

**KAJIAN KOMPUTASI DALAM UPAYA
MENGUAK RAHASIA DUNIA KUANTUM**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Ilmu Fisika Teori dan Fisika Komputasi
pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Tanggal 8 Juli 2025**

**Oleh:
Prof. Drs. Pekik Nurwantoro, M.S., Ph.D.**

*Bismillaahirrahmaanirrahiim,
Assalaamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,*

Yang saya hormati,
Ketua, Sekretaris, dan para anggota Majelis Wali Amanat,
Ketua, Sekretaris, dan para anggota Senat Akademik,
Ketua, Sekretaris, dan para anggota Dewan Guru Besar,
Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada,
Dekan dan para Wakil Dekan di lingkungan Universitas Gadjah Mada,
Ketua dan Sekretaris beserta seluruh anggota Senat FMIPA UGM,
Ketua dan Sekretaris Departemen Fisika beserta Civitas Akademika FMIPA UGM,
Segenap tamu undangan, rekan sejawat, kerabat dan keluarga serta hadirin sekalian yang saya muliakan,

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga kita semua dapat hadir di Balai Senat Universitas Gadjah Mada (UGM) yang terhormat ini dalam keadaan sehat wal 'afiat.

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya hormati,

Pada kesempatan ini saya mendapat kesempatan dari Rektor Universitas Gadjah Mada untuk menyampaikan kewajiban pidato penguken sebagai Guru Besar bidang Fisika Teori dan Fisika Komputasi di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) UGM. Perkenankan saya untuk menyampaikan pidato ilmiah dengan judul **"Kajian Komputasi dalam Upaya Mengungkap Rahasia Dunia Kuantum"**.

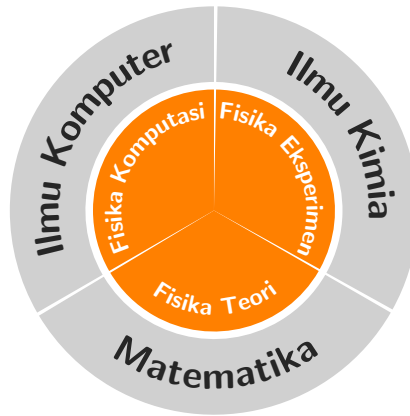
Saya memilih topik kuantum karena selain menjadi bidang yang menjadi kajian penelitian dan pengajaran sejak menamatkan program sarjana hingga doktoral, aspek kuantum juga sudah merambah ke hampir semua perangkat teknologi di sekitar kita. Meski demikian, pemahaman umum terkait berbagai aspek kuantum nampak belum sebanding dengan implementasi aspek kuantum yang luas tersebut. Hal ini dapat dipahami karena gejala kuantum memang nampak tidak sejalan dengan persepsi umum (*common sense*) yang biasa kita alami sehari-hari.

Richard P. Feynman, seorang pemenang Nobel Fisika yang juga banyak dikenal sebagai tokoh yang mampu menjelaskan hal rumit menjadi gamblang, memberikan pernyataan populer: ***I can safely say nobody understands quantum mechanics*** (Feynman dan Wilczek, 2017). Pernyataan Feynman tersebut bukan dimaksudkan untuk meremehkan yang lain, namun sebaliknya justru untuk memberikan motivasi. Dalam konteks pembelajaran, motivasi atau semangat yang dapat terbangun dari pernyataan Feynman adalah:

- 1 Apabila Feynman yang dikenal cemerlang saja ternyata masih tidak memahami kuantum, maka merupakan hal lumrah apabila banyak pihak mengalami kesulitan yang sama, dan oleh karena itu wajar untuk belajar keras mengatasi kesulitan pemahaman tersebut.
- 2 Feynman secara implisit memberikan penekanan bahwa gejala kuantum sulit untuk dipahami karena secara sifat alamiah menyimpan banyak teka-teki, dan oleh karenanya pantas untuk berusaha keras mengurai misteri tersebut.

Sebelum menguak lebih lanjut terkait gejala kuantum tersebut, terlebih dahulu saya akan menjelaskan posisi bidang Fisika Teori dan Fisika Komputasi dalam ilmu Fisika serta kaitannya dengan keilmuan lainnya, khususnya di lingkup FMIPA UGM. Gambar 1 memberikan ilustrasi sederhana tentang posisi dan kaitan antar bidang keilmuan termaksud.

Langkah yang dilakukan Fisikawan dalam mengungkap gejala alam pada umumnya melalui 2 bidang kajian, yaitu secara kuantitatif dan secara formal. Fisikawan Ekperimen melakukan kajian alam dengan melakukan pengukuran atau pengamatan terhadap sistem yang ditinjau menggunakan perangkat atau peralatan tertentu untuk mendapatkan data kuantitatif dari beberapa besaran fisis yang mewakili sistem tersebut, termasuk mengembangkan konsep untuk memetik makna data kuantitatif yang terkumpul (Ivankov, 2018). Dalam kebanyakan permasalahan, untuk mendapatkan data kuantitatif maka perangkat atau peralatan tertentu perlu terlebih dahulu dibangun atau prosedur pencuplikan data



Gambar 1: Bidang Fisika Teori dan Fisika Komputasi dan kaitan dengan ilmu lain.

perlu terlebih dahulu dirancang sesuai sifat alamiah besaran fisis yang mewakili sistem tersebut.

Fisikawan Teori melakukan kajian alam dengan melakukan pemodelan berupa suatu ungkapan matematika yang saling mengkaitkan berbagai besaran fisis yang mewakili sistem. Menggunakan model matematika tersebut maka memungkinkan informasi lengkap bagi sistem secara formal akan dapat diperoleh. Dalam kebanyakan permasalahan, untuk mendapatkan informasi lengkap maka metode penyelesaian tertentu perlu terlebih dahulu dirumuskan sesuai perilaku model matematika yang mewakili sistem tersebut.

Dalam suatu keadaan khusus, kajian alam secara kuantitatif dan formal seperti uraian di atas kadang menemui kendala, sebagai contoh ketika alam yang akan dikaji melibatkan temperatur luar biasa tinggi sedangkan perkembangan teknologi belum mampu menyediakan perangkat yang tahan pada temperatur terkait, atau alam yang akan dikaji melibatkan interaksi cacah benda luar biasa banyak sedangkan langkah formal belum mampu menyelesaikan model yang mewakili kompleksitas sistem tersebut. Untuk mengatasi kendala seperti ini dan sejalan

dengan perkembangan komputer maka muncul cara kajian ketiga yang dapat ditempuh Fisikawan Komputasi dalam menguak gejala alam yaitu dengan memanfaatkan perangkat bantu komputer untuk memperoleh data atau besaran fisis berdasar ungkapan diskret yang setara dengan model wakilan sistem (Metropolis *dkk*, 1953).

Dunia Kuantum

Bapak Ibu serta hadirin yang saya hormati,

Sejalan dengan berkembangnya teknologi perangkat laboratorium, mulai awal abad 20 semakin terasa bahwa data eksperimen pada beberapa gejala alam mengalami perbedaan ketika dibandingkan dengan model matematika yang mewakili sistem tersebut. Upaya untuk melakukan revisi bagi model yang tersedia hingga memunculkan model baru yang sesuai dengan hasil eksperimen tersebut pada akhirnya berkembang istilah yang umum digunakan sekarang yaitu Fisika Klasik dan Fisika Modern.

Biasa disebut Fisika Klasik karena model matematika yang telah dikembangkan sebelum tahun 1900 ternyata masih relevan dan sesuai untuk mengkaji berbagai gejala alam hingga saat ini. Contoh yang termasuk dalam kategori ini diantaranya adalah Hukum Newton serta Persamaan Maxwell (Halliday *dkk*, 2014). Sedangkan Fisika Modern adalah perumusan baru bagi beberapa gejala alam yang tidak dapat dikaji menggunakan Fisika Klasik.

