeda dengan persyaratan rumit yang diperlukan untuk membangun komputer kuantum, rekayasa sensor kuantum menawarkan cakupan yang jauh lebih mudah dijangkau. Inti dari teknologi ini adalah kemampuan untuk menyiapkan superposisi dari dua keadaan sistem apa pun sebuah persyaratan yang jauh lebih ringan dibandingkan dengan persyaratan

untuk komputasi kuantum. Hal ini membuka pintu bagi berbagai kemungkinan yang sangat luas.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, sensor kuantum tidak secara mutlak mengharuskan penggunaan *entanglement* (keterikatan kuantum), berbeda dengan komputasi kuantum yang menjadikannya elemen krusial. Namun, bukan berarti *entanglement* tidak berguna: sebagaimana baru saja kita lihat, fenomena ini sangat penting untuk mendorong sensor agar mencapai batas Heisenberg dan memanfaatkan sepenuhnya keunggulan kuantum, dengan prospek mencapai tingkat presisi yang tak terbayangkan beberapa tahun yang lalu.

Saat menelusuri seluk-beluk pembuatan sensor kuantum, kita menjumpai beragam material dan arsitektur, yang masing-masing memiliki karakteristik dan potensi unik. Kita dapat mengklasifikasikan sensor ke dalam dua kelompok utama: di satu sisi, terdapat sensor yang mengandalkan atom tunggal atau beberapa elemen dasar, seperti ion yang terperangkap (*trapped ions*) atau seperti yang akan segera kita lihat cacat pada struktur berlian; di sisi lain, terdapat sensor makroskopis yang, terlepas dari ukurannya, tetap mempertahankan sifat-sifat kuantum yang mengejutkan.

SQUID sebagai Sensor Kuantum

Salah satu contoh menarik dari kategori kedua adalah SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) dan kondensat Bose–Einstein. SQUID merupakan perangkat yang dirancang untuk mendeteksi medan magnet dengan tingkat sensitivitas yang sangat tinggi. Prinsip kerja perangkat ini berkaitan erat dengan teknologi *qubit* superkonduktor yang telah dibahas pada Bab 2. SQUID memanfaatkan sifat khusus material superkonduktor untuk mendeteksi perubahan medan magnet dalam skala yang sangat kecil. Kemampuan tersebut menjadikan SQUID sebagai salah satu perangkat penting dalam pengukuran fenomena magnetik yang membutuhkan tingkat ketelitian tinggi.

Pada dasarnya, SQUID memiliki struktur berupa cincin superkonduktor yang memungkinkan arus listrik mengalir dengan hambatan yang sangat rendah. Ketika medan magnet di sekitar cincin mengalami perubahan terhadap waktu, perubahan tersebut dapat memengaruhi arus listrik yang bersirkulasi di dalam cincin. Respons listrik yang muncul berkaitan dengan perubahan medan magnet yang diterima oleh perangkat. Dengan memanfaatkan hubungan antara medan magnet dan arus listrik tersebut, perubahan medan magnet dapat diamati dan diukur secara lebih terperinci.

Prinsip inilah yang membuat SQUID dapat berfungsi sebagai sensor medan magnet yang sangat sensitif. Ketika medan magnet diberikan, dinyalakan, atau mengalami perubahan, respons berupa arus listrik akan terbentuk di dalam cincin superkonduktor. Respons tersebut kemudian dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur perubahan medan magnet yang terjadi. Bahkan, perubahan medan yang sangat kecil dapat dideteksi karena SQUID bekerja berdasarkan fenomena kuantum pada material superkonduktor. Pemanfaatan prinsip tersebut menunjukkan bahwa fenomena mekanika kuantum tidak hanya memiliki nilai teoritis, tetapi juga dapat diterapkan untuk menghasilkan teknologi pengukuran yang presisi.

Kondensat Bose–Einstein Sebagai Sensor

Kondensat Bose–Einstein juga merupakan objek makroskopis jika dibandingkan dengan sistem yang terdiri dari beberapa atom saja. Kondensat ini berupa awan yang terdiri dari puluhan ribu atom yang didinginkan hingga suhu mendekati nol mutlak dalam orde nanokelvin. Satu nanokelvin adalah sepermiliar Kelvin; skala Kelvin atau skala mutlak digunakan di sini untuk mengukur suhu. Nol Kelvin, atau nol mutlak, adalah suhu terendah yang mungkin bagi sistem fisik mana pun dan setara dengan $-273{,}15°C$. Pada suhu nol mutlak, atom-atom penyusun sistem akan "membeku" dalam keadaan dasar artinya, atom-atom tersebut memiliki energi minimum yang mungkin.

Seperti halnya superkonduktor, kondensat Bose-Einstein dicirikan oleh sifat-sifat kuantum materi: proses kondensasi yang menjadi asal-usul namanya berarti bahwa semua atom "menyinkronkan diri" dan dideskripsikan oleh sifat-sifat yang sama. Wujud materi ini diprediksi oleh Albert Einstein dan fisikawan India Satyendra Nath Bose pada awal tahun 1920-an, namun baru berhasil diwujudkan pada akhir abad lalu melalui eksperimen yang membuahkan Hadiah Nobel Fisika tahun 2001 bagi Eric Cornell, Wolfgang Ketterle, dan Carl Wieman. Pada umumnya, atom memiliki distribusi kecepatan yang berpusat pada nilai tertentu yang bergantung pada suhu, dengan variasi kecepatan yang besar antar-atom individu. Dengan menurunkan suhu, variasi ini menjadi semakin kecil hingga mengabaikan ketidakpastian eksperimental atom-atom tersebut memiliki kecepatan yang sama (dan selanjutnya "berkondensasi" ke dalam keadaan kuantum yang sama): inilah yang disebut sebagai kondensat Bose-Einstein.

Sejak eksperimen perintis awal tersebut, teknologi ini telah menyebar ke seluruh dunia, dan kini kondensat dapat diperoleh pada mikrocip portabel. Kondensat juga telah dibuat di luar angkasa untuk mempelajari efek gravitasi nol. Lebih jauh lagi, kini dimungkinkan untuk memanipulasi awan atom yang terkondensasi dan menciptakan geometri yang meniru struktur SQUID, yang dapat digunakan untuk membangun sensor ultra-sensitif. Kemungkinan lainnya adalah menyiapkan kondensat dalam superposisi dua keadaan berbeda dan mengukur osilasinya dari satu keadaan ke keadaan lainnya. Osilasi ini bergantung pada medan magnet eksternal, sehingga kita secara efektif telah menciptakan sensor yang mampu mengukur medan magnet.

Baik SQUID maupun kondensat Bose-Einstein dianggap sebagai sensor kuantum karena keduanya memanfaatkan sifat kuantum dari material penyusunnya (superkonduktivitas pada kasus pertama dan kondensasi pada kasus kedua), namun keduanya jelas merupakan kasus khusus. Faktanya, karena bersifat makroskopis, tidaklah mudah untuk menciptakan keterikatan (*entanglement*) di antara keduanya (meskipun terdapat upaya ke arah tersebut) dan kinerjanya tidak setara dengan sensor kuantum berbasis atom tunggal atau beberapa atom.

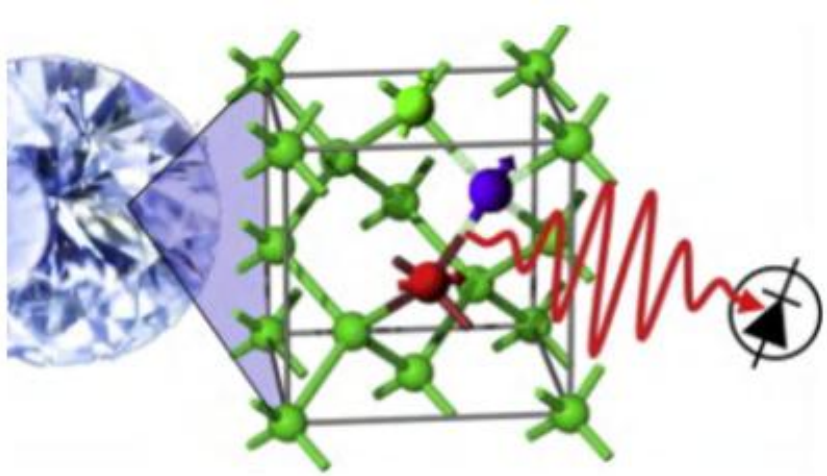
Pusat warna pada intan

Terakhir, kami ingin membahas kemungkinan implementasi lain dari sensor kuantum yang merupakan bidang pembelajaran mutakhir dengan implikasi revolusioner bagi berbagai aplikasi teknologi. Penemuan bahwa intan selain keindahannya yang memukau juga memiliki

kemampuan untuk berfungsi sebagai *platform* bagi sensor kuantum pada suhu ruang telah membuka prospek baru di berbagai bidang, mulai dari komputer kuantum hingga biomedis. Mari kita telusuri beberapa aplikasi dan potensi dari teknologi yang sedang berkembang ini.

Intan alami memiliki struktur kristal yang terdiri dari atom-atom karbon dengan sifat-sifat yang menarik. Intan tampak transparan, namun intan berwarna juga dapat ditemukan di alam; warna tersebut muncul karena, di dalam struktur atom karbon yang teratur, sebagian kecil atom karbon digantikan oleh atom jenis lain selama proses pembentukan intan. Secara praktis, terdapat cacat pada struktur kristal yang teratur tersebut, yang disebut sebagai pusat warna. Hal ini terjadi karena karbon bersifat transparan (tidak berinteraksi dengan cahaya tampak), sedangkan jenis atom lain mungkin tidak demikian dan dapat berinteraksi dengan cahaya tampak (menyerap dan memancarkannya kembali). Dengan demikian, pusat warna menyebabkan cahaya yang melewati intan menjadi berwarna.

Hal ini relevan bagi sensor kuantum karena struktur kristal intan dapat dipandang sebagai penyangga lembam (*inert*) yang sempurna bagi satu pusat warna tunggal, yang dapat dimanfaatkan sebagai sensor. Temuan sebenarnya menunjukkan bahwa, karena alasan yang berkaitan dengan stabilitas struktur kimia, pusat warna tersebut terbentuk dari pasangan yang terdiri atas satu atom selain karbon dan satu "kekosongan" (*vacancy*) yaitu tidak adanya atom karbon pada salah satu posisi terdekat dalam kisi kristal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar. 4.1 Pusat warna pada intan, yang terbentuk akibat adanya cacat (atom nitrogen, berwarna merah pada gambar) dan kekosongan di sebelahnya (berwarna biru pada gambar) dalam struktur kristal intan, yang hampir seluruhnya tersusun dari atom karbon. Pusat warna ini digunakan sebagai sensor. Gambar diambil dari

Yang paling banyak dipelajari di antaranya adalah pusat warna NV (*nitrogen-vacancy* atau nitrogen-kekosongan), di mana atom nitrogen dan kekosongan (ruang kosong) di sebelahnya membentuk atom buatan yang dapat dimanfaatkan sebagai sensor kuantum. Dua tingkat energi dari atom buatan ini dapat digunakan sebagai sensor dengan mengikuti skema berbasis osilasi Rabi yang telah dijelaskan sebelumnya.

Hal yang luar biasa adalah terbukti bahwa atom-atom buatan ini berperilaku sebagai objek kuantum bahkan pada suhu ruangan! Atom-atom ini mempertahankan koherensi kuantum, mirip dengan qubit dalam komputer kuantum. Kesimpulannya, cacat pemberi warna pada berlian dapat digunakan secara efektif sebagai sensor kuantum, dengan prospek aplikasi yang semakin menjanjikan karena kemampuannya beroperasi pada suhu ruangan.

Terakhir, perlu dicatat bahwa kita dapat membuat berlian buatan dan menanamkan cacat di dalamnya menggunakan berbagai pendekatan mulai dari teknik pertumbuhan khusus hingga metode di mana pengotor (*impurity*) terlebih dahulu ditangkap dan kemudian ditembakkan satu per satu ke dalam berlian dengan presisi berskala nanometer (yaitu, satu pengotor untuk setiap beberapa puluh atom). Oleh karena itu, kita dapat membayangkan pembuatan sejumlah cacat dalam keadaan terjerat (*entangled state*) secara global, dengan tujuan meningkatkan presisi sensor jenis ini di masa depan. Beberapa pihak bahkan mengusulkan teknologi ini sebagai potensi arsitektur untuk komputer kuantum. Selain itu, karena berlian merupakan material yang sangat inert (tidak reaktif secara kimia), material ini dapat digunakan di dekat jaringan biologis, sehingga membuka peluang masa depan di bidang biomedis juga, sebagaimana akan kita lihat pada bagian berikutnya.