Bergantung pada ranah besaran fisis yang ditinjau, Fisika Modern dapat dibedakan menjadi dua yaitu Fisika Relativistik dan Fisika Kuantum. Ketika gejala alam yang dikaji berada dalam rentang ukuran mikroskopik atau skala atomik maka Fisika Kuantum akan memainkan peran penting, namun apabila pada rentang tenaga atau kecepatan tinggi mendekati laju cahaya dalam ruang hampa, maka Fisika Relativistik yang akan berlaku (Beiser, 1987). Dengan demikian ketika gejala alam berada pada rentang ukuran mikroskopik dan sekaligus memiliki kecepatan tinggi maka berlaku Kuantum Relativistik. Dalam naskah ini, batasan aspek kuantum yang akan disajikan adalah Fisika Kuantum yang bukan relativistik.

Alam adalah alamiah (*Nature is natural*)

Menurut KBBI, alamiah memiliki kata padanan sebagai lazim, lumrah atau wajar (KBBI, 2025). Sepintas, istilah alam bersifat alamiah nampak relevan ketika gejala fisika berada dalam ranah Fisika Klasik karena berbagai hal yang terkait dengan gejala tersebut nampak terjadi secara lumrah atau wajar, sesuai kelaziman yang telah tertanam pada persepsi umum. Apabila mengikuti cara pandang tersebut maka Fisika Modern, yaitu Fisika Kuantum dan Fisika Relativistik, sepintas menjadi tidak alamiah karena gejala fisika dalam lingkup Fisika Modern nampak tidak wajar sesuai persepsi umum.

Cara pandang tersebut tentunya kurang tepat karena Fisika Modern juga melakukan kajian terhadap gejala alam, yang semestinya juga bersifat alamiah. Hal seperti ini akan dapat diatasi dengan pemahaman bahwa pengertian lumrah atau wajar dalam Fisika tidak hanya dipandu oleh persepsi umum namun juga dituntun oleh bukti data eksperimen. Ketika terkait dengan gejala alam, maka hal yang lumrah atau wajar tidak hanya diterima secara kualitatif berdasar persepsi, tetapi juga terukur secara kuantitatif berdasar hasil eksperimen.

Berikut merupakan contoh beberapa gejala fisika dalam ranah Fisika Relativistik dan khususnya Fisika Kuantum yang nampak tidak alamiah namun telah terkonfirmasi secara eksperimen.

- ▶ Bayangkan seseorang memiliki teman sebaya yang berada pada lokasi berjauhan. Ketika teman sebaya tersebut kemudian bergerak dengan kecepatan tertentu dalam rangka melakukan perjalanan untuk pertemuan, maka akan menjadi tidak wajar ketika mereka bertemu, teman tersebut ternyata tidak lagi sebaya, namun memiliki umur yang lebih muda. Ketika orang dan teman sebaya tersebut digantikan oleh benda kecil yang disebut partikel muon dan bergerak dengan kecepatan mendekati laju cahaya dalam ruang hampa, maka hal yang nampak tidak wajar tersebut justru yang terjadi dalam pengamatan peluruhan muon (Frisch dan Smith, 1963; Balandin *dkk*, 1974). Gejala ini dalam Fisika Relativistik disebut sebagai pemelaran waktu (*time dilation*).
- ▶ Andaikan ada seseorang melempar sebuah bola melewati satu

pintu yang terbuka. Apabila terdapat dinding beberapa jarak tepat di depan pintu, maka akan merupakan satu kelaziman ketika terdapat satu bercak pada dinding tepat di depan pintu sebagai penanda bahwa bola mengenai lokasi bercak tersebut. Merupakan sesuatu yang tidak wajar ketika bercak tersebut muncul pada lokasi dinding yang justru bukan berada di depan pintu. Ketika bola tersebut diganti benda kecil, disebut partikel elektron atau neutron, dan pintu diganti jajaran atom dalam kristal maka hal yang nampak tidak wajar tersebut justru yang terkonfirmasi dalam eksperimen difraksi elektron (Thomson *dkk*, 1927). Gejala ini dalam Fisika Kuantum disebut sebagai sifat gelombang bagi partikel atau dualisme partikel dan gelombang (*wave-particle duality*) dan sekaligus implementasi bagi prinsip superposisi (*superposition principle*).

- ▶ Gejala lain juga dapat terjadi pada sistem fisis yang diuraikan pada butir di atas. Apabila lebar pintu yang terbuka dipersempit maka sewajarnya lemparan bola akan semakin terarah dan bercak pada dinding akan semakin terlokalisir tepat di depan pintu. Sekali lagi apabila bola diganti dengan elektron dan pintu diganti jarak antar atom, maka hal yang semakin tidak lumrah akan diperoleh. Sewajarnya, semakin sempit celah maka posisi bercak semakin tepat di depan pintu. Namun untuk elektron, semakin sempit celah maka lokasi bercak elektron semakin tidak pasti karena semakin menjauh dari depan celah. Gejala ini dalam Fisika Kuantum disebut sebagai prinsip ketidakpastian Heisenberg (*Heisenberg uncertainty principle*) (Heisenberg, 1927).
- ▶ Bayangkan seorang Kakek dan Cucu sedang bermain bola dan kemudian bola tersebut menggelinding di tempat gelap. Merupakan hal yang wajar ketika sang Kakek mengarahkan lampu senter pada bola maka lokasi bola di kegelapan akan dapat ditemukan. Merupakan hal yang tidak wajar ketika lampu senter menyinari bola kemudian tiba-tiba bola menjadi terpentak. Kenyataannya, hal tidak lazim inilah yang akan didapatkan ketika bola digantikan oleh elektron. Gejala ini dalam Fisika Kuantum disebut seba-

gai efek fotolistrik, yang melandasi cara kerja solar sel (Einstein, 1905; Ossiander *dkk*, 2018). Gejala ini pada hakikatnya merupakan implementasi dari sifat partikel bagi gelombang atau dualisme partikel dan gelombang (*wave-particle duality*) (Knight, 2004).

- ▶ Tinjauan lain, andaikan 2 pasang keluarga masing-masing menempati 2 kamar yang saling bersebelahan. Ketika suara yang berasal dari salah satu kamar terdengar dari kamar lain maka hal ini merupakan satu kelaziman. Hal yang tidak lazim adalah ketika pasangan dari salah satu kamar dapat menerobos ke kamar lain meskipun kamar lain dalam keadaan terkunci. Ketika pasangan keluarga tersebut diganti dengan pasangan elektron, yang disebut *Cooper-pair*, dan 2 kamar tersebut diganti dengan 2 bahan superkonduktor maka hal tak lazim tersebut akan teramati berupa terobosan *Copper-pair* berujud superarus. Gejala ini dalam FisiKa Kuantum disebut sebagai *Josephson effect* (Josephson, 1962, 1974) yang merupakan perwujudan dari terobosan kuantum (*quantum tunneling*) (Merzbacher, 2002).
- ▶ Sebagai contoh terakhir, anggap 2 anak kembar yang berada pada 2 ruang berbeda dan terisolasi. Pada saat awal, posisi 2 anak diatur sedemikian hingga agar salah satu anak dalam keadaan duduk sedang yang lain dalam keadaan berdiri. Karena tidak terjadi komunikasi, maka wajar apabila salah satu anak yang sebelumnya dalam keadaan duduk dan kemudian berdiri maka anak yang berada pada ruang lain mungkin akan tetap dalam keadaan semula. Selama dua kamar dalam keadaan terisolasi dan tanpa komunikasi, maka menjadi tidak wajar untuk berharap bahwa ketika salah satu anak berubah posisi maka anak yang lain akan otomatis mengikuti berubah posisi pula. Apabila 2 anak kembar tersebut diganti dengan 2 photon atau 2 keadaan spin yang saling terbelit (*entangled*), maka gejala yang nampak tidak wajar tersebut akan dapat terwujud (Main *dkk*, 2025). Ketika saat awal dua spin saling *entangled* dan masing-masing dalam keadaan arah atas dan arah bawah, maka ketika keduanya kemudian terpisah jauh, saat salah satu spin berubah keadaan maka seketika dan otomatis, spin

kedua akan mengikuti berubah keadaan. Gejala terjadinya perubahan hanya pada salah satu spin namun akan mengubah keadaan spin kedua, meskipun tanpa ada interaksi antar keduanya, ini dalam Fisika Kuantum disebut sebagai belitan kuantum (*quantum entanglement*) (Georgiev dan Cohen, 2022).

Dampak Aspek Kuantum pada Kajian Komputasi

Bapak Ibu serta hadirin yang saya hormati,

Gejala fisika dalam dunia kuantum yang nampak tidak lumrah di atas dapat menjadi pembeda dengan gejala fisika yang lazim ditemui dalam pengalaman sehari-hari. Karena kajian fisika komputasi biasa dilakukan berdasar model matematika yang mewakili sistem fisis tersebut, maka gejala yang tidak wajar dalam dunia kuantum juga memberikan implikasi penanganan komputasi yang dapat berbeda dengan yang biasa dilakukan dalam fisika klasik. Beberapa pertimbangan komputasi yang dapat saya singgung berdasar bidang minat pengajaran dan penelitian yang saya tekuni adalah:

Prinsip Superposisi

Informasi terkait suatu besaran fisis tertentu yang terkandung dalam suatu sistem kuantum biasa dikenal sebagai suatu keadaan kuantum (*quantum state*), yang dapat diwakili oleh suatu penanda atau label berupa suatu bilangan kuantum. Model matematika yang selama ini diterima sebagai perwujudan aspek dualisme partikel-gelombang dalam Fisika Kuantum, baik mengikuti penggambaran Schrodinger maupun Heisenberg, adalah berupa operasi linear (Sakurai dan Napolitano, 1977). Prinsip superposisi merupakan cara penyajian operasi linear sedemikian hingga apabila suatu keadaan kuantum mewakili suatu sistem dan terdapat keadaan kuantum lain yang juga mewakili maka jumlahan dan kelipatan berbagai keadaan kuantum tersebut juga akan mewakili sistem (Penguin, 1991).

Dari pandangan lain, apabila suatu keadaan kuantum dianggap berada pada salah satu sumbu dalam suatu ruang maka prinsip su-

perposisi dapat dibayangkan sebagai suatu ruang yang memiliki banyak sumbu. Secara ringkas, ketika komputasi dalam ranah Fisika Klasik dibatasi oleh ruang fisis berdimensi 3 maka komputasi dalam ranah Fisika Kuantum secara alamiah perlu mengantisipasi untuk berada dalam ruang abstrak berdimensi banyak yang disebut ruang Hilbert (Prugovecki, 1981).

2 Prinsip Ketakpastian Heisenberg

Beberapa pasangan besaran fisika dalam ranah Fisika Kuantum terbukti bersifat tidak serasi atau tidak kompatibel. Dalam konteks ini, urutan pengambilan pengukuran besaran fisis menjadi penting dalam memperoleh hasil akhir. Ungkapan matematika yang sesuai mewakili sifat ini adalah berupa matriks atau jajaran nilai-nilai. Oleh sebab itu, apabila dua matriks yang mewakili dua besaran fisis saling dapat dibalik atau komutatif, maka urutan operasi matriks menjadi tidak penting, maka dua besaran fisika tersebut tidak melanggar prinsip ketakpastian Heisenberg.

Dalam Fisika Klasik, dua besaran fisika cukup diwakili oleh satu nilai sehingga tidak memerlukan pertimbangan ketakpastian Heisenberg. Secara ringkas, ketika komputasi besaran fisika dalam ranah Fisika Klasik hanya melibatkan nilai-nilai maka prosedur komputasi bagi besaran fisika dalam ranah Fisika Kuantum perlu mengantisipasi potensi urutan operasi matrik yang ketat dan berukuran besar.

3 Terobosan Kuantum

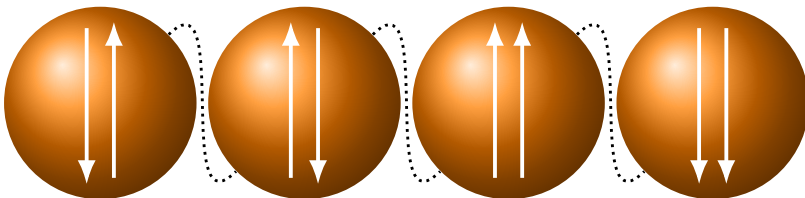
Dalam ranah Fisika Klasik, jangkau gerak suatu benda dapat diperkirakan hingga pada suatu batas sedemikian hingga tenaga potensial sistem tidak melebihi tenaga total yang dimiliki partikel. Dalam Fisika Kuantum, akibat terjadinya terobosan kuantum maka kebolehdjian keberadaan partikel akan lebih jauh hingga pada suatu daerah yang disebut *classically forbidden*. Oleh sebab itu, kajian komputasi dalam ranah Fisika Kuantum perlu mengantisipasi keterlibatan ruang yang lebih luas dibanding sistem klasik.

4 Belitan Kuantum

Secara formal, suatu pasangan keadaan kuantum yang berada dalam belitan maka pasangan keadaan kuantum tersebut akan saling tidak terpisahkan. Andaikan terpisahkan maka suatu pengukuran terhadap salah satu keadaan kuantum tidak akan berpengaruh pada keadaan kuantum lainnya sehingga keadaan kuantum gabungan dapat dikaji secara individu. Kelaziman dalam komputasi, prosedur untuk mengkaji masalah masalah banyak benda akan menjadi lebih sederhana apabila tiap individu penyusun dapat diperlakukan secara terpisah. Keberadaan belitan kuantum memunculkan potensi bahwa kajian banyak benda dalam ranah Fisika Kuantum tidak dapat dilakukan secara terpisah.

Dari berbagai pertimbangan tersebut maka empat dampak aspek kuantum yang perlu diantisipasi pada kajian komputasi adalah potensi cacah peubah yang besar, tidak lokal, berjangkau jauh dan tidak terpisahkan.

Sebagai gambaran sederhana, tinjau suatu sistem yang terdiri 2 spin dengan 2 keadaan yaitu spin arah atas dan spin arah bawah. Gambar 2 merupakan ilustrasi bagi keadaan superposisi yang mewakili sistem oleh keberadaan 4 kebolehjadian konfigurasi yang dapat tersusun oleh 2 spin penyusun.

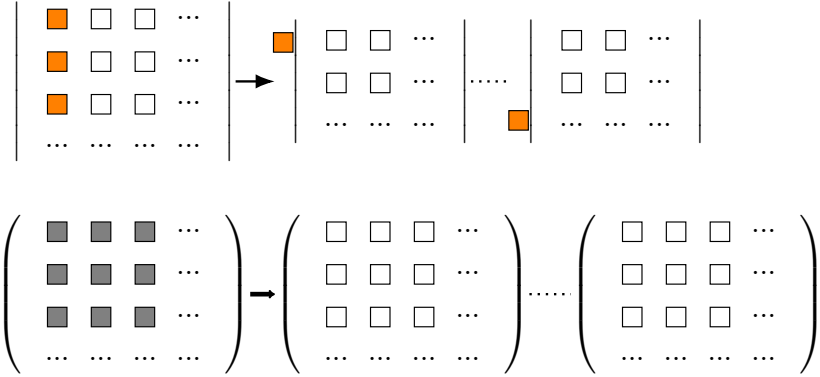


Gambar 2: Ilustrasi kebolehjadian konfigurasi 2 spin.