4.8 APLIKASI SENSOR KUANTUM

Mari kita tinjau beberapa potensi aplikasi sensor kuantum yang menarik. Pertama dan terutama, sensor kuantum muncul sebagai teknologi revolusioner yang menjanjikan transformasi dalam dunia kedokteran. Perangkat ini menawarkan presisi dan sensitivitas yang belum pernah ada sebelumnya dalam mendeteksi sinyal biologis dan molekuler. Saat diterapkan dalam kedokteran, sensor semacam itu membuka jalan bagi terobosan baru dalam diagnosis, terapi, dan pemantauan, serta mengantisipasi masa depan di mana layanan kesehatan bersifat personal dan sangat efektif.

Mari kita mulai dengan sensor yang berbasis pada cacat berlian. Biokompatibilitas berlian menjadikannya ideal untuk aplikasi biomedis: berlian dapat digunakan untuk pemantauan variabel biologis secara *real-time* dan berpresisi tinggi, dalam diagnostik, bahkan dalam pengobatan penyakit melalui teknik non-invasif tanpa merusak jaringan di sekitarnya. Sensor kuantum dapat diintegrasikan ke dalam perangkat pemantauan yang dipersonalisasi untuk menyediakan data kesehatan pasien secara *real-time*. Perangkat semacam itu memungkinkan pengelolaan kondisi kronis melalui pemantauan terus-menerus terhadap tanda-tanda vital dan biomarker spesifik. Pendekatan yang dipersonalisasi ini memberikan gambaran rinci mengenai kondisi pasien kepada dokter, sehingga memungkinkan intervensi yang tepat waktu dan disesuaikan dengan kebutuhan pasien.

Salah satu kemungkinan penerapannya adalah penggunaan sensor cacat berlian sebagai nanotermometer atau pengukur tekanan presisi. Perubahan suhu atau tekanan pada berlian menyebabkan sedikit deformasi pada struktur kristalnya, yang pada akhirnya mengubah sedikit perbedaan energi antara dua tingkat energi yang menjadi acuan sensor tersebut. Oleh karena itu, kita dapat kembali memanfaatkan osilasi Rabi untuk melakukan pengukuran; frekuensi osilasi ini bergantung pada perbedaan energi antara kedua tingkat

tersebut dan, pada akhirnya, bergantung pada suhu (atau tekanan) besaran yang ingin kita ukur.

Tingkat presisi yang dapat dicapai serta fakta bahwa sensor ini dapat dibuat dalam skala nano dengan sensitivitas hingga seperseribu derajat Celsius telah mendorong perkembangan teknologi yang pesat menuju tujuan-tujuan yang sangat ambisius seperti mengukur panas yang dihasilkan oleh reaksi kimia antara satu atau beberapa molekul, bahkan di dalam sel hidup. Pada tahun 2020, teknik ini digunakan di laboratorium untuk mengukur suhu internal beberapa cacing hidup. Mungkin timbul pertanyaan mengapa pengukuran suhu cacing bahkan hingga menentukan apakah cacing tersebut mengalami "demam" dianggap menarik. Salah satu alasannya adalah bahwa suhu di dalam organisme hidup merupakan ukuran aktivitas biologis yang berlangsung di dalam organisme itu sendiri. Pemantauan perubahan pada skala mikrometer dapat memberikan informasi rinci mengenai aktivitas seluler dan molekuler. Hal ini bisa menjadi hal penting bagi aplikasi klinis seperti pencitraan struktur jaringan dan visualisasi heterogenitas tumor. Mengingat sulitnya mengecilkan ukuran termometer biokompatibel hingga skala ini, sensor cacat berlian membuka prospek yang menarik dalam hal tersebut.

Sensor yang berbasis pada cacat kisi dalam berlian seperti pusat NV yang banyak diteliti dalam beberapa tahun terakhir dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan medan magnet pada tingkat molekuler, sehingga memungkinkan pemetaan struktur internal sel hidup tanpa menggunakan radiasi berbahaya. Selain itu, sensitivitas sensor kuantum memungkinkan deteksi biomarker spesifik bahkan pada konsentrasi rendah, yang memfasilitasi identifikasi penyakit seperti kanker pada tahap awal. Hal ini dapat merevolusi praktik skrining dan secara signifikan meningkatkan tingkat kesembuhan melalui intervensi yang tepat waktu.

Masih dalam lingkup potensi aplikasi biomedis, Inggris telah berinvestasi besar-besaran dalam pemanfaatan sensor cacat berlian untuk diagnostik otak. Sensor yang ada saat ini untuk diagnostik otak berukuran sangat besar dan berat, sehingga tidak memungkinkan pemantauan dilakukan saat pasien menjalani aktivitas sehari-hari secara normal. *Quantum Technology Hub Sensing and Timing* menyatukan berbagai universitas di Inggris dan merupakan salah satu pusat pembelajaran paling aktif dalam pengembangan teknologi kuantum baru ini. Baru-baru ini, pusat tersebut memperkenalkan sistem baru berbasis sensor kuantum untuk melakukan *Magnetoencephalography* (MEG) sebuah teknik yang memungkinkan pemantauan aktivitas otak dengan mengukur medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik intrakranial. Teknik ini telah berhasil digunakan, misalnya, untuk mengidentifikasi fokus epilepsi (yaitu area otak tempat kejang bermula). Namun, mesin MEG konvensional sangat kompleks karena menggunakan sejumlah besar sensor SQUID (mencapai ratusan) yang harus didinginkan hingga suhu 4 Kelvin (sekitar $-270°C$) menggunakan helium cair.

Sebaliknya, sistem yang diperkenalkan oleh *Quantum Technology Hub* beroperasi pada suhu ruangan dan dapat dipasang pada helm khusus yang memungkinkan pasien bergerak hampir secara normal. Ke depannya, analisis yang memantau pasien sepanjang hari akan dapat dilakukan: MEG sedang dalam proses menjadi alat diagnostik yang bermanfaat dengan

tingkat aksesibilitas setara elektrokardiogram (EKG), di mana pasien dipantau setidaknya selama 24 jam berturut-turut menggunakan monitor Holter (perangkat portabel untuk memantau aktivitas listrik jantung secara terus-menerus dalam jangka waktu lama) guna mengidentifikasi kondisi jantung tertentu. Selain untuk diagnosis dan pemantauan, sensor kuantum dapat memainkan peran penting dalam terapi terpandu. Kemampuannya mendeteksi sinyal molekuler spesifik dapat dimanfaatkan untuk menghantarkan obat secara terarah, sehingga mengurangi efek samping dan meningkatkan efektivitas pengobatan.

Bidang sensor kuantum berbasis cacat berlian saat ini masih dalam tahap pengembangan, dengan pembelajaran yang berfokus pada peningkatan sensitivitas, pengecilan ukuran (miniaturisasi), serta integrasi dengan sistem dan perangkat lain. Tantangan yang dihadapi antara lain meningkatkan koherensi kuantum sensor dan mengintegrasikannya dengan perangkat elektronik konvensional untuk menciptakan perangkat yang praktis. Beragamnya potensi aplikasi menjadikan sensor kuantum berbasis cacat berlian sebagai salah satu bidang paling menjanjikan dalam fisika dan rekayasa kuantum.

Terakhir, kami ingin membahas kemungkinan penggunaan sensor kuantum untuk mengukur gaya fundamental: gravitasi. Pengukuran gravitasi secara presisi memiliki banyak aplikasi di bidang teknologi, praktis, dan fundamental. Sebagai contoh, hal ini penting untuk sinkronisasi yang akurat pada sinyal GPS (*Global Positioning System*) guna penentuan posisi navigasi satelit. GPS beroperasi berdasarkan jaringan global satelit buatan yang mengorbit pada ketinggian sekitar 20.000 kilometer dari permukaan Bumi dan memancarkan sinyal radio ke Bumi.

Teori relativitas umum Einstein memprediksi bahwa waktu berjalan dengan kecepatan yang berbeda bergantung pada intensitas medan gravitasi yang memengaruhi suatu jam. Semakin dekat sebuah jam dengan massa yang besar, seperti Bumi, semakin kuat medan gravitasi yang dialaminya, dan semakin lambat waktu berjalan dibandingkan dengan jam di wilayah dengan gravitasi yang lebih lemah. Fenomena ini dikenal sebagai dilatasi waktu gravitasi. Jam di permukaan Bumi lebih dipengaruhi oleh gravitasi Bumi dibandingkan jam pada satelit yang mengorbit. Akibatnya, jam di Bumi "benar-benar berjalan lebih lambat" dibandingkan jam di satelit. Tanpa koreksi, jam satelit GPS akan cenderung mengalami penyimpangan sebesar beberapa mikrodetik per hari dibandingkan dengan jam di Bumi sebuah kesalahan yang berujung pada ketidakakuratan penentuan posisi hingga hitungan kilometer. Untuk menghitung posisi kita di Bumi secara akurat, jam kita dan jam pada satelit harus disinkronkan secara presisi. Karena sinyal cahaya merambat dengan kecepatan 300.000 kilometer per detik, kesalahan sinkronisasi sebesar satu milidetik akan menyebabkan kesalahan sebesar 300 kilometer dalam menghitung jarak kita dari satelit. Untuk mencapai tingkat presisi dalam kisaran beberapa meter, sistem GPS memperhitungkan efek relativistik, sehingga memastikan bahwa pengukuran waktu dan dengan demikian penentuan posisi menjadi sangat akurat.

Salah satu aplikasi sensor kuantum yang sedang berkembang berkaitan dengan navigasi dan geolokasi. Sensor kuantum telah dikembangkan untuk meningkatkan presisi sistem navigasi. Berbeda dengan sistem GPS konvensional, yang bisa jadi kurang akurat atau

tidak tersedia di area tertentu (seperti di bawah air atau di lingkungan perkotaan yang padat), sensor kuantum berbasis interferometri mampu memberikan penentuan lokasi yang sangat presisi bahkan dalam kondisi tersebut. Teknologi ini menjanjikan kemajuan signifikan bagi navigasi bawah air dan kendaraan otonom.

Pengukuran gaya gravitasi juga bermanfaat untuk penemuan dan pemantauan cadangan minyak serta akuifer. Gaya gravitasi antara dua benda bergantung pada massanya; oleh karena itu, jika massa benda pertama diketahui, massa benda kedua dapat ditentukan dengan mengukur gaya gravitasi yang bekerja padanya. Dengan mengukur variasi gaya gravitasi secara presisi, kita dapat mengetahui apakah terdapat rongga atau cairan di bawah kita, alih-alih batuan padat. Jelaslah bahwa untuk melakukan hal ini, pengukuran harus cukup akurat guna mendeteksi perbedaan gaya gravitasi Bumi dengan atau tanpa adanya unsur variabel tersebut (baik berupa terowongan, cadangan minyak, maupun magma bawah tanah dari gunung berapi aktif). Baru-baru ini, sebuah sensor kuantum berhasil mendeteksi terowongan bawah tanah yang terletak satu meter di bawah permukaan Bumi dalam kondisi eksternal normal (yaitu, bukan di lingkungan laboratorium yang terkendali).

Untuk membuat sensor gravitasi kuantum, prinsip superposisi selalu dimanfaatkan dengan cara membangun sebuah interferometer. Secara sangat sederhana, atom (misalnya, kondensat Bose-Einstein yang telah kita bahas sebelumnya) dapat disiapkan untuk menempuh dua jalur yang berbeda. Dengan menggunakan medan listrik, misalnya, berkas atom dapat dipecah layaknya sungai yang bercabang menjadi dua. Setelah beberapa waktu, melalui proses kebalikannya, kedua bagian berkas atom tersebut digabungkan kembali. Berbeda dengan air sungai yang terpecah di mana setiap molekul air hanya menempuh satu jalur eksperimen ini dapat dirancang sedemikian rupa sehingga pada berkas yang digabungkan kembali, setiap atom berada dalam keadaan superposisi kuantum koheren dari dua kondisi: kondisi telah melewati jalur pertama dan kondisi telah melewati jalur kedua. Sekali lagi, dalam dunia kuantum, alih-alih memiliki probabilitas 50% untuk melewati jalur A atau jalur B, kita dapat menciptakan keadaan superposisi koheren dari jalur A dan jalur B sama halnya seperti lukisan Mona Lisa yang dapat dipandang sebagai superposisi dari ekspresi bahagia dan sedih sosok Mona Lisa. Poin mendasarnya di sini adalah bahwa kedua kemungkinan tersebut berkaitan dengan dua lintasan yang berbeda: jika kedua jalur berada pada ketinggian yang berbeda, atom-atom tersebut akan mengalami gaya gravitasi yang sedikit berbeda. Perbedaan ini berarti bahwa ketika kedua lintasan tersebut bertemu kembali, keadaan atom bergantung pada perbedaan medan gravitasi di antara kedua lintasan sebuah informasi yang dapat dikuantifikasi melalui pengukuran yang tepat. Dengan demikian, kita memiliki interferometer yaitu instrumen yang mengukur interferensi saat keadaan atom yang terkait dengan dua lintasan berbeda digabungkan. Hasil akhirnya adalah, dengan memanfaatkan interferensi, dimungkinkan untuk membuat sensor gravitasi yang memiliki kinerja luar biasa.