Dapat dibayangkan apabila terdapat $N = 1000$ spin dengan 2 keadaan maka dapat terbentuk $2^N \approx 1,071508607 \times 10^{301}$ cacah kebo-

lehjadian konfigurasi. Apabila 1 konfigurasi berpadanan dengan 1 operasi *floating point* sederhana dan diproses oleh komputer tercepat di dunia saat ini yang memiliki unjuk kerja sekitar 1.742×10^{18} flop/s (*floating point operations per second*) maka diperlukan waktu sekitar $1,97756729 \times 10^{275}$ tahun untuk operasi sederhana tersebut.

Dalam proses komputasi, cacah konfigurasi tersebut akan memunculkan bentuk matriks dengan ukuran yang sebanding dengan besaran cacah konfigurasi. Hal ini semakin menimbulkan ongkos komputasi mahal, khususnya ketika melibatkan operasi determinan pada proses diagonalisasi matriks saat penyelesaian persamaan Schrodinger tak gayut waktu atau operasi eksponensial matriks yang muncul pada operator evolusi waktu saat penyelesaian persamaan Schrodinger gayut waktu (Suzuki, 1985). Gambar 3 memberikan wakilan visual bagi dua operasi matriks tersebut.



Gambar 3: Representasi visual bagi operasi determinan dan eksponensial matriks.

Profil Dunia Kuantum berdasar Tinjauan Komputasi

Bapak Ibu serta hadirin yang saya hormati,

Berdasar uraian di atas, ongkos komputasi yang diperlukan untuk menguak munculnya berbagai ketidaklaziman gejala fisika dalam dunia

kuantum akan nampak sulit ditangani (*intractable*) dengan perangkat komputer yang tersedia. Salah satu langkah untuk mengatasi hal ini maka fisikawan dapat mengikuti pola penyelesaian kasus yang dilakukan dalam cerita detektif, salah satu yang populer adalah detektif Hercule Poirot oleh Agatha Christie (Christie, 2008). Dalam berbagai cerita, Poirot memiliki pola kerja yang sama bahwa kasus yang nampak tak terpecahkan maka akan terjawab setelah dilakukan proses *profiling*, yaitu proses pengumpulan informasi berharga dengan detail dan hati-hati, khususnya hal sepele yang luput dari perhatian. Dalam proses *profiling* kadang terjadi situasi terpilin (*twisted plot*) yaitu hal yang nampak memberatkan namun justru meringankan.

Beberapa profil gejala fisika dalam kajian dunia kuantum yang dapat diidentifikasi diantaranya seperti berikut.

Dunia kuantum berupaya mencapai kondisi minimalis

Ketika suatu kajian gejala fisika menemui kebuntuan maka prinsip dasar yang berlaku umum dalam fisika, termasuk dunia kuantum, adalah meninjau keadaan sistem terikat untuk mencapai tenaga terendah atau kondisi minimalis. Tenaga terendah bagi suatu sistem fisika merupakan besaran tunggal maka berdasar intuisi fisika menjadi wajar apabila keadaan tenaga terendah tersebut akan menjadi tumpuan (*pivot*) tercapainya keadaan setimbang atau stabil. Apabila ternyata juga diperlukan informasi terkait keadaan aras tenaga yang lebih tinggi, informasi yang telah diperoleh terkait keadaan tenaga terendah tersebut akan dapat digunakan sebagai kriteria rujukan, yaitu keadaan aras tenaga yang lebih tinggi dapat diterima selama memenuhi syarat ortonormal dengan keadaan tenaga terendah.

Secara formal maka representasi kestabilan sistem pada tenaga terendah akan berupa suatu fungsi yang tidak memiliki titik nol (*zeros*) dan dapat dicirikan oleh bentuk lembah dari suatu kurva. Dari titik pandangan lain, keadaan stabil pada tenaga terendah tersebut merupakan keadaan minimum global bagi sistem. Menggunakan profil kondisi minimalis seperti ini maka berbagai prosedur komputasi dapat diimplementasikan untuk mencapai keadaan tersebut (Jones *dkk*, 1998).

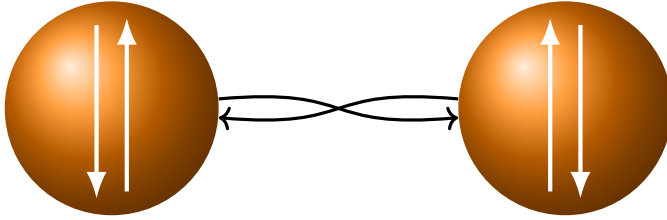
Dunia kuantum cenderung untuk ekonomis

Di atas sudah disampaikan bahwa prinsip superposisi menyebabkan kajian aspek kuantum perlu melibatkan ruang Hilbert berdimensi banyak yang mampu menampung semua kebolehjadian konfigurasi keadaan kuantum. Dari aspek komputasi, hal ini sering menimbulkan kesulitan karena keterbatasan perangkat komputer yang tersedia. Untuk mengurangi cacah dimensi ruang yang terlibat, praktik komputasi umum adalah dengan melakukan sampling berdasar perilaku stokastik atau pengabaian peran individu berdasar pendekatan medan tengahan (*mean field approximation*) (Sakthivadivel, 2022). Menggunakan alasan seperti diberikan oleh profil ke 3 berikut, yaitu peran individu bagi sistem banyak benda, langkah tersebut kadang belum dapat memberikan hasil memuaskan.

Di pihak lain, keberadaan belitan kuantum (*quantum entanglement*) nampak memberikan kerumitan tambahan karena perilaku banyak benda akan tidak dapat dipandang sebagai perilaku tiap benda secara terpisah. Mirip dalam cerita Hercule Poirot, situasi terpinil (*twisted plot*) juga terjadi pada kajian dunia kuantum. *Quantum entanglement* yang nampak menambah kerumitan namun ternyata menjadi jalan untuk mengurangi cacah dimensi ruang yang diperlukan oleh prinsip superposisi. Beberapa kajian menunjukkan bahwa selama yang ditinjau adalah keadaan tenaga terendah dan beberapa aras keadaan di atasnya, maka ungkapan superposisi hanya melibatkan sejumlah kecil beberapa keadaan kuantum yang saling *entangled*, bukan keseluruhan keadaan konfigurasi.

Sebagai gambaran, untuk suatu sistem yang terdiri 2 spin yaitu spin arah atas dan spin arah bawah yang seharusnya melibatkan 4 kebolehjadian konfigurasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2, maka ungkapan superposisi pada keadaan tenaga terendah pada umumnya hanya melibatkan 2 kebolehjadian konfigurasi yang saling *entangled* seperti Gambar 4 berikut.

Secara ringkas, profil bahwa sistem kuantum cenderung untuk ekonomis mengandung arti bahwa suatu sistem kuantum yang sebenarnya memiliki ruang berdimensi besar namun dalam beberapa keadaan ha-



Gambar 4: Ilustrasi kebolehjadian konfigurasi 2 spin yang saling *entangled*.

nya memanfaatkan sebagian kecil ruang besar tersebut. Menggunakan profil ini maka keberadaan *discrete time crystals* dalam model sistem banyak spin berhasil diidentifikasi menggunakan metode *density matrix renormalization group (DMRG)*, yaitu suatu prosedur komputasi yang memanfaatkan peran *quantum entanglement* dalam rangka untuk mencapai cacah minimal bagi orde matriks yang terlibat (Nurwantoro dkk, 2019).

Dunia kuantum menghargai sifat individualis

Dunia kuantum bukan hanya terkait dengan ukuran tiap partikel yang kecil, namun juga cacah partikel penyusun sistem yang tidak besar. Dalam keadaan ini, peran bagi tiap partikel penyusun menjadi penting dan akan mewarnai sifat sistem keseluruhan secara utuh.

Untuk memberikan gambaran, ditinjau sistem atom He yang mewakili sistem 2 partikel, yaitu 2 elektron di sekitar inti He. Dalam kebiasaan ranah fisika klasik maka 2 elektron tersebut dapat dipandang sebagai 2 benda yang tak terbedakan. Namun, dalam ranah fisika kuantum, 2 elektron akan terbedakan karena masing-masing memiliki 4 penanda atau label yang disebut bilangan kuantum. Sebanyak 3 bilangan kuantum pada 2 elektron tersebut memiliki nilai yang sama, namun yang sedikit membedakan adalah bilangan kuantum keempat yang disebut spin.

Secara mudah, kepemilikan 3 bilangan kuantum yang sama terse-

but memiliki makna bahwa kedua elektron diijinkan untuk sama-sama berada pada jarak dan orientasi sudut yang sama terhadap inti He, yang dapat digambarkan seolah kedua elektron berada pada selaput permukaan bola. Sepintas, karena yang berbeda hanya kecil yaitu hanya 1 dari 4 bilangan kuantum, maka perbedaan ini nampak tidak penting. Nyatanya justru perbedaan pada bilangan kuantum ke 4 (spin) inilah yang menyebabkan kestabilan atom He menjadi lebih besar dibanding atom ringan lain. Didasarkan pada nilai spin yang berbeda, maka kedua elektron membentuk keadaan saling *entangled*, menjadi tidak terpisahkan, yang bersama-sama menjaga kestabilan sistem atom He. Andaikan tidak saling *entangled*, maka salah satu nilai spin akan dapat diubah tanpa mempengaruhi yang lain, yang berakibat kedua elektron berpotensi akan memiliki nilai spin yang sama. Dampak bahwa elektron dengan nilai spin setengah adalah partikel jenis fermion yang mengikuti prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion principle*), maka potensi 2 elektron dengan nilai spin sama tersebut tidak akan terjadi (Straumann, 2004).

Kelaziman dalam ranah fisika klasik, apabila 2 elektron mampu membentuk atom yang stabil, diharapkan jika ditambahkan elektron lebih banyak maka tingkat kestabilan atom akan meningkat. Data menunjukkan bahwa hal ini tidak terjadi karena tingkat kestabilan atom Li yang memiliki 3 elektron justru lebih rendah dibanding atom He (Sansonetti dan Martin, 2005; Lide, 2008).

Mekanisme lain yang melibatkan pasangan 2 elektron juga memungkinkan untuk terjadi pada bahan yang disebut superkonduktor. Dalam bahan ini, pasangan 2 elektron dengan arah spin beralawanan yang semestinya saling tolak menolak, namun justru terikat secara lemah akibat terjadi sedikit pergeseran dari kisi atom terdekat. Dua elektron yang terikat lemah tersebut justru membentuk pasangan yang disebut *Cooper pair* dengan perilaku seperti boson (*boson-like*) yang tidak lagi mengikuti prinsip larangan Pauli (Rohlf, 1994).

Dalam pengertian lain, profil yang menunjukkan bahwa keadaan sistem kuantum secara utuh sangat ditentukan oleh kontribusi sifat individu dari partikel penyusun memiliki makna bahwa perhatian terhadap detail merupakan hal mendasar dalam kajian sistem kuantum. Idiom untuk profil ini adalah *the devil is in the details* (Titelman, 1996).

Dunia kuantum mengakomodasi sifat selektif

Apabila profil sebelumnya mengulas peran detail sifat individu terhadap keadaan sistem kuantum secara utuh, maka profil berikutnya akan menyinggung peran sifat selektif dalam dunia kuantum. Untuk memudahkan pemahaman maksud sifat selektif maka diberikan ilustrasi berikut.

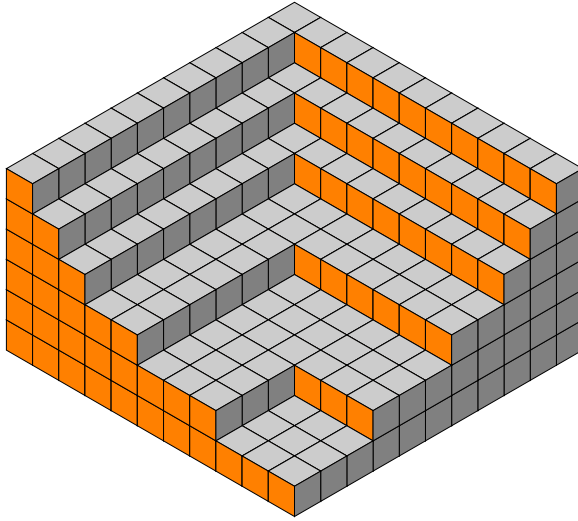
Dalam pengalaman sehari-hari terdapat banyak contoh bahwa sebarang bentuk benda pada dasarnya dapat disusun berdasarkan bentuk benda sederhana. Anak kecil dapat bermain dengan menyusun berbagai bentuk benda menarik berdasar penataan sekumpulan kotak kecil. Pekerja bangunan juga dapat membangun rumah dengan berbagai bentuk arsitektur berdasar susunan batu-bata berbentuk balok sederhana.

Praktik sederhana tersebut dapat diimplementasikan pada kajian aspek kuantum dengan pertimbangan bahwa pada ranah kuantum maka skala jarak begitu kecil dan oleh karenanya berbagai gejala kuantum pada rentang jarak yang besar akan dapat dianggap sebagai susunan gejala yang sama pada skala jarak kecil. Prosedur ini mirip seperti proses untuk melihat secara selektif wujud bagian kecil suatu benda yang kurang jelas dengan menggunakan kaca pembesar sehingga wujud bagian kecil tersebut akan dapat diketahui dengan lebih jelas, seperti ilustrasi Gambar 5 berikut.

Secara komputasi, prosedur tersebut dapat diimplementasikan melalui representasi *piecewise Hamiltonian* yang berlaku pada skala jarak kecil. Pada daerah kecil tersebut, maka secara selektif dapat diambil bentuk *piecewise Hamiltonian* sederhana yang memiliki penyelesaian tertentu. Penyelesaian pada keseluruhan daerah dilakukan dengan menyusun kembali penyelesaian dari representasi *piecewise Hamiltonian* sesuai syarat batas yang perlu dipenuhi (Nurwantoro dkk, 2025).

Untuk gejala fisika yang tidak stasioner, tetapi dinamis, maka prosedur sejenis akan dapat dimanfaatkan berupa pemilihan skala waktu yang begitu kecil. Penggambaran untuk gejala ini dapat dianalogikan seperti halnya seorang pemain akrobat yang akan meniti suatu tali yang dibentangkan di antara dua titik penyangga seperti ilustrasi Gambar 6.

Dalam kondisi normal maka seseorang tidak akan berhasil untuk

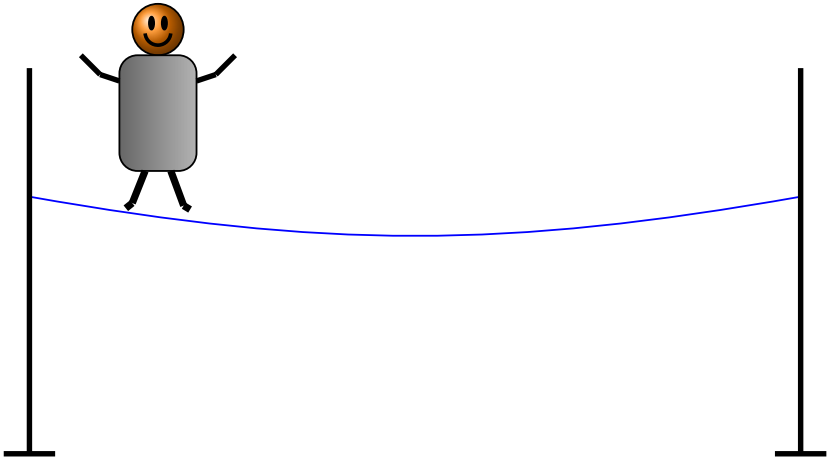


Gambar 5: Berbagai bentuk geometri yang tersusun oleh sekumpulan kotak kecil.

berjalan pada tali yang terbentang tersebut karena impuls yang terbentuk oleh injakan kaki pada tali menyebabkan seseorang akan terjatuh. Bagi pemain akrobat hal tersebut mampu diatasi dengan berjalan secara amat perlahan pada tali sehingga memiliki cukup waktu untuk mengantisipasi impuls atau perubahan momentum kecil yang terjadi.