Sensor jenis ini sudah digunakan dan bahkan tersedia secara komersial. Sebagai contoh, gravimeter kuantum (yaitu instrumen untuk mengukur gaya gravitasi) dari perusahaan Prancis, Muquans, ditempatkan di Gunung Etna selama satu tahun untuk memantau aktivitas vulkaniknya. Mengukur variasi gravitasi di sekitar gunung berapi merupakan hal penting

karena memberikan petunjuk mengenai perubahan kepadatan material di bawah permukaan, seperti batuan, gas, dan magma. Peningkatan gravitasi, misalnya, dapat mengindikasikan masuknya material yang lebih padat seperti magma. Tujuannya adalah untuk lebih memahami apa yang terjadi di dalam gunung berapi, dengan sasaran jangka panjang yang ambisius untuk mengumpulkan data yang memadai guna memprediksi letusan.

Pengembangan dan penerapan praktis sensor gravitasi kuantum menghadirkan tantangan yang signifikan, termasuk kesulitan teknis dalam mempertahankan atom pada keadaan superposisi untuk durasi yang cukup lama serta kebutuhan akan peralatan yang canggih dan sensitif untuk melakukan pengukuran tersebut. Namun, kemajuan berkelanjutan dalam teknologi kuantum dan teknik pendinginan atom terus meningkatkan presisi serta keandalan instrumen pengukuran yang luar biasa ini.

BAB 5
PERKEMBANGAN, TANTANGAN, DAN PROSPEK TEKNOLOGI KUANTUM

5.1 PERKEMBANGAN SAINS DAN TEKNOLOGI KUANTUM

Menjadi bagian dari komunitas yang bergerak di bidang sains dan teknologi kuantum dalam beberapa tahun terakhir merupakan pengalaman yang menggairahkan dan penuh inspirasi. Suatu pagi di bulan Oktober 2022 menjadi titik balik yang menentukan; peristiwa itu kemungkinan besar mengubah secara radikal cara pandang terhadap komunitas ilmuwan ini dan cara komunitas ini memandang dirinya sendiri sejak kelahirannya sekitar 40 tahun silam. Mereka yang terlibat menyaksikan perkembangan pesat dan prospek yang menjanjikan. Namun, di balik antusiasme tersebut, pembelajaran sains kuantum sering kali hanya terbatas pada sudut yang relatif terisolasi dan dipandang sebelah mata dalam lanskap ilmiah. Minat ilmiah yang dominan di berbagai departemen fisika di seluruh dunia lebih tertuju pada bidang pembelajaran lain, seperti fisika nuklir dan subnuklir, astronomi, fisika energi tinggi, dan fisika materi terkondensasi.

Di sisi lain, sains dan teknologi kuantum telah lama beranjak dari sudut pembelajaran yang kurang mendapat sorotan, yang dikenal sebagai ranah "landasan mekanika kuantum". Di ranah ini, sejumlah rekan sejawat yang brilian berupaya menata aspek-aspek mendasar teori kuantum: Apa sebenarnya prinsip realitas itu? Apa makna mendalam di balik fenomena keterikatan (*entanglement*)? Mengapa waktu tidak terkuantisasi seperti halnya ruang? Ini adalah beberapa pertanyaan menarik dan memikat yang hingga kini belum memiliki jawaban pasti dalam sains. Teori-teori alternatif selain mekanika kuantum yang kita kenal saat ini pun telah dirumuskan. Wajar jika banyak peneliti muda tertarik pada persoalan-persoalan ini, meskipun mereka sering kali dipatahkan semangatnya oleh akademisi senior. Para senior ini berpendapat bahwa mencurahkan masa-masa terbaik dalam hidup untuk pembelajaran semacam itu bisa jadi kontraproduktif bagi karier ilmiah seseorang dan justru menjadi sumber frustrasi yang besar.

Di sini muncul sebuah dilema umum yang lebih luas, yang melampaui ranah teknologi kuantum ataupun fisika pada umumnya: Apakah lebih baik bagi seorang anak muda untuk mengikuti arus tren yang paling populer dan diterima banyak orang, atau menempuh jalan yang meskipun lebih menyendiri mampu memicu rasa ingin tahu dan hasrat mereka? Banyak orang mungkin pernah mengajukan pertanyaan ini pada diri mereka sendiri. Salah satu penulis buku ini mengenang sebuah percakapan di Princeton pada awal tahun 1970-an kala ia masih menjadi peneliti muda dengan Freeman Dyson, salah satu ilmuwan terhebat abad lalu yang juga dikenal lewat karya-karya sains populernya. Dyson menyarankan untuk menghindari bidang pembelajaran yang paling ramai diminati, dan justru menganjurkan eksplorasi di sektor-sektor baru yang sedang berkembang; di sanalah peluang untuk menghasilkan penemuan orisinal lebih besar, meskipun ada risiko tersesat dalam prosesnya.

Kembali ke ranah sains dan teknologi kuantum, pada suatu pagi di bulan Oktober 2022, perspektif mengenai bidang ini berubah. Ketika konferensi pers yang disiarkan langsung oleh Royal Swedish *Academy of Sciences* mengumumkan penganugerahan Hadiah Nobel Fisika kepada Alain Aspect, John Clauser, dan Anton Zeilinger atas "eksperimen dengan foton terjerat (*entangled photons*) yang membuktikan pelanggaran ketimpangan Bell dan membuka jalan bagi sains informasi kuantum" sains dan teknologi kuantum sepenuhnya memasuki jajaran sains arus utama. Pengakuan ini, ditambah dengan kemajuan teoretis, eksperimental, dan teknologi yang luar biasa sebagaimana telah kita bahas dalam buku ini, telah mengubah sudut pandang komunitas ilmiah yang menggeluti topik-topik tersebut, serta komunitas-komunitas lainnya. Faktanya, pengembangan teknologi kuantum tidak hanya membutuhkan fisikawan yang mampu menguraikan fenomena kuantum mendasar, tetapi juga insinyur, ahli biologi, ilmuwan komputer, pendidik, pemimpin bisnis, pembuat kebijakan, dan regulator yang mampu menerapkan serta mengembangkan perangkat yang diperlukan untuk menumbuhkan ekosistem ini di dunia akademis, industri, dan pada akhirnya dalam kehidupan kita sehari-hari.

5.2 KECERDASAN BUATAN DAN KOMPUTASI KUANTUM

Perkembangan Kecerdasan Buatan

Kecerdasan buatan, yang lebih dikenal sebagai AI (*Artificial Intelligence*), mengacu pada kemampuan sistem komputer untuk melakukan tugas-tugas yang biasanya memerlukan kecerdasan manusia. Tahun 2022 menjadi titik balik tidak hanya bagi teknologi kuantum tetapi juga bagi AI, yang potensi luar biasanya mulai terlihat jelas oleh dunia. Perangkat seperti ChatGPT yang mengubah instruksi verbal sederhana menjadi gambar, teks, atau video menjadi dapat diakses oleh masyarakat umum, sehingga memicu revolusi digital yang sesungguhnya. Orang-orang yang sebelumnya tidak pernah membayangkan kemungkinan semacam itu dihadapkan pada berbagai kreasi mengejutkan yang memancing rasa takjub dan, terkadang, kekaguman yang luar biasa.

Namun, sejarah kecerdasan buatan sebenarnya bermula jauh sebelumnya. Kita kembali ke tahun 1940-an, sebuah era penuh antusiasme ilmiah, ketika para pelopor komputasi mulai melakukan eksperimen dengan komputer yang berupaya menyimulasikan sistem yang mampu mengatur diri sendiri (*self-organizing systems*) untuk melakukan tugas-tugas sederhana. Saat itulah gagasan mengenai mesin yang dapat "berpikir" mulai terbentuk.

Kami tidak bermaksud menguraikan sejarah perkembangan AI di sini, melainkan hanya ingin mengangkat contoh ikonik komputer Deep Blue, yang pada tahun 1996 berhasil mengalahkan juara catur dunia saat itu, Garry Kasparov. Peristiwa ini memicu kehebohan besar pada masanya, bahkan muncul wacana mengenai "skakmat" bagi kecerdasan manusia. Kala itu, perkembangan AI dipandang dengan beragam perasaan, mulai dari optimisme hingga bayangan distopia. Visi distopia tersebut digambarkan dengan sangat apik melalui sosok komputer HAL 9000 sebuah "Polyphemus" buatan yang dalam film *2001: A Space Odyssey* mengalahkan manusia dalam permainan catur dan kemudian membunuh astronaut Frank Poole. Bagaimanapun juga, kekalahan Kasparov membuktikan potensi AI dalam menangani masalah-masalah yang kompleks. Sejak awal kemunculannya, AI telah mencatat kemajuan

pesat, berkembang menjadi sistem yang semakin canggih dan mampu menghasilkan tidak hanya teks dan gambar, tetapi juga konten kreatif, atau bahkan mengelola surel kita dengan kecepatan dan efisiensi yang luar biasa. Semua ini dimungkinkan berkat kemajuan luar biasa dalam daya komputasi superkomputer, yang memungkinkan optimalisasi jaringan saraf (*neural networks*). Sistem ini terinspirasi oleh cara kerja otak manusia, di mana jutaan neuron berkomunikasi melalui sinapsis dengan saling bertukar sinyal listrik.

Di dunia digital, jaringan saraf belajar dan beradaptasi dengan cara serupa, yakni melalui optimalisasi jutaan parameter yang menentukan bagaimana jaringan merespons masukan tertentu atau dengan kata lain, bagaimana jaringan saraf menjawab pertanyaan yang diajukan kepadanya. Setelah parameter-parameter tersebut dioptimalkan (melalui tahap pembelajaran), jaringan saraf dapat menjalankan berbagai tugas; semakin optimal parameternya, semakin tangguh dan serbaguna pula sistem tersebut. Kini, dengan jaringan yang semakin canggih, kita dapat mengandalkan sistem AI yang tidak hanya meniru sebagian kemampuan kita, tetapi dalam beberapa kasus bahkan melampauinya, dengan kemampuan menghasilkan teks atau gambar berkualitas tinggi hanya dalam hitungan detik.

Signifikansi kecerdasan buatan telah diakui oleh Akademi Ilmu Pengetahuan Kerajaan Swedia dengan Hadiah Nobel Fisika 2024 yang diberikan kepada John Hopfield dan Geoffrey Hinton “atas penemuan dan inovasi fundamental yang memungkinkan pembelajaran mesin dengan jaringan saraf tiruan,” Hadiah Nobel Kimia kepada David Baker “atas desain komputasi protein,” dan kepada Demis Hassabis dan John Jumper karena mengembangkan model AI “untuk prediksi struktur protein.”

Meskipun algoritma dan metode dasar jaringan saraf telah dikenal selama beberapa dekade, penerapan praktisnya telah direvolusi oleh kemajuan luar biasa dalam daya komputasi. Tiga puluh atau empat puluh tahun yang lalu, komputer terlalu lambat untuk menangani jaringan saraf dengan ukuran yang signifikan. Tetapi hari ini, dengan ledakan daya komputasi dan beberapa peningkatan teknis yang penting, dunia kemungkinan telah terbuka yang dulunya hanya bisa kita bayangkan. Pentingnya daya komputasi ini sangat besar sehingga sekarang menjadi faktor kritis dan berpotensi membatasi pengembangan lebih lanjut kecerdasan buatan. Melatih jaringan saraf membutuhkan pembelajaran dari sejumlah besar data, dan untuk melakukan ini, ia harus menjalankan algoritma yang membutuhkan waktu dan energi yang sangat besar sehingga menjadi faktor pembatas kecuali ditemukan alternatif yang lebih efisien: Perkiraan terbaru menunjukkan bahwa konsumsi energi global yang terkait dengan AI sudah setara dengan konsumsi energi negara seperti Irlandia, dan biaya untuk melatih jaringan saraf dan membawanya ke potensi penuh dapat mencapai ratusan juta dolar.