Dalam kajian ranah kuantum, pemain akrobat tersebut digantikan oleh eksponensial matriks yang mewakili operator evolusi waktu. Melalui pengambilan skala waktu yang kecil dan dengan memanfaatkan beberapa sifat matriks yang mewakili Hamiltonian, yaitu matriks Hermitian, matriks segitiga atas dan segitiga bawah serta matriks nilpoten (*nilpotent matrix*), maka operasi yang melibatkan operator evolusi waktu akan dapat dilakukan sesuai pendekatan orde tinggi yang diambil (Nurwantoro, 2025; Abramowitz dan Stegun, 1967).

Profil ini memberikan gambaran bahwa kajian keadaan sistem kuantum kadang tidak dapat dipaksakan untuk bekerja dengan cepat karena perilaku penyelesaian secara selektif perlu melibatkan skala jarak dan skala waktu kecil atau melangkah secara halus dan perlahan. Fal-



Gambar 6: Ilustrasi gerak perlahan oleh pemain akrobat

safah Jawa: ***Alon-alon asal klakon*** nampaknya sejalan dengan profil yang menggambarkan dunia kuantum.

Prospek ke Depan: Komputasi Kuantum

Bapak Ibu serta hadirin yang saya hormati,

Kajian komputasi berdasar aspek kuantum yang mengarah pada profil dunia kuantum di atas hanyalah salah satu upaya untuk mengungkap dunia kuantum. Terdapat banyak mekanisme komputasi lain yang dapat dimanfaatkan untuk memperoleh informasi aspek kuantum, dengan kesamaan bahwa semua upaya tersebut memanfaatkan perangkat komputer yang berlandaskan pada prinsip Fisika Klasik.

Feynman pada tahun 1982 memberikan pandangan lain dalam melakukan kajian komputasi untuk sistem kuantum, yaitu bahwa perangkat komputer yang berlandaskan pada prinsip Fisika Klasik nampaknya tidak akan mampu melakukan simulasi aspek fisika pada dunia kuantum, kecuali hal tersebut dilakukan pada perangkat komputer yang juga ber-

landaskan pada prinsip Fisika Kuantum (Feynman, 1982). Meskipun ide Feynman berupa perangkat keras belum dapat segera diwujudkan saat itu, namun dalam aspek model beserta algoritma berhasil dikembangkan oleh Deutsch, Shor, dan Grover (Deutsch, 1985; Shor, 1994; Grover, 1996).

Dalam tradisi Himpunan Fisika Indonesia Yogyakarta (HFIY), sebagai bagian untuk memasyarakatkan ilmu Fisika, bagi yang baru menyelesaikan tugas belajar baru biasanya diberikan kesempatan presentasi untuk menyampaikan topik umum yang masih terkait bidang ilmu Fisika dalam bentuk Simposium berkala. Dalam forum tersebut tahun 1999, penulis berkesempatan menyajikan presentasi dengan judul: **Komputasi Kuantum: Mimpi atau Realitas?** Jawaban judul presentasi tersebut baru muncul pada tahun 2017 dengan pengumuman IBM bahwa Komputer Kuantum berbasis 17 qubit (*quantum bit*) telah berhasil direalisasikan dan dapat dimanfaatkan oleh publik atau peneliti (Castelvecchi, 2017).

Untuk memperjelas pengertian komputer yang berlandaskan pada prinsip Fisika Klasik, maka yang dimaksud Feynman dengan komputer yang berlandaskan pada prinsip Fisika Kuantum pada prinsipnya adalah analog seperti perbandingan antara aspek fisika yang berlandaskan Fisika Klasik dan Fisika Kuantum seperti disampaikan dalam uraian di atas. Apabila komputer klasik didasarkan pada apa yang disebut bit sebagai representasi nilai biner 0 atau 1, maka komputer kuantum didasarkan pada apa yang disebut qubit (*quantum bit*) sebagai representasi keadaan superposisi nilai biner 0 dan 1. Secara ringkas, kuantum komputer secara alamiah membawa ciri alamiah aspek kuantum yaitu prinsip superposisi.

Didasarkan pada prinsip superposisi tersebut maka dua qubit akan dimungkinkan untuk memiliki ciri alamiah kuantum lainnya yaitu dalam keadaan belitan kuantum (*quantum entanglement*). Komputer kuantum yang membawa sifat alamiah prinsip superposisi akan memungkinkan berbagai kebolehdjadian dapat terjadi secara bersamaan atau dengan makna lain, berbagai informasi dapat tertampung dan terproses secara bersamaan atau paralel. Sifat alamiah lain yaitu *quantum entanglement* pada komputer kuantum akan memungkinkan terjadinya pe-

ningkatan proses komputasi dan informasi karena suatu pengukuran yang dilakukan pada satu qubit dalam keadaan *entangled* akan otomatis memberikan informasi dari qubit pasangannya (Hundt, 2022).

Potensi komputer kuantum seperti itulah yang memungkinkan berbagai kendala kajian komputasi kuantum seperti diuraikan sebelumnya akan dapat diatasi, khususnya kebutuhan dimensi ruang besar dalam rangka mewadahi prinsip superposisi. Namun, untuk sampai pada tahap implementasi tersebut, kendala yang masih belum terselesaikan saat ini adalah pada upaya untuk mempertahankan sifat kuantum dari sistem fisis yang mewakili qubit. Beberapa sistem fisis yang saat ini digunakan untuk mewujudkan qubit masih begitu peka terhadap lingkungan sekitar sehingga mudah terjadi *decoherence* atau kerusakan keadaan kuantum. Kondisi ini yang menyebabkan realisasi komputer kuantum dengan cacah qubit besar masih memerlukan kajian lanjut.

Dari beberapa sistem fisis pembentuk qubit, salah satu mekanisme yang diduga mampu mengatasi *decoherence* adalah sistem berbasis topologi berupa sistem kuantum periodik yang terkontrol (*periodically driven quantum system*) atau dikenal sebagai *Floquet system*. Penelitian yang dilakukan penulis bersama kolega untuk mengkaji keberadaan *discrete time crystal* yang memiliki periodisitas ganda melalui suatu model sistem spin yang dikontrol oleh bentuk harmonik merupakan upaya untuk mewujudkan *Floquet system* (Nurwantoro dkk, 2019).

Contoh lain yang memiliki potensi sama untuk perwujudan qubit adalah *Floquet topological superconductors*, satu sistem kuantum periodik terkontrol yang mampu menghasilkan fase topologi baru yang tidak muncul pada sistem statik. Fase topologi baru tersebut akan berwujud pada jenis Majorana baru yang memiliki tenaga tidak nol. Dengan demikian potensi perwujudan qubit sebagai superposisi dari dua keadaan kuantum akan memungkinkan untuk dilakukan yaitu dengan menyandingkan jenis Majorana baru tersebut dengan jenis Majorana kedua yang memiliki tenaga nol pada sistem statik. Berbagai kajian tersebut membuka peluang penerapan komputasi kuantum yang lebih luas (Bomantara dan Gong, 2018a,b, 2020; Bomantara, 2021; Cheng dkk, 2022; Chen dkk, 2023; Kolesnikow dkk, 2024; Bomantara, 2025).

Penutup

Bapak Ibu serta hadirin yang saya hormati,

Seperti halnya alam dalam dunia kuantum yang cenderung untuk mencapai kondisi minimalis atau keadaan tenaga terendah (*ground state*), maka aktivitas pribadi ke depan nampaknya juga mengikuti sifat alamiah *slow living* ini. Sebagai seorang pendidik, ketika lingkungan terdekat yaitu anak dan mantan bimbingan yang sekarang menjadi kolega ternyata bersedia mengikuti arah bidang minat fisika dan komputer yang sejalur dan bahkan mampu mencapai raihan yang lebih, maka sebenarnya hal tersebut sudah melegakan. Apabila diperlukan, maka aktivitas ke depan hanyalah menempatkan diri sebagai lembah, sebagai pijakan dan penopang yang mendukung kolega dan anak didik mencapai keadaan yang lebih tinggi (*excited state*). **Tut Wuri Handayani.**

Pada akhir pidato ini, izinkan saya untuk menyampaikan penghargaan, apresiasi dan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan dalam keseluruhan langkah akademik saya hingga detik ini. Ucapan terima kasih pertama saya sampaikan kepada Pemerintah Republik Indonesia, khususnya Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemendikristek), atas kepercayaan yang diberikan sehingga saya diberikan anugerah jabatan Guru Besar dalam bidang Fisika Teori dan Fisika Komputasi.

Selanjutnya, saya menyampaikan terima kasih kepada Pimpinan Universitas, Senat Akademik, Dewan Guru Besar, Tim Penilai Angka Kredit (PAK) Universitas dan Direktur beserta jajaran Direktorat SDM Universitas.

Apresiasi dan terimakasih saya sampaikan kepada Pimpinan Fakultas MIPA UGM, Pimpinan dan Anggota Senat Fakultas MIPA UGM, Pimpinan Departemen Fisika FMIPA UGM, Tim Penilai Angka Kredit (PAK) tingkat Fakultas dan seluruh jajaran Bagian Kepegawaian Fakultas.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada Prof. Dr. Agung Bambang Setio Utomo, S.U. dan Prof. Dr. Sri Wahyuni S.U. yang telah berkenan menelaah dan memberi masukan berharga pada naskah pidato pengukuhan ini.

Penghormatan dan apresiasi saya sampaikan kepada Prof. Dr. Muslim (Alm.) dan Dra. Zahara Muslim, M.Sc yang telah membimbing dan memberi dorongan dalam bidang akademik sejak sebagai mahasiswa hingga memulai karir sebagai Dosen serta Prof. Ray Jones yang telah memberikan bimbingan selama tugas belajar.

Penghormatan yang sama saya sampaikan kepada Dr. Sumartono (Alm.), Prof. Dr. Karyono (Alm.), Prof. Dr. Agung Bambang Setio Utomo, S.U. , Prof. Dr. Harsojo, S.U., M.Sc., Dr. Moh. Ali Joko Wasono, M.S., Dr. Guntur Maruto dan Dr. Yosef Robertus Utomo yang telah memberikan arahan dan bantuan selama mengawali tugas sebagai Dosen.

Rasa terima kasih dan apresiasi mendalam saya sampaikan kepada Prof. Dr. Subanar (Alm.) dan Prof. Dr. Chairil Anwar yang telah memberikan arahan dan pembelajaran dengan sabar dalam melaksanakan tugas membantu beliau berdua. Begitu juga kepada Prof. Dr. Sri Wahyuni S.U., Prof. Dr. Iip Izul Falah, Dr. Agus Kuncaka, Prof. Drs. Mudasir, M.Eng., Ph.D., Dr. Eng. Ari Setiawan (Alm.), Dr.techn. Khabib Mustofa, S.Si., M.Kom., dan Dr.rer.nat. Lina Aryati, M.S., saya menyampaikan terima kasih atas kerjasama yang saling mendukung dan penuh kepercayaan selama melaksanakan tugas bersama di Dekanat.

Apresiasi mendalam saya sampaikan kepada Dra. Eko Tri Sulistyani, M.Sc., Dr. Iman Santoso S.Si., M.Sc., , Prof. Dr. Eng. Fahrudin Nugroho S.Si., M.Si., Dr. R. Sumiharto, S.Si., M.Kom., dan Prof. Sholihun, S.Si., M.Sc., Ph.D.Sc. atas diskusi dan kolaborasi yang tetap berjalan dengan baik, mulai dari saat sebagai Mahasiswa Bimbingan dahulu hingga sebagai kolega saat ini.

Apresiasi juga saya sampaikan kepada kolega sepeguruan, bimbingan Prof. Muslim (Alm.) yaitu Prof. Dr. Arief Hermanto, S.U., M.Sc., Prof. Dr. Kamsul Abraha (Alm.) dan Prof. Dr.rer.nat. Muhammad Farchani Rosyid, M.Si., atas kesediaan berbagi ilmu selama ini.

Apresiasi saya sampaikan kepada seluruh kolega di Departemen Fisika atas suasana kekeluargaan yang hangat: Dr. Wahyudi, Prof. Dr. Sismanto, Drs. Sunarta, M.S., Dr. Bambang Murdaka, Drs. Imam Suyanto, M.Si., Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si., Prof. Dr. Gede

Bayu Suparta, M.Si., Dr. Eko Sulistya, Prof. Dr. Yusril Yusuf, Dr. Dwi Satya Palupi, Dr. Juliasih Partini, Dr. Budi Eka Nurcahya, Prof. Dr. Mitrayana, S.Si., M.Si., Dr. Mirza Satriawan, Dr. Eng. Rinto Anugraha NQZ, Prof. Dr.Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Si., M.Eng., Dr.rer.nat. Wiwit Suryanto, Romy Hanang Setya Budhi, Ph.D., Ikhsan Setiawan, S.Si., M.Si., Elida Lailiya Istiqomah, S.Si., M.Sc., Muhamad Darwis Umar, Ph.D., Moh. Adhib Ulil Absor, Ph.D., Dr. Chotimah, Dr.Eng. Ahmad Kusumaatmaja, Dr.Sc. Ari Dwi Nugraheni, Muhammad Arifin, M.Sc., Ph.D., Dr.rer.nat. Ade Anggraini, Dr. Sudarmaji, Dr.rer.nat. Mochamad Nukman, Dr. Eddy Hartantyo, Dr. rer. nat. Herlan Darmawan, M.Sc., Dr. Afif Rakhman, Idham Syah Alam, Ph.D., Dr. Theodosius Marwan Irnaka, Dr.rer.nat. Sintia Windhi Niasari, Dr. Chalis Setyadi, Devy Pramudyah Wardani, S.Si., M.Sc., Ibnu Jihad, S.Si., M.Sc., dan Adam Sukma Putra, S.Si., M.Si., Dr. Shidiq Nur Hidayat, Theodorus Permana, Ph.D., Dr.Eng. Wahyu Waskito Aji.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh staf kependidikan di lingkungan FMIPA dan Departemen Fisika atas bantuan yang luar biasa selama ini.

Terima kasih saya peruntukkan kepada kedua orangtua (Alm.) dan kedua mertua (Alm.) beserta kakak-kakak dan adik-adik kandung maupun ipar atas bantuan dan suasana kekeluargaan yang terjalin.

Akhirnya, ungkapan terimakasih dan apresiasi yang mendalam saya curahkan kepada istri, dua putra, dua menantu putri beserta dua cucu atas dukungan dan kepercayaan yang terus terjaga.

Pimpinan sidang, Bapak, Ibu, serta hadirin yang saya hormati,

Saya akhiri pidato ini dengan mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada Bapak/Ibu yang telah meluangkan waktu untuk hadir dan dengan penuh kesabaran mengikuti pidato ini. Saya memohon maaf apabila terdapat kekurangan atau kesalahan dalam penyampaian pidato ini. Semoga Allah SWT selalu memberikan rahmat dan hidayah kepada kita semua. Aamiin ya Robbal 'Alamiin

Ungkapan Penghargaan

Dengan tersusunnya dokumen ini, saya menyampaikan penghargaan kepada Istri beserta Anak yang telah memberikan masukan dan *second opinion* atas isi dokumen pada saat awal penyusunan. Penghargaan juga saya sampaikan kepada Donald Knuth, Leslie Lamport dan Till Tantau, beserta penggiat *open source* lainnya yang berinisiatif mengembangkan perangkat penyunting dokumen $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ dan TikZ sehingga dokumen pidato pengukuhan ini dapat terwujud (Knuth, 2006; Kottwitz, 2023; Lamport, 2009).