Dalam skenario ini, di mana permintaan akan kecerdasan buatan yang semakin canggih sesuai dengan meningkatnya permintaan akan daya komputasi, wajar untuk bertanya apakah paradigma komputasi kuantum baru yang telah kita pelajari dapat menjadi solusi yang memungkinkan. Pada tahun 2014, Seth Lloyd dari Massachusetts *Institute of Technology* dan para kolaboratornya memberikan jawaban awal atas pertanyaan ini, dengan menunjukkan bahwa pembelajaran mesin terawasi bentuk dasar AI yang mengklasifikasikan data dalam suatu dataset dapat dilakukan secara efisien oleh komputer kuantum. Hasil ini tidak hanya

menandai titik balik potensial dalam mengurangi biaya dan konsumsi energi AI (karena klasifikasi data yang lebih efisien akan mengurangi waktu komputasi dan dengan demikian pada akhirnya pengeluaran energi) tetapi juga dapat mewakili awal era baru dalam komputasi, di mana komputer kuantum akan memungkinkan kita untuk mengatasi batasan jaringan saraf saat ini dan membuka jalan bagi aplikasi teknologi yang lebih luar biasa.

Prinsip Pembelajaran Mesin

Pada masa ketika Seth Lloyd sedang meletakkan dasar bagi karya inovatifnya di *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), dunia kecerdasan buatan (AI) tampaknya hampir tidak bersinggungan dengan dunia teknologi kuantum. Sebagian besar ilmuwan cenderung mengkhususkan diri hanya pada salah satu dari kedua bidang tersebut dan jarang berinteraksi dengan bidang lainnya. Tepat pada masa itulah, salah satu penulis buku ini mengunjungi MIT sebagai tamu Seth Lloyd dan hampir setiap hari mendengar beliau berdiskusi dengan penuh semangat bersama rekan-rekannya mengenai gagasan-gagasan baru terkait kecerdasan buatan meskipun saat itu penulis belum sepenuhnya memahami implikasinya, sebagaimana sering terjadi ketika seseorang tidak memiliki pengetahuan dasar mengenai suatu bidang pembelajaran. Oleh karena itu, berikut ini kami bermaksud memperjelas apa yang kita maksud saat ini ketika berbicara tentang "kecerdasan buatan" sebuah istilah yang sering kali diselimuti aura misteri dan nuansa magis yang perlu disingkirkan agar setiap orang dapat memahami pentingnya serta potensi nyata dari AI.

Bayangkan hidup di dunia tanpa kemampuan untuk membedakan objek-objek di sekitar kita: tidak tahu apakah yang kita lihat berwarna merah atau hijau, sebuah apel atau buah pir, bunga mawar atau bunga peony. Kemampuan ini, yang sering kali kita anggap sebagai hal yang lumrah, merupakan dasar penting untuk menavigasi dan berinteraksi secara efektif dengan lingkungan kita. Namun, bagaimana kita bisa mengajari mesin untuk "melihat" dan mengenali detail-detail tersebut sebagaimana yang kita lakukan? Di sinilah peran *supervised learning* (pembelajaran terawasi), salah satu teknik paling awal dan paling penting dalam bidang kecerdasan buatan. Tujuannya adalah menciptakan perangkat lunak atau algoritma yang mampu belajar mengklasifikasikan dan membedakan dua kategori objek yang berbeda. Sebagai contoh, hal ini bisa berupa mengenali apakah sebuah gambar menampilkan anjing atau kucing, atau membedakan dua angka yang berbeda (seperti nol dan satu) maupun huruf (seperti "a" dan "z"). Kemampuan ini bukan sekadar latihan akademis semata; ini adalah fondasi yang menjadi dasar bagi keterampilan yang lebih kompleks, seperti menulis dan membaca.

Pembelajaran terawasi (*supervised learning*) memungkinkan kita untuk mentransfer sebagian kemampuan interpretasi dan pengambilan keputusan kita kepada mesin. Kemungkinan penerapannya tidak terbatas. Mulai dari mobil otonom yang beroperasi tanpa campur tangan manusia sehingga mengurangi kecelakaan lalu lintas akibat kesalahan manusia hingga sistem diagnostik yang mampu mendeteksi penyakit sejak dini dan menyelamatkan jutaan nyawa, penerapan pembelajaran terawasi mulai membentuk masa depan di mana mesin tidak sekadar menjalankan tugas, tetapi juga "berkolaborasi" dengan kita untuk menciptakan dunia yang lebih aman dan efisien. Oleh karena itu, pembelajaran terawasi bukan

hanya bidang studi yang menarik, melainkan juga kunci penting yang dapat membuka potensi revolusioner dalam teknologi, membantu kita menciptakan sistem cerdas yang meningkatkan kualitas hidup sehari-hari.

Namun, bagaimana sebenarnya cara kerjanya? Proses ini bermula ketika pengembang AI "memberikan" data berlabel dalam jumlah sangat besar ke dalam algoritma mereka. Setiap data berperan layaknya seorang guru di dalam kelas: selama tahap pembelajaran, algoritma diperlihatkan jawaban yang benar untuk situasi tersebut. Melalui proses ini, mesin "belajar" mengenali pola dan membuat pembedaan yang semakin akurat, langkah demi langkah. Sama halnya seperti seorang anak belajar mengenali warna dengan mengamati objek berwarna secara berulang, mesin belajar dengan mengidentifikasi pola dalam data yang diterimanya. Dengan diperlihatkan ribuan gambar jalan raya, mesin belajar membedakan secara mandiri sebagai contoh antara lampu lalu lintas berwarna hijau dan merah. Demikian pula, dengan memberikan banyak contoh citra sinar-X kepada algoritma, mesin dapat belajar mengenali tanda-tanda penyakit, terkadang dengan tingkat akurasi yang melampaui kemampuan ahli manusia.

Untuk memahami lebih dalam bagaimana kita mengajari mesin cara membaca, bayangkan kita kembali ke masa sekolah, saat kita belajar membaca dan menulis. Ingatkah saat kita mencoba membedakan huruf-huruf tulisan tangan, yang masing-masing memiliki ciri khas tersendiri? Justru dari pengalaman dasar inilah dunia *machine learning* (pembelajaran mesin) mengambil inspirasi sebuah teknologi yang kini memungkinkan kita mengajari mesin untuk "membaca". Pertimbangkan tugas yang tampak sederhana: membedakan dua angka, nol dan satu, yang ditulis secara sambung oleh banyak orang katakanlah 10.000 orang dengan gaya tulisan tangan yang berbeda-beda. Tantangan ini, meskipun mendasar, mencakup berbagai variasi yang bisa muncul dalam tulisan tangan manusia. Bagaimana kita bisa mengajari komputer untuk melakukan hal ini? Prosesnya dimulai dengan membagi sekumpulan gambar menjadi dua kelompok. Kelompok pertama, yang terdiri dari ribuan contoh, digunakan untuk "melatih" perangkat lunak tersebut. Tahap ini disebut "pelatihan" dan cara kerjanya mirip dengan pelajaran di sekolah: kita menyajikan serangkaian gambar kepada "siswa digital" kita, lalu memintanya mengidentifikasi apakah gambar tersebut menunjukkan angka nol atau satu. Jika perangkat lunak menjawab dengan benar, kita lanjut ke tahap berikutnya. Jika ia melakukan kesalahan, algoritma akan memperbaiki parameter internalnya sama seperti guru yang mengoreksi tugas sehingga memastikan mesin "belajar" dari kesalahannya.

Kelompok gambar kedua digunakan untuk "pengujian", yaitu untuk mengevaluasi seberapa baik perangkat lunak tersebut telah belajar. Jika perangkat lunak kita mampu mengidentifikasi contoh-contoh baru ini dengan benar, kita bisa dengan yakin mengatakan bahwa ia "bisa membaca" angka nol dan satu dalam berbagai gaya tulisan tangan persis seperti seorang anak yang, setelah belajar di sekolah, mampu membaca apa pun yang disodorkan kepadanya, kecuali tulisan yang sangat sulit dibaca (seperti resep dokter yang ditulis dengan terburu-buru!). Asumsi yang mendasari hal ini adalah bahwa setelah melatih mesin dengan ribuan gambar, jika ia mampu memberikan jawaban yang benar untuk gambar-gambar uji tersebut, ia juga akan melakukan hal yang sama untuk semua gambar berikutnya yang kita

berikan. Metode pembelajaran ini, yang secara bertahap menyempurnakan kemampuan respons melalui koreksi kesalahan, terbukti sangat efektif. Prinsip inilah yang memungkinkan teknologi canggih seperti ChatGPT untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan yang kompleks.

Hal ini berhasil karena, dengan tersedianya jumlah parameter yang memadai untuk disesuaikan, sistem mampu beradaptasi untuk mengenali pola-pola yang sangat kompleks atau, dalam istilah teknis, fungsi-fungsi yang sangat non-linear. Inilah inti dari pembelajaran mesin: sebuah proses pembelajaran berkelanjutan yang, selangkah demi selangkah, mengubah mesin menjadi penerjemah data digital yang andal, serta membuka peluang luas yang jauh melampaui sekadar mengenali angka di layar.

Potensi Komputasi Kuantum untuk AI

Apa yang telah dikaji oleh Seth Lloyd dan rekan-rekannya, serta banyak peneliti lain, adalah bagaimana menerjemahkan proses yang dijelaskan di atas ke dalam bahasa yang dapat diterapkan pada komputer kuantum, sehingga membuka jalan menuju dunia dengan berbagai kemungkinan yang belum tereksplorasi: Proses pembelajaran mesin (*machine learning*), yang secara tradisional mengandalkan jaringan saraf (*neural networks*) dan algoritma kompleks, dapat dirumuskan ulang dan dioptimalkan melalui penggunaan jenis komputer ini. Pembelajaran mesin kuantum tetap menjadi bidang yang penuh tantangan, terutama karena keterbatasan perangkat keras kuantum saat ini. Aplikasi dunia nyata saat ini sering kali hanya mengandalkan sejumlah kecil qubit dan belum mampu melampaui kemampuan komputer tradisional.

Faktanya, banyak dari aplikasi ini telah dieksplorasi dengan cara menyimulasikan komputer kuantum pada mesin klasik. Namun, prospek masa depannya menjanjikan: Sudah ada gagasan yang jelas mengenai bagaimana pembelajaran mesin kuantum dapat merevolusi sektor ini. Meskipun kemungkinan besar aplikasi praktis yang paling signifikan baru akan muncul dalam jangka menengah atau panjang, bidang ini terus memancing minat yang sangat besar. Untuk saat ini, kita harus bersabar, namun kemungkinan untuk melampaui kecerdasan buatan konvensional adalah hal yang nyata dan menarik. Menarik untuk dicatat bagaimana pengembangan algoritma kuantum telah "menginspirasi" pendekatan inovatif dalam memecahkan masalah kecerdasan buatan (AI) menggunakan komputer klasik.

Selama bertahun-tahun, jaringan saraf telah menjadi tulang punggung pembelajaran mesin, namun komputasi kuantum telah mendorong terciptanya jaringan tensor (*tensor networks*) struktur matematis yang dirancang untuk menyimulasikan sirkuit kuantum pada komputer tradisional. Yang mengejutkan, dalam beberapa kasus, jaringan tensor ini terbukti lebih efisien dibandingkan jaringan saraf dengan penggunaan sumber daya yang sama; hal ini membuka kemungkinan baru bagi komputasi klasik sekaligus memberikan gambaran tentang potensi yang terinspirasi oleh dunia kuantum.

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, salah satu masalah krusial dalam pengembangan AI adalah konsumsi energinya yang sangat besar, yang berdampak signifikan terhadap lingkungan. Namun, komputer kuantum memiliki potensi untuk merevolusi aspek ini: untuk komputasi yang sama, komputer ini cenderung mengonsumsi jauh lebih sedikit energi dibandingkan komputer klasik konvensional. Meskipun dalam jangka pendek kecil

kemungkinannya komputer kuantum akan mengubah secara radikal fungsionalitas asisten suara atau generator konten (teks atau gambar) yang sering kita gunakan sehari-hari, dampak jangka panjangnya bisa sangat signifikan. Di masa depan, kecerdasan buatan yang semakin terintegrasi dalam kehidupan kita bisa memiliki jejak ekologis yang jauh lebih kecil berkat efisiensi komputer kuantum. Hal ini dapat menjadi langkah maju yang besar menuju dunia yang lebih berkelanjutan.

5.3 KOMPUTASI KUANTUM DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI

Pada bagian selanjutnya, kita akan melihat bagaimana komputer kuantum dapat memengaruhi keputusan sehari-hari kita. Salah satu bidang yang paling menjanjikan, khususnya untuk aplikasi industri, adalah riset operasi; di bidang ini, komputer kuantum dapat mengubah secara radikal perencanaan dan optimalisasi sumber daya, yang berdampak langsung pada kehidupan kita sehari-hari.

Riset operasi klasik

Berikut adalah gambaran mengenai hal ini: Bayangkan Anda menghadapi masalah-masalah kecil yang umum seperti mengatur jadwal bersih-bersih rumah dengan mempertimbangkan kesibukan setiap penghuni, mengemas barang untuk liburan tanpa ada yang tertinggal, atau memilih rute paling efisien untuk menyelesaikan berbagai urusan di lokasi yang berbeda-beda. Semua ini adalah contoh masalah riset operasi, sebuah cabang matematika yang mempelajari cara mengoptimalkan keputusan organisasi yang kompleks. Kita sering kali menyelesaikan tugas-tugas ini secara intuitif berkat pengalaman bertahun-tahun atau dengan kesabaran ekstra; masalah-masalah ini pun kerap menjadi bahan diskusi antara pasangan, saudara, atau teman serumah.

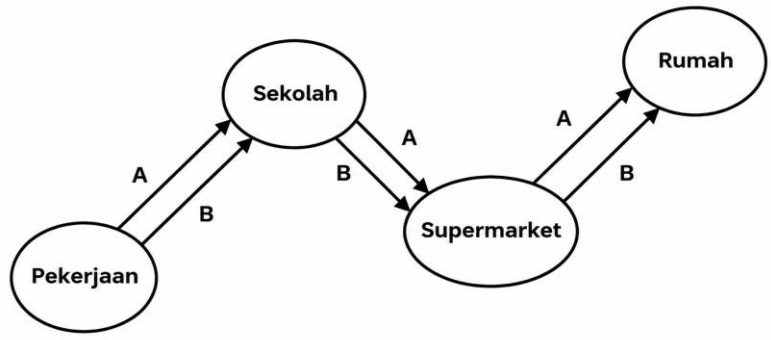
Faktanya, secara matematis dapat dibuktikan bahwa semua ini merupakan masalah yang sangat sulit. Saking sulitnya, riset operasi dikembangkan justru untuk merumuskan masalah-masalah tersebut secara matematis dan kemudian menemukan algoritma paling efisien untuk menyelesaikannya. Masalah-masalah semacam itu telah dipelajari dan diklasifikasikan dalam bentuknya yang paling sederhana namun bermakna, dan dikenal dengan istilah-istilah seperti: manajemen personel atau sumber daya, *knapsack problem* (masalah ransel), *traveling salesman problem* (masalah pedagang keliling), dan sebagainya. Dalam *knapsack problem*, tersedia N objek yang masing-masing memiliki bobot dan tingkat kegunaan tertentu dan tujuannya adalah memilih objek mana yang akan dimasukkan ke dalam ransel untuk mencapai bobot minimum sekaligus utilitas maksimum dari objek-objek yang dibawa tersebut.

Sementara itu, traveling salesman problem yang sempat kita bahas secara singkat di Bab 2 berkaitan dengan pencarian rute terpendek yang menghubungkan berbagai kota; sebuah dilema yang mungkin pernah dihadapi oleh siapa pun yang pernah menggunakan alat navigasi satelit. Misalkan seorang pedagang keliling yang berangkat dari Padua harus mengunjungi Roma, Florence, Genoa, Venesia, dan Turin dalam rangkaian perjalanan penjualan dan promosi sebelum kembali ke Padua. Dalam situasi ini, algoritma harus menemukan solusi terbaik, yaitu rute yang mencakup kelima kota tersebut dengan total jarak

tempuh terpendek demi menghemat waktu dan bahan bakar. Selain itu, mungkin ada kondisi lain yang harus dipenuhi; misalnya, pedagang tersebut harus singgah terlebih dahulu di pelabuhan Genoa untuk mengambil barang yang kemudian harus diantarkan ke Venesia; atau mungkin ada jalan tol yang dalam beberapa kasus tidak ingin ia bayar, atau kemacetan lalu lintas (yang sangat mungkin terjadi pada waktu-waktu tertentu) yang ingin ia hindari, dan sebagainya. Seiring bertambahnya jumlah kota yang akan dikunjungi, masalah ini dengan cepat menjadi semakin rumit karena jumlah kemungkinan rute meningkat sangat pesat: untuk 5 kota, jumlah rute yang berbeda adalah 24; untuk 10 kota, jumlahnya menjadi 362.880; dan untuk 15 kota, jumlahnya melebihi 87 miliar.

Jika kita masuk ke dalam mobil dan meminta navigator untuk mencarikan rute dengan beberapa pemberhentian di tengah perjalanan, kita sebenarnya meminta perangkat lunak tersebut untuk memecahkan masalah optimasi yang serupa dengan *traveling salesman problem* (masalah pedagang keliling). Dan, seperti yang kita semua tahu, perangkat lunak di mobil atau ponsel pintar kita dapat dengan cepat memberikan solusinya. Namun, apakah kita yakin bahwa solusi yang diberikan itu benar-benar yang terbaik? Jika kita renungkan sejenak, menjawab pertanyaan ini tidak hanya mengharuskan kita mengetahui solusi yang diberikan oleh navigator satelit, tetapi juga kemampuan untuk membandingkannya dengan semua kemungkinan rute lainnya.

Mari kita ambil contoh paling sederhana di mana, untuk setiap segmen perjalanan, hanya ada dua pilihan jalan, seperti yang digambarkan secara skematis dalam Gambar 5.1. Sebagai contoh, di kota kita, untuk pergi dari tempat kerja guna menjemput anak-anak dari sekolah, kita bisa melewati Via Aurelia atau Via Barnaba (disingkat A atau B). Untuk sekalian mampir ke supermarket, kita memiliki dua pilihan rute lainnya, yang demi kemudahan juga akan kita sebut sebagai A atau B. Dengan demikian, kombinasi rute tempat kerja–supermarket melalui sekolah adalah AA, AB, BA, dan BB. Jika kita melengkapi rute perjalanan hingga sampai di rumah dengan juga mempertimbangkan dua kemungkinan rute antara supermarket dan tempat tinggal kita kombinasi yang terbentuk menjadi AAA, AAB, ABA, ABB, BAA, BAB, BBA, dan BBB. Kita pun mendapatkan delapan kombinasi berbeda: 2 × 2 × 2.



Gambar. 5.1 Pertumbuhan eksponensial jumlah kemungkinan rute perjalanan dari tempat kerja ke rumah seiring dengan bertambahnya jumlah perhentian di tengah perjalanan.

Bayangkan sekarang bahwa, saat menentukan rute perjalanan, kita harus memilih salah satu dari dua opsi di setiap persimpangan atau percabangan jalan. Seperti yang telah kita lihat,

jumlah kombinasi yang mungkin meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah percabangan sehingga setelah melewati 300 persimpangan, kita akan menghadapi 2 pangkat 300 (yaitu, angka 2 dikalikan dengan dirinya sendiri sebanyak 300 kali) kemungkinan yang berbeda. Pola pertumbuhan ini serupa dengan kisah legenda firaun dan papan catur, namun dengan papan catur yang memiliki 300 kotak, bukan 64 kotak. Angka yang dihasilkan 2 pangkat 300 jauh lebih besar daripada jumlah atom di alam semesta, sehingga secara praktis mustahil untuk memeriksa setiap solusi satu per satu guna menentukan rute terbaik.

Pertumbuhan eksponensial dalam jumlah kemungkinan solusi serta ketidakmungkinan untuk memverifikasi apakah suatu solusi yang diusulkan benar-benar optimal merupakan ciri khas masalah pengambilan keputusan. Masalah seperti "traveling salesman" (pedagang keliling) dikategorikan sebagai masalah kombinatorial dan umumnya memiliki tingkat kesulitan yang meningkat secara eksponensial.

Kami telah menekankan bahwa lonjakan jumlah kombinasi yang harus ditelusuri merupakan inti permasalahannya. Namun, mengingat ketidakmungkinan untuk memverifikasi semua solusi yang ada, bagaimana sebenarnya masalah-masalah ini ditangani? Selama berpuluh-puluh tahun, para matematikawan dan ilmuwan komputer telah mengembangkan algoritma canggih untuk memecahkannya. Meskipun tidak selalu mungkin untuk menjamin bahwa solusi yang ditemukan adalah yang terbaik secara mutlak, algoritma-algoritma ini mampu memberikan solusi yang sangat baik sering kali cukup mendekati titik optimal. Hal ini serupa dengan kehidupan sehari-hari: kita membuat pilihan berdasarkan pengalaman, intuisi, atau bahkan sedikit keberuntungan untuk menghadapi kompleksitas dan kekacauan, misalnya saat menghadapi kemacetan lalu lintas dalam perjalanan pulang setelah seharian bekerja.

Pada akhirnya, saat kita mengarungi kompleksitas kehidupan sehari-hari dengan strategi dan pilihan kita sering kali tanpa mengetahui apakah pilihan tersebut adalah yang terbaik riset operasi beserta algoritmanya membantu kita menemukan keteraturan di tengah kekacauan, dengan menyarankan jalur yang mungkin tidak sempurna namun memungkinkan kita untuk bergerak menuju tujuan kita.

Para pengembang algoritma untuk memecahkan masalah kompleks telah mengambil inspirasi dari metode yang dikembangkan manusia selama berabad-abad, serta dari strategi alam. Salah satu contohnya adalah metode simpleks, yang berawal dari posisi awal berupaya mengikuti jalur tercepat menuju solusi. Ibarat menuruni gunung, di setiap persimpangan kita memilih jalur dengan penurunan paling curam. Namun, strategi ini berisiko membawa kita ke jalan buntu; kita dapat keluar dari situasi tersebut dengan menambahkan langkah acak selama proses pencarian. Dalam analogi tadi, sesekali kita mengambil jalur menanjak untuk keluar dari jalan buntu tersebut dan melanjutkan perjalanan turun. Alam juga telah menginspirasi algoritma revolusioner, seperti algoritma genetika, yang meniru pergerakan kawanan burung saat berburu serangga atau memasukkan elemen acak yang analog dengan mutasi genetik ke dalam proses pencarian solusi masalah.

Terakhir, strategi lain yang diadopsi dari bidang fisika adalah *annealing*, atau proses "tempering" (pengerasan/penempaan logam). Ini adalah strategi yang terinspirasi oleh metode dalam pengerjaan logam dan digunakan untuk menemukan solusi optimal bagi

masalah kombinatorial. Pendekatan ini dapat diibaratkan dengan tugas yang sering dihadapi saat kita masih kecil: menata sekotak penuh kepingan Lego. Pada dasarnya, ada dua cara untuk menyusun Lego. Metode pertama melibatkan penempatan kepingan satu demi satu secara rapi ke dalam kotak hingga terisi penuh. Meskipun sistematis, metode ini memiliki kelemahan utama: waktu yang dibutuhkan bertambah secara proporsional dengan jumlah kepingan. Sebagai contoh, menyusun 500 kepingan akan memakan waktu 10 kali lebih lama dibandingkan menyusun 50 kepingan.

Namun, ada alternatif yang jauh lebih efisien: Masukkan semua kepingan ke dalam kotak lalu kocok awalnya dengan kuat, kemudian perlahan-lahan menjadi lebih lembut. Kepingan-kepingan tersebut mulai tersusun dengan sendirinya, mengendap di dasar dan membentuk lapisan-lapisan yang saling tumpang tindih. Strategi kedua ini, meskipun tidak sempurna, sering kali memberikan hasil yang sangat baik dan yang lebih penting, waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan tugas tersebut hampir tidak bergantung pada jumlah kepingan. Demikian pula, terdapat algoritma yang menggunakan *annealing* sebagai strategi untuk memecahkan masalah kombinatorial melalui prosedur yang tampak tidak teratur dan acak mirip dengan guncangan kecil pada kotak tadi guna menemukan solusi yang sangat efektif, meskipun tidak selalu merupakan solusi terbaik yang mutlak.

Riset operasi kuantum

Sebagaimana telah kita simpulkan dari beberapa halaman pengantar mengenai riset operasi ini, masalah-masalah yang ingin dipecahkannya dapat ditemukan di mana-mana dan sangat penting bagi proses industri serta pembelajaran ilmiah. Algoritma klasik yang kita gunakan untuk memecahkan masalah tersebut sangat beragam dan terus berkembang.

Dalam beberapa tahun terakhir, sebagian komunitas ilmiah dan mitra industri mulai menjajaki penggunaan komputer kuantum di bidang ini. Motivasi yang mendorong pembelajaran ke arah ini adalah fakta bahwa seperti yang telah kita lihat tingkat kesulitan masalah kombinatorial terletak pada pertumbuhan eksponensial jumlah kemungkinan konfigurasi yang harus ditelusuri. Pembaca yang jeli tentu menangkap analogi dengan apa yang dijelaskan pada Bab 1 mengenai register kuantum: dalam kasus tersebut pun, jumlah kemungkinan konfigurasi dari $n$qubit kuantum tumbuh secara eksponensial seiring dengan bertambahnya jumlah qubit n. Berkat prinsip superposisi kuantum, komputer kuantum dapat berada dalam semua keadaan tersebut secara bersamaan! Oleh karena itu, muncul gagasan bahwa pembelajaran dapat dipercepat dengan menelusuri semua kemungkinan solusi secara serentak melalui superposisi kuantum. Saat ini, hampir setiap algoritma riset operasi klasik memiliki padanannya dalam versi kuantum. Kita menyaksikan semakin banyaknya contoh dan pembuktian formal yang mengindikasikan potensi keuntungan penggunaan komputer kuantum. Lebih jauh lagi, penggunaan teknologi ini telah menunjukkan manfaat praktis dalam berbagai konteks industri berkat teknologi dan kecepatan qubit superkonduktor.

Berikut ini, kita akan membahas beberapa kasus paling signifikan dan potensi penerapannya. Dorongan awal dan sejauh ini yang paling berdampak di bidang ini dilakukan oleh perusahaan Kanada, D-Wave, yang sejak tahun 2011 telah mengusulkan sistem perangkat keras *qubit* superkonduktor untuk memecahkan jenis masalah kombinatorial tertentu melalui

metode *annealing*, sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. D-Wave bukanlah komputer kuantum universal yang mampu menjalankan algoritma-algoritma yang kita bahas di Bab 2, namun sistem ini tetap sangat andal dalam memecahkan masalah kombinatorial.

Hingga saat ini, perusahaan tersebut menawarkan sistem untuk memecahkan masalah kombinatorial dengan ribuan variabel yang, dalam beberapa kasus, memiliki kinerja yang kompetitif atau bahkan lebih unggul dibandingkan algoritma klasik. Penerapan di dunia industri mencakup optimalisasi logistik di Pelabuhan Los Angeles, optimalisasi lalu lintas taksi di Beijing dari bandara menuju pusat kota, dan banyak lagi. Penerapan komputasi kuantum pada masalah optimasi kombinatorial menunjukkan potensinya di berbagai sektor, mulai dari optimasi logistik hingga keuangan. Sebagai contoh, sekelompok peneliti IBM, bekerja sama dengan Delta Air Lines, telah berhasil melakukan eksperimen penggunaan komputer kuantum untuk mengoptimalkan penempatan pesawat di gerbang bandara, sehingga mengurangi waktu transit penumpang. Sementara itu, di Italia, Intesa Sanpaolo Bank sedang menjajaki bagaimana sistem kuantum dapat digunakan untuk menyempurnakan strategi pengelolaan portofolio investasi. Masalah optimasi portofolio yang umum yang dapat diselesaikan menggunakan komputer kuantum adalah menentukan aset mana yang harus disimpan, dijual, atau dibeli guna memaksimalkan imbal hasil yang diharapkan, dengan mempertimbangkan tingkat risiko yang dapat diterima.

Di sektor lain, Universitas Padua, bekerja sama dengan Thales Alenia Space Italy dan mewakili Badan Antariksa Eropa (*European Space Agency*), menggunakan metode kuantum untuk mengoptimalkan misi konstelasi satelit buatan. Satelit-satelit ini bertugas mengamati permukaan Bumi, dan tantangannya adalah menentukan lintasan serta pengamatan yang harus dilakukan oleh setiap satelit, dengan mempertimbangkan berbagai batasan seperti keterbatasan energi, waktu, memori, dan lebar pita komunikasi. Terakhir, di sektor energi dan telekomunikasi, perusahaan-perusahaan besar Eropa dan internasional sedang mengkaji bagaimana optimasi kuantum dapat meningkatkan pengelolaan jaringan energi terutama dengan adanya sumber energi terbarukan atau mengoptimalkan posisi antena untuk pengulang (*repeater*) telekomunikasi.

Contoh-contoh yang disebutkan menyoroti tidak hanya fleksibilitas komputasi kuantum, tetapi juga dampaknya yang kian besar terhadap berbagai industri dan sektor utama. Banyak persoalan sehari-hari baik dalam konteks industri maupun sosial dapat disederhanakan menjadi masalah kombinatorial dan saat ini ditangani menggunakan algoritma klasik. Namun, seiring pesatnya kemajuan pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak kuantum, kita sedang mendekati titik balik. Sebagaimana akan kita lihat pada paragraf berikutnya, jika pertumbuhan teknologi terus berlanjut dengan laju saat ini, kita mungkin akan segera menyaksikan dampak signifikan teknologi kuantum terhadap berbagai aspek kehidupan kita.

Secara teoretis, komputer kuantum universal diharapkan mampu memecahkan masalah riset operasi dengan efisiensi yang belum pernah ada sebelumnya, serta mengoptimalkan rute dan pilihan dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan komputer klasik. Sebagai contoh, dalam masalah *traveling salesman* (penjual keliling), komputer kuantum dapat menganalisis secara simultan semua kemungkinan kombinasi rute antar-kota

seperti Roma, Florence, Padua, Turin, dan Venesia lalu memilih rute yang paling efisien dari segi waktu dan penggunaan bahan bakar. Bahkan jika terdapat variabel tambahan seperti waktu pengambilan barang, jalan tol yang perlu dihindari, atau potensi kemacetan lalu lintas komputer kuantum dapat mengintegrasikan faktor-faktor tersebut ke dalam analisis guna menemukan solusi optimal. Komputer kuantum universal berpotensi mengubah sektor-sektor seperti logistik, manajemen sumber daya, dan banyak bidang lainnya. Meskipun teknologi komputer kuantum masih dalam tahap awal dan penerapan praktisnya memerlukan pengembangan lebih lanjut, prospek yang ditawarkannya sangatlah menarik. Mungkin tidak lama lagi kita akan tiba di masa ketika pilihan-pilihan sehari-hari kita dioptimalkan berkat kekuatan luar biasa dari komputasi kuantum.

Menjelang datangnya era komputer kuantum, berbagai industri mulai bersiap untuk memanfaatkan potensi teknologi revolusioner ini. Masalah optimasi kombinatorial yang krusial bagi berbagai sektor kini ditafsirkan ulang menggunakan bahasa kuantum yang baru. Menerjemahkan persoalan praktis tertentu ke dalam bahasa ini, melakukan pemrograman, hingga menjalankan uji coba awal memerlukan keahlian sangat khusus yang saat ini masih sulit ditemukan. Perusahaan-perusahaan besar, yang menyadari peluang besar yang mungkin terbuka dengan hadirnya komputer kuantum andal berkapasitas *qubit* tinggi, terdorong untuk tetap berada di garis depan. Kesiapan menghadapi momen ketika komputer kuantum canggih tersedia di pasaran menjadi hal yang sangat penting untuk mempertahankan dan meningkatkan keunggulan kompetitif. Dalam konteks ini, kemampuan beradaptasi dengan cepat terhadap prinsip-prinsip komputasi kuantum dapat menjadi penentu antara memimpin inovasi dan tertinggal di belakang.

5.4 PERKEMBANGAN DAN PROSPEK KOMPUTASI KUANTUM

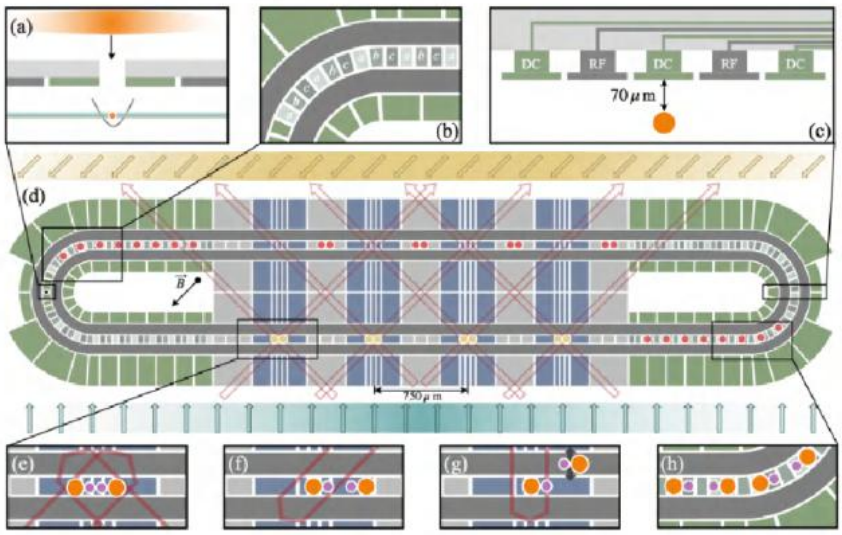
Dalam beberapa tahun terakhir, kita telah menyaksikan kemajuan signifikan di bidang komputasi kuantum, yang ditandai dengan terwujudnya berbagai purwarupa komputer baru serta demonstrasi perhitungan yang semakin canggih dan sering kali melampaui ekspektasi awal. Salah satu contohnya adalah pengumuman cip baru IBM (Condor, yang memiliki 1.121 qubit meskipun kinerjanya terbatas dalam hal presisi) yang bertepatan dengan peluncuran peta jalan pengembangan industri terbaru mereka pada Desember 2023. Cip ini menandai lompatan kualitatif yang penting: dari purwarupa awal dengan jumlah qubit yang sedikit (pada tahun 2016, IBM menyediakan prosesor dengan hanya lima qubit untuk publik melalui akses jarak jauh) dan fungsionalitas terbatas, kita telah beralih ke sistem yang jauh lebih kompleks. Meskipun upaya sejauh ini berfokus pada pengembangan perangkat keras yang diperlukan untuk mendukung cip masa depan, tantangan berikutnya adalah meningkatkan kinerja cip superkonduktor tersebut. Presisi cip Condor yang lebih rendah memang menjadi hambatan signifikan, karena hal ini membatasi panjang algoritma yang dapat dijalankan secara efektif. Dalam praktiknya, jumlah gerbang kuantum yang dapat diproses sebelum kesalahan mengganggu keandalan hasil masih terlalu rendah untuk melakukan perhitungan yang benar-benar bermanfaat.

Setelah mengembangkan cip dengan 1.000 qubit dan dengan prospek peningkatan jumlah tersebut di tahun-tahun mendatang IBM kini menghadapi tantangan krusial: meningkatkan presisi gerbang logika individual secara signifikan dan, yang terpenting, menerapkan kode koreksi kesalahan yang efektif. Faktanya, terwujudnya komputer kuantum universal yaitu komputer yang mampu memecahkan masalah umum bahkan ketika kompleksitas komputasi dan jumlah qubit yang dibutuhkan untuk menyelesaikannya terus meningkat sangat bergantung pada kemampuan untuk mengoreksi kesalahan yang mungkin muncul selama perhitungan kuantum berlangsung.

Untuk mencapai tujuan ini, IBM berencana memperkenalkan serangkaian algoritma mitigasi kesalahan guna meningkatkan presisi hasil yang dihasilkan oleh cip mereka. Menurut peta jalan mereka, IBM menargetkan untuk mengembangkan cip yang mengintegrasikan kode koreksi kesalahan secara penuh pada tahun 2029, sehingga memungkinkan dilakukannya perhitungan kuantum berskala besar untuk aplikasi praktis dan sehari-hari seperti yang telah disebutkan sebelumnya dalam bagian riset operasi. Sementara itu, mengingat keterbatasan kemampuan komputer kuantum saat ini, IBM telah meluncurkan "tantangan 100×100" (100×100 challenge), sebuah inisiatif yang mendorong penemuan dan pengembangan algoritma dengan potensi dampak signifikan bagi sains dan industri. Algoritma-algoritma ini harus kompatibel dengan cip 100-*qubit* (untuk saat ini mengesampingkan cip Condor yang, meskipun memiliki lebih dari 1000 *qubit*, memiliki tingkat presisi yang terbatas), serta menggunakan sekitar seratus gerbang logika dasar per qubit. Tujuannya adalah memanfaatkan cip kuantum yang tersedia saat ini untuk mencapai hasil ilmiah atau aplikasi industri yang belum pernah ada sebelumnya.

Terkait prosesor kuantum berbasis *trapped ion* (ion yang terperangkap), teknologi ini dikenal karena kemampuannya melakukan operasi logika pada satu maupun dua qubit dengan tingkat presisi yang sangat tinggi yang terbaik yang pernah ditunjukkan di laboratorium serta memungkinkan perhitungan kuantum yang sangat presisi bahkan pada puluhan qubit. Namun, meningkatkan jumlah qubit dengan teknologi ini tetap menjadi persoalan yang sangat kompleks. Faktanya, kita dihadapkan pada masalah skalabilitas: saat upaya dilakukan untuk menambah jumlah qubit, perangkap yang digunakan untuk menahan posisi ion dan menjalankan gerbang logika menjadi semakin tidak stabil.

Untuk mengatasi masalah pada arsitektur ion terperangkap (*trapped ion*), pada tahun 2023 perusahaan Amerika Quantinuum9 mengambil langkah penting dengan memperkenalkan cip *race track* (lihat Gambar 5.2). Quantinuum telah menerapkan solusi untuk mengatasi batasan skalabilitas pada komputer kuantum berbasis ion terperangkap. Alih-alih berfokus pada pengembangan satu perangkap tunggal yang memuat jumlah qubit yang terus bertambah, perusahaan ini merancang cip yang menampung banyak perangkap; perangkap-perangkap ini dapat saling berkomunikasi dengan cara memindahkan ion secara fisik dari satu perangkap ke perangkap lainnya. Dengan cara ini, setiap perangkap hanya memuat sejumlah ion terbatas sehingga menghindari masalah stabilitas yang telah disebutkan sebelumnya sementara penambahan jumlah perangkap pada prinsipnya memungkinkan komputer kuantum tersebut untuk ditingkatkan skalanya.



Gambar. 5.2 Jalur lintasan (*race track*) pada cip Quantinuum. Ion-ion tetap berada di zona hijau ("area memori" komputer kuantum), tempat mereka kemudian dipindahkan ke zona biru untuk menjalankan gerbang logika yang diperlukan bagi komputasi kuantum.

Tentu saja, solusi ini menuntut pengendalian ion individu yang sangat canggih, termasuk kemampuan untuk memindahkan ion dan memicu interaksi antara ion yang berasal dari perangkap berbeda, demi memanipulasi keadaan kuantum keseluruhan dari semua ion tersebut. Cip *race track* mewujudkan visi ini yang beberapa tahun lalu mungkin tampak seperti fiksi ilmiah: ion dapat dipindahkan di sepanjang sirkuit yang terbagi menjadi dua zona berbeda. "Zona hijau" berfungsi sebagai "area memori", tempat ion berada saat tidak terlibat langsung dalam eksekusi gerbang logika, sembari mempertahankan keadaan kuantum awal ion tersebut.

Di sisi lain, "zona biru" dikhususkan untuk menjalankan operasi yang diperlukan bagi komputasi kuantum: penyiapan keadaan awal, gerbang logika, dan pengukuran. Aspek inovatif lainnya dari desain ini adalah kemampuan untuk memindahkan ion secara berkelompok, misalnya dalam kelompok yang terdiri dari delapan ion. Pendekatan ini meniru logika klasik *byte* dalam dunia komputer tradisional, di mana satu *byte* terdiri dari delapan *bit*. Dengan hadirnya teknologi baru yang menampilkan berbagai perangkap (*traps*) yang saling berkomunikasi dalam satu cip, kita telah menyaksikan hasil-hasil tak terduga seperti demonstrasi penciptaan keadaan terjerat (*entangled state*) 32-qubit (yang dikenal sebagai keadaan GHZ, untuk menghormati fisikawan Daniel Greenberger, Michael Horne, dan Anton Zeilinger). Keberhasilan ini menyoroti kemampuan untuk menghasilkan keadaan kuantum yang sangat kompleks dengan jumlah qubit yang besar.

Hal ini tidak hanya menunjukkan kemajuan teknis dalam mengendalikan sistem kuantum, tetapi juga membuka jalan bagi pengembangan lebih lanjut yang dapat membuat arsitektur ini dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*), yaitu dengan menambah jumlah qubit yang tersedia untuk komputasi. Dalam beberapa tahun ke depan, hal ini dapat berujung pada

kemampuan untuk menunjukkan "keunggulan kuantum" (*quantum advantage*), yakni memecahkan masalah-masalah tertentu (misalnya, menyimulasikan model yang relevan untuk memahami sifat magnetik dan konduktif material) dengan daya komputasi yang jauh melampaui kemampuan superkomputer klasik.

Terakhir, sementara IBM memaparkan rencana masa depannya (peta jalan tahun 2023), QuEra sebuah perusahaan rintisan (*startup*) kecil dan dinamis yang merupakan *spin-off* dari Universitas Harvard juga memaparkan peta jalannya (lihat Gambar 5.3) untuk pengembangan komputer kuantum berbasis atom Rydberg (perlu diingat bahwa ini adalah atom yang disiapkan dalam keadaan tereksitasi tinggi agar lebih mudah dimanipulasi). Berkat kolaborasi dengan kelompok pembelajaran salah satu pendirinya, profesor fisika Harvard Mikhail Lukin, QuEra menjanjikan kemajuan yang signifikan lebih cepat daripada apa yang diusulkan IBM dalam peta jalannya. Pada bulan Desember 2023, QuEra mendemonstrasikan kemampuan untuk menjalankan algoritma yang kompleks sembari mengoreksi kesalahan yang terjadi selama proses komputasi. Untuk melakukan hal ini, diperlukan penerapan redundansi dengan menambah jumlah qubit: Sebagai contoh, untuk menjalankan komputasi kuantum dengan 48 qubit (yang disebut qubit "logis", karena jumlah ini merepresentasikan qubit yang benar-benar tersedia untuk komputasi), QuEra menggunakan hingga 280 qubit (yang disebut qubit "fisik", karena jumlah inilah yang harus dikendalikan dan dimanipulasi).

Pembaca tidak boleh terkecoh oleh fakta bahwa di sini hanya terdapat 48 qubit, sementara cip Condor milik IBM memiliki lebih dari 1.000 qubit: Aspek inovatif dari cip QuEra terletak pada kemampuannya untuk mengoreksi kesalahan sebuah elemen krusial untuk kemudian meningkatkan jumlah qubit dan gerbang logika guna memperoleh hasil komputasi kuantum yang andal. Hasil yang dicapai di laboratorium Harvard tidak hanya melampaui ekspektasi para pendukung paling optimistis di bidang ini dengan selisih waktu beberapa tahun, tetapi juga memungkinkan perusahaan untuk membuat janji yang kredibel (seperti yang dilaporkan dalam Gambar 5.3) janji yang sebelumnya mungkin dianggap tidak realistis yaitu menghadirkan komputer kuantum untuk penggunaan komersial yang memiliki puluhan, dan tak lama lagi ratusan, qubit. Jika perusahaan berhasil mewujudkan peta jalan ini, mereka akan memosisikan diri sebagai pemimpin yang tak terbantahkan di sektor tersebut, sekaligus membuka jalan bagi aplikasi praktis baru yang jauh melampaui ekspektasi pasar saat ini.

Setelah presentasi hasil dari QuEra, John Preskill dari *California Institute of Technology* menyatakan bahwa kita memasuki era baru: Kita telah beralih dari era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) yang ditandai dengan komputer kuantum yang masih belum sempurna dengan jumlah qubit yang terbatas ke era LISQ (Logical Intermediate-Scale Quantum), di mana qubit terlindungi dari kesalahan dan karenanya jauh lebih andal. Sekarang, tantangannya adalah mengembangkan teknologi untuk meningkatkan jumlah qubit, serupa dengan apa yang telah dilakukan pada dekade sebelumnya dengan chip klasik. Pengembangan chip ini telah mendukung kemajuan teknologi luar biasa yang telah secara radikal mengubah hidup kita. Itu adalah gunung yang sangat besar untuk didaki, dan sekarang kita harus mengulangi upaya tersebut dengan teknologi baru ini. Ini tidak akan mudah, tetapi jika kita

berhasil, algoritma kuantum akan menjadi mudah diakses dan dapat digunakan untuk memecahkan masalah kompleks dengan cara yang sebelumnya hanya dibayangkan.



Gambar. 5.3 Peta jalan dari perusahaan rintisan QuEra. Gambar ini menampilkan proyeksi pengembangan hingga tahun 2026, dengan harapan tercapainya keunggulan kuantum dalam persoalan yang bernilai praktis pada saat itu. Di bagian atas garis, ditampilkan qubit "logis" sebagai fungsi dari tahun; qubit ini digunakan untuk menjalankan algoritma kuantum dan dilindungi dari galat selama komputasi melalui kode koreksi galat kuantum (QEC). Kode tersebut memerlukan redundansi sehingga menggunakan jumlah qubit "fisik" yang jauh lebih besar, yang ditampilkan di bawah garis hijau.

Di seluruh dunia, banyak perusahaan dan startup sedang berupaya mengembangkan teknologi yang serupa dengan yang dibahas di halaman ini. Berikut beberapa contoh yang berkaitan dengan Eropa. Perusahaan rintisan Prancis PASQAL, yang berbasis di Paris, membuat kemajuan signifikan dengan teknologi berbasis atom Rydberg-nya, memposisikan diri sebagai pesaing langsung QuEra di seberang Atlantik. Di Austria, Alpine Quantum Technologies sebuah perusahaan spin-off dari Universitas Innsbruck dan Institut Optik Kuantum dan Informasi Kuantum (IQOQI) dari Akademi Ilmu Pengetahuan Austria terus mengembangkan teknologi ion terperangkap. Perusahaan ini didasarkan pada warisan perintis yang solid dari Universitas Innsbruck, yang mewujudkan gerbang logika dua-qubit dua puluh tahun yang lalu. Perusahaan lain di Jerman juga sama aktifnya, seperti NEQXT dan Planqc, yang masing-masing mengeksplorasi potensi ion terperangkap dan atom Rydberg. Aktivitas-aktivitas ini membuktikan dinamisme dan potensi pertumbuhan sektor komputasi kuantum, menjanjikan kemajuan penting untuk masa depan.

Pengembangan komputasi kuantum tidak hanya menuntut pengembangan perangkat keras, tetapi juga perangkat lunak yang memadai untuk memprogram komputer kuantum, serta untuk mengendalikan dan mengoptimalkan berbagai operasi yang diperlukan (seperti menyalakan dan mematikan laser atau medan magnet, mengatur durasi dan modulasi waktu pulsa laser, dan sebagainya). Di bidang perangkat lunak komputasi kuantum, perusahaan raksasa teknologi seperti IBM, Google, dan Amazon memimpin pengembangan dengan berbagai perangkat yang dirancang untuk memprogram algoritma kuantum. IBM menawarkan Qiskit, Google mengembangkan Cirq, dan Amazon meluncurkan Amazon Braket melalui unit AWS (*Amazon Web Services*) miliknya, yang memungkinkan akses ke layanan komputasi kuantum berbasis cloud.

Sementara itu, banyak perusahaan rintisan (*startup*) dan perusahaan khusus bekerja sama erat dengan produsen perangkat keras untuk menyempurnakan solusi yang ada, serta meningkatkan kualitas perangkat keras maupun sistem kendali untuk komponen elektronik dan optik. Sebagai contoh, Quantum Machine dan TOPTICA dikenal karena pengembangan mereka di bidang elektronik kendali dan laser. Terakhir, solusi perangkat lunak canggih sedang dikembangkan untuk mengotomatisasi pengendalian komputer kuantum. Salah satu contohnya adalah perusahaan Jerman, Qruise, yang didirikan bersama oleh salah satu penulis buku ini. Selain itu, semakin banyak perusahaan rintisan bermunculan dengan fokus pada konsultasi dan pengembangan algoritma baru untuk aplikasi spesifik dalam komputasi kuantum. Di antaranya, perusahaan Spanyol Multiverse Computing memiliki spesialisasi dalam aplikasi keuangan, sementara perusahaan Jerman HQS bergerak dalam pengembangan simulasi kuantum untuk material baru dan reaksi kimia.

Sebagaimana dapat kita lihat, industri komputasi kuantum dan teknologi terkaitnya mencakup cakupan yang jauh lebih luas daripada sekadar isu-isu spesifik yang berkaitan dengan mekanika kuantum. Menatap masa depan, bidang teknologi kuantum yang sedang berkembang ini mungkin akan memberikan dampak yang sebanding dengan dampak teknologi elektronika dan komputasi pada dekade-dekade sebelumnya. Akibatnya, teknologi semacam itu dapat menawarkan berbagai peluang bagi pengembangan dan kepemimpinan di berbagai sektor industri bagi mereka yang memutuskan untuk berinvestasi dan berinovasi sejak saat ini.

5.5 TANTANGAN DAN IMPLIKASI TEKNOLOGI KUANTUM

Saat kami menyelesaikan buku ini (pada tahun 2025), kita masih belum dapat memastikan apakah dan kapan komputer serta teknologi kuantum akan menjadi bagian dari kehidupan sehari-hari. Namun, apa yang telah kami uraikan dalam halaman-halaman ini mendokumentasikan kemajuan luar biasa yang telah dicapai: Kita telah menyaksikan perkembangan yang awalnya bersifat teoretis, diikuti oleh evolusi pesat teknologi baru di laboratorium akademis maupun industri. Dalam banyak kasus, langkah yang diperlukan tidak hanya sekadar memahami, tetapi juga menciptakan dan mengembangkan teknologi yang benar-benar baru yang jauh melampaui aplikasi yang semula direncanakan.

Meskipun laju perkembangannya tergolong sangat cepat mengingat besarnya tantangan yang ada perjalanan ke depan masihlah panjang. Masih banyak hambatan yang

harus diatasi, baik dari segi teknis maupun teoretis, seperti perumusan kode koreksi kesalahan yang lebih efisien, pemilihan perangkat keras yang optimal untuk komputer kuantum (superkonduktor, atom, ion, dll.), serta pengembangan algoritma yang mampu memecahkan masalah yang semakin kompleks dengan dampak signifikan di berbagai bidang, seperti pelipatan protein, pembelajaran farmasi, pemodelan material, dan optimalisasi jaringan energi. Tantangan-tantangan ini menjanjikan terbentuknya komunitas pembelajaran dan lahirnya para ahli profesional baru yang akan memadukan keahlian ilmiah dan industri untuk menjawab persoalan tersebut. Sebagaimana sering terjadi, tantangan berskala besar membuka cakrawala peluang yang luas, yang siap untuk dimanfaatkan di masa mendatang.

Rekam jejak sejarah manusia membuktikan bahwa setiap penemuan atau inovasi penting telah menandai langkah maju yang menentukan bagi peradaban. Mulai dari penemuan api yang mendasar hingga pemahaman modern tentang gaya elektromagnetik dan nuklir, manusia terus memperluas cakrawala teknologi dan ilmiah mereka. Namun, tak dapat dipungkiri bahwa di balik kemajuan luar biasa ini, muncul pula risiko signifikan terkait penyalahgunaan teknologi tersebut—yang berpotensi menimbulkan dampak buruk yang meluas. Risiko ini menjadi semakin besar di dunia saat ini yang kian saling terhubung dan sangat bergantung pada teknologi. Kemajuan teknologi kuantum, misalnya, dapat mengarah pada pengembangan sensor yang sangat sensitif, yang mampu memantau aktivitas neuron secara individual di dalam otak kita dari jarak jauh. Hal ini akan memungkinkan pemahaman yang belum pernah ada sebelumnya mengenai cara kerja otak manusia, sekaligus meningkatkan efektivitas pengobatan penyakit saraf.

Di sisi lain, kemampuan untuk memantau aktivitas neuron dari jarak jauh menimbulkan risiko privasi, mengingat aktivitas otak sangat erat kaitannya dengan pikiran, perasaan, dan pengalaman seseorang. Lebih jauh lagi, jika sensor tidak hanya mampu memantau tetapi juga memengaruhi neuron, hal ini dapat memicu skenario distopia di mana pikiran dan emosi seseorang dapat dikendalikan oleh pihak luar. Kondisi ini memunculkan pertanyaan mendasar mengenai kebebasan dan otonomi individu. Demikian pula, sensor kuantum dengan kemampuannya mendeteksi perubahan yang sangat kecil di lingkungan sekitar dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan sistem pengawasan yang sangat canggih. Sebagai contoh, sensor yang mampu mendeteksi gerakan atau aktivitas menembus dinding maupun penghalang lainnya dapat disalahgunakan untuk memantau orang tanpa persetujuan mereka. Risiko ini diperparah oleh fakta bahwa teknologi kuantum memerlukan investasi besar dalam pembelajaran dan pengembangan, yang berpotensi memperlebar kesenjangan teknologi antara negara atau perusahaan swasta yang mampu membiayai teknologi ini dengan pihak-pihak lain yang tidak memiliki akses terhadapnya. Hal ini merupakan isu umum serupa dengan yang terjadi pada kecerdasan buatan yang semestinya menjadi prioritas bagi para pemimpin negara.

Saat ini, terdapat perdebatan aktif mengenai batasan kemampuan mesin dan apakah komputer akan menjadi semakin cerdas hingga akhirnya mampu meniru cara kerja otak manusia. Komputer kuantum dapat melakukan hal ini dengan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan komputer klasik. Hal ini memunculkan pertanyaan etis mengenai hakikat

kesadaran dan identitas. Jika sebuah mesin mampu mereplikasi fungsi otak manusia, kita perlu mempertanyakan apakah mesin tersebut memiliki bentuk kesadaran tertentu. Di sisi lain, robot atau lebih tepatnya sensor tidak lagi hanya berada di pabrik atau kendaraan, tetapi juga mulai menyatu dengan tubuh kita dan mengubah diri kita. Pada dasarnya, batas antara manusia dan mesin bisa menjadi semakin kabur, sehingga memicu pertanyaan mengenai batasan etis dalam memodifikasi atau meningkatkan kemampuan tubuh manusia menggunakan teknologi. Menghadapi kenyataan ini, pentingnya pendidikan sains yang kokoh dan meluas menjadi semakin nyata. Setiap orang semestinya mampu memahami informasi ilmiah, sama halnya dengan kemampuan mereka dalam membaca dan menulis. Hal ini bukan sekadar pengembangan diri, melainkan kebutuhan kolektif: masyarakat yang teredukasi dan memiliki wawasan luas merupakan fondasi penting untuk memanfaatkan keunggulan serta mengelola risiko teknologi baru, sekaligus untuk memastikan penggunaan penemuan ilmiah secara etis dan bertanggung jawab. Kami berharap buku ini dapat turut berkontribusi dalam upaya tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, S., & Sobhan, A. (2026). Fundamentals Of Quantum Computing And Cloning In Healthcare. In *Merging Quantum Cloning And Blockchain Solutions For Health Informatics* (Pp. 53-82). Igi Global Scientific Publishing.

Alnabulsiyyah, H., & Aldawsari, M. (2026, June). Cybersecurity In The Era Of Quantum Computing And Advanced Ai: Emerging Threats And Future Directions. In *European Conference On Cyber Warfare And Security* (Pp. 46-51). Academic Conferences International Limited.

Annamalai, C. (2026). *The Convergence Of Quantum Computing And Artificial Intelligence: Foundations, Supremacy, Applications, And Cryptographic Implications. Researchgate*.

Arellano-Peña, H. (2026). Projection Architecture, Not Quantum Substrate: Why Quantum-Linked Consciousness Does Not Contradict Finite Shadow-Bandwidth Limits On Engineered Quantum Computation.

Arellano-Peña, H. (2026). Quantum Computers As Stress Tests Of Hilbert-Space Realism: Rational Quantum Mechanics, Finite Projection Bandwidth, And The Tcgs–Sequention Interpretation Of Quantum Computation. *Preprint*.

Basalama, A. Y. O. (2026). Cybersecurity Risks Of Quantum Computing. *Available At Ssrn 6608319*.

Beressova, A., Alimov, A., Taipov, A., Moldabek, B., & Galizhan, N. (2026). The Societal And Technological Impact Of Quantum Computers. *Journal Of Emerging Technologies And Computing*, *5*(2).

Bharathi, S., & Prakasam, P. (2027). Technological Advances In Quantum Computing: Recent Developments, Applications, And Future Directions. *Quantum Enhancements To The Ai Industry*, 327-360.

Bultrini, D., & Wootton, J. (2026). How Could Fault-Tolerant Quantum Computers Be Used In Procedural Content Generation?. *Ieee Transactions On Games*.

Clenet, M., Dion, M., & Blanchet, F. G. (2026). Addressing Ecological Challenges From A Quantum Computing Perspective. *Methods In Ecology And Evolution*, *17*(3), 632-649.

De Oliveira, N. S. (2026). *The Legal Constitution Of The Quantum Age: Quantum Computing, Digital Security, And The Philosophical Reconstruction Of Law*. Northon Salomão De Oliveira.

Dharamshi, K. (2026). 6 Quantum Leaps In Finance: Integrating Quantum Computing And Machine Learning. *Quantum Machine Learning: Revolutionizing Data Analysis And Optimization*.

Doyle, L., Seifollahi, F., & Singh, C. (2026). Do We Have A Quantum Computer? Expert Perspectives On Current State And Future Prospects. *Physical Review Physics Education Research*, *22*(1), 010101.

Esho, E. O., Akinyelu, A. A., & Dinis, M. A. P. (2026). Sustainable Generative Ai And Quantum Computing: Review Assessment On The Environmental Impact Of Generative Ai And Quantum Technologies. *Frontiers In Sustainability*, *7*, 1726832.

Front, S. (2026). Quantum Computers And Predicting The Future In Devs And Westworld. *Science Fiction Film & Television*, *19*(1), 45-69.

Gerlach, T. C. (2026). Protecting Computer Systems In The Post-Quantum World.

Goundar, S., Shruthi, K., Nuhiu, A., Dhasarathan, C., & Bhardwaj, A. (2026). Quantum Computing—Real-World Applications And Its Transformative Potential. In *Quantum Computing* (Pp. 233-252). Crc Press.

Holzmann, N. (2026). From Promise To Practice: Closing The Application Gap In Quantum Computing. *Arxiv Preprint Arxiv:2608.04936*.

Jayashree, J., Vijayashree, J., & Aruna, V. S. (2026). Foundation Of Quantum Computing For Business Applications. *Quantum Computing For Sustainable Supply Chain Management: Integrating Artificial Intelligence For Eco-Efficient Operations And Strategic Optimization*.

Jove, M., & Yimesgen, B. (2026). Exploring The Possibilities Through Quantum Computing.

Kessler, V. A. (2026). Quantum Computing And Its Impact On Modern Physics. *Corps Et Psychisme. Recherches En Psychanalyse Et Sciences Humaines*, *13*(1), 2818-2824.

Lane, B., Boshuijzen-Van Burken, C., De Jong, E., Mittal, A., Sand, M., Seskir, Z., ... & Vermaas, P. (2026). Ethical Innovation Of Quantum Computing In Europe: A Policy Intervention. *Journal Of Responsible Technology*, 100188.

Maheshwari, A. (2026). To What Extent Could Quantum Computing Pose A Threat To Global Modern Data Security?. *Journal Of Cybersecurity Education, Research And Practice*, *2026*(1), 16.

Makila, C., & Naskath, D. Quantum Computing And Future Ai Based Cryptography Makila1, C. Umarani2, Dr. J. Naskath3 And K. Poongodi4. *Ai And Global Security*, 14385.

Malik, J., Ashraf, H., Jhanjhi, N. Z., & Ihsan, U. (2027). Quantum Computing For Secure And Scalable Metaverse Communications. In *Challenges And Solutions Of Using Quantum Security Frameworks For Iot Devices* (Pp. 185-238). Igi Global Scientific Publishing.

Mavrogiorgou, S. (2026). Quantum Computers: Where Physics Meets Computer Science. *Open Schools Journal For Open Science*, *9*(1).

Padavic-Callaghan, K. (2026). Playing Quantum Games. *New Scientist*, *271*(3603), 20-21.

Ploennigs, J., Smarsly, K., Berger, M., Dragos, K., & Kliesch, M. (2026). Quantum And Quantum-Inspired Computing In Civil Engineering. *Advanced Engineering Informatics*, *69*, 103960.

Rahu, M. A., Hussain, M., Kamboh, S., Ali, S. M., & Rajpar, A. (2026). Quantum Computing: The Technological Breakthroughs, Applications, Challenges, And The Future Of Computation. *Spectrum Of Engineering Sciences*, *4*(5), 1966-1985.

Roosan, D., & Khan, R. (2026). Quantum Computing Applications. In *Quantum Informatics For Novel Therapeutics: Ai-Enhanced Cybersecurity And Data Science For Next-Generation Healthcare* (Pp. 3-23). Cham: Springer Nature Switzerland.

Singh, L. (2026). Quantum Computing The Next Technological Frontier And Its Impact On Science, Security, And Society. *International Journal Of Advanced Multidisciplinary Application*, *3*(6), 97-104.

Sureshkumar, P., & Narayan, M. (2026). Quantum Computing In Material Science. In *From Bits To Qubits: The Quantum Transformation Of Computing: The Power Of Quantum Computing* (Pp. 393-406). Cham: Springer Nature Switzerland.

Tiwana, P., Sood, K., Kaur, H., Modgil, A., Jain, I. B., & Sappal, J. S. (2026). Quantum-Driven Ai: The Intersection Of Quantum Computing And Machine Learning Algorithms. In *Quantum-Enhanced Cloud Ai: The Next Frontier In Machine Learning And Deep Learning* (Pp. 96-111). Bentham Science Publishers.

Wang, L. L., Liu, H., Fu, H., Deng, Z., Dong, B., & Gao, N. (2026, March). The Rise Of Quantum Computing—Take A Bite For Built Environment And Urban Microclimate Research. In *Building Simulation* (Pp. 1-12). Beijing: Tsinghua University Press.

Yuvasri, B. (2026). Cryptography And The Quantum Computing Threat: Challenges And Future Solutions. In *Post-Quantum Cryptography And Iot Communications For Sustainable Urban Development* (Pp. 123-148). Igi Global Scientific Publishing.

KOMPUTASI KUANTUM YANG MENGUBAH DUNIA

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen, ilmu sosiologi dan ilmu hukum. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik), Ilmu Perpajakan.

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-63-5 (PDF)
9 786347 695635