Pustaka

- Abramowitz, M., dan Stegun, I., A., 1967, "Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, report", November 1967; Washington D.C.
- Bomantara, R. W., dan Gong, J., 2018a, "Simulation of non-abelian braiding in majorana time crystals", *Physical Review Letters*, 120(23), 230405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.230405>
- Bomantara, R. W., dan Gong, J., 2018b, "Quantum computation via Floquet topological edge modes", *Physical Review B*, 98(16), 165421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.165421>
- Bomantara, R. W., dan Gong, J., 2020, "Measurement-only quantum computation with Floquet Majorana corner modes", *Physical Review B*, 101(8), 085401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.085401>
- Bomantara, R. W., 2021, "Quantum repetition codes as building blocks of large-period discrete time crystals", *Physical Review B*, 104(18), L180304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.L180304>
- Bomantara, R. W., 2025, "Quantum vacuum protected topological edge polaritons", *Physical Review B*, 111(7), 075429. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.111.075429>

- Beiser, A., 1987, "Concepts of modern physics", (4th ed.). McGraw-Hill
- Balandin, M., P., Grebenyuk, V., M., Zinov, V., G.; Konin, A., D., Ponomarev, A., N., 1974, "Measurement of the lifetime of the positive muon", Soviet Physics JETP. 40: 811. Bibcode:1975JETP.40.811B
- Cheng, Z., Bomantara, R. W., Xue, H., Zhu, W., Gong, J., dan Zhang, B., 2022, "Observation of $\pi/2$ modes in an acoustic floquet system", Physical Review Letters, 129(25), 254301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.254301>
- Chen, T., Shen, R., Lee, C. H., Yang, B., dan Bomantara, R. W., 2023, "A robust large-period discrete time crystal and its signature in a digital quantum computer", arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2309.11560>
- Christie, A., 2008, "Curtain: Poirot's last case", Harper, London
- Castelvecchi, D., 2017, "IBM's quantum cloud computer goes commercial". Nature, 543, 159. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.21585>
- Deutsch, D., 1985, "Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer", Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 400(1818), 97–117
- Davisson, C., Germer, L., H., 1927, "Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel", Physical Review. 30 (6): 705–740. Bibcode:1927PhRv.30.705D. doi:10.1103/physrev.30.705. ISSN 0031-899X
- Einstein, A., 1905, "On a Heuristic Viewpoint Concerning the Emission and Transformation of Light", Annalen der Physik 17
- Feynman, R. P., 1982, "Simulating physics with computers", International journal of theoretical physics, 21(6), 467–488

- Feynman, R. P. dan Wilczek, F. , 2017, "The character of physical law", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- Frisch, D., H., dan Smith, J., H.. 1963, "Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ Mesons", American Journal of Physics. 31 (5): 342–355. Bibcode:1963AmJPh..31..342F. doi:10.1119/1.1969508
- Grover, L.K., 1996, "A Fast quantum mechanical algorithm for database search", in Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (pp.212–219). STOC
- Georgiev, D., dan Cohen, E., 2022, "Entanglement measures for two-particle quantum histories", Physical Review A. 106 (6): 062437. arXiv:2212.07502. Bibcode:2022PhRvA.106f2437G. doi:10.1103/PhysRevA.106.062437. S2CID 254685902
- Hundt, R., 2022, "Quantum computing for programmers (1st ed.)", Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009099974>
- Heisenberg, W., 1927, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", Zeitschrift für Physik (in German). 43 (3): 172–198. Bibcode:1927ZPhy.43.172H. doi:10.1007/BF01397280. ISSN 0044-3328. S2CID 122763326
- Ivankov, A., 2018, "Difference Between Theoretical Physics and Experimental Physics", <https://www.profolus.com/topics/difference-between-theoretical-physics-and-experimental-physics/> Accessed: 2025-05-16
- Illingworth, V., (Ed.) 1991, "The Penguin Dictionary of Physics", Penguin Books, London.
- Jones, R. C., Keene, M. N., dan Nurwantoro, P., 1998, "Variational calculations of sheath-state nucleation in isotropic type II superconductors", Physica C: Superconductivity, 298(1–2), 140–158. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(97\)01817-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(97)01817-0)

- Josephson, B., D., 1962, "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Physics Letters*. 1 (7): 251–253. Bibcode:1962PhL1,251J. doi:10.1016/0031-9163(62)91369-0
- Josephson, B., D., 1974, "The discovery of tunnelling supercurrents", *Reviews of Modern Physics*. 46 (2): 251–254. Bibcode:1974RvMP...46..251J. doi:10.1103/RevModPhys.46.251. S2CID 54748764
- Kolesnikow, X. C., Bomantara, R. W., Doherty, A. C., dan Grimsomo, A. L., 2024, "Gottesman-kitaev-preskill state preparation using periodic driving", *Physical Review Letters*, 132(13), 130605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.130605>
- Kottwitz, S., 2023, " $\text{\LaTeX}$ Graphics with TikZ: A Practitioner's Guide to Drawing 2D and 3D Images, Diagrams, Charts, and Plots", Packt Publishing, Limited, Birmingham
- <https://kbbi.portal.id/sinonim-alamiah/> Diakses 23 Mei 2025
- Knuth, D. E., 2006, "The $\text{\TeX}$ book", Addison Wesley, Reading, Mass., Nachdr.
- Knight, R., D., 2004, "Physics for Scientists and Engineers With Modern Physics: A Strategic Approach", Pearson-Addison-Wesley, p. 1224, ISBN 0-8053-8685-8
- Lamport, L., 2009, " $\text{\LaTeX}$: a document preparation system; user's guide and reference manual; [updated for $\text{\LaTeX}$ 2e]", Addison-Wesley, Boston Munich, 2. ed., 24.
- Lide, D., R., 2006, "editor. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 88th edition", Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group, see p. 10–203
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., W., Rosenbluth, M., N., Teller, A., H., dan Teller, E., 1953, "Equation of state calculations by fast computing machines", *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>

- Merzbacher, E., 2002, "The Early History of Quantum Tunneling", *Physics Today*. 55 (8): 44–49. Bibcode:2002PhT.55h..44M. doi:10.1063/1.1510281
- Main, D., Drmota, P., Nadlinger, D., P., Ainley, E., M., Agrawal, A., Nichol, B., C., Srinivas, R., Araneda, G., dan Lucas, D., M. (2025), "Distributed quantum computing across an optical network link", *Nature*, 638(8050), 383–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08404-x>
- Nurwantoro, P., Bomantara, R. W., dan Gong, J., 2019, "Discrete time crystals in many-body quantum chaos", *Physical Review B*, 100(21), 214311. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.214311>
- Nurwantoro, P., Bomantara, R. W., dan Utomo, A., B., S., 2025, "Piecewise Hamiltonian based Computation for Schrodinger Equation Solution" (in preparation)
- Nurwantoro, P., 2025, "Higher Order Computation for Time Evolution Operator" (in preparation)
- Ossiander, M., Riemensberger, J., Neppl, S., Mittermair, M., Schäffer, M., Duensing, A., Wagner, M., S., Heider, R., Wurzer, M., Gerl, M., Schnitzenbaumer, M., Barth, J. V., Libisch, F., Lemell, C., Burgdörfer, J., Feulner, P., dan Kienberger, R., 2018, "Absolute timing of the photoelectric effect", *Nature*, 561(7723), 374–377. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0503-6>
- Prugovecki, E., 1981, "Quantum mechanics in Hilbert space (2nd ed.)", Dover (published 2006), ISBN 978-0-486-45327-9
- Rohlf, J., W., 1994, "Modern Physics from a to z", Wiley 1994
- Shor, P.W., 1994, "Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring", In *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science* (pp.124-134). IEEE.

- Straumann, N., 2004, "The Role of the Exclusion Principle for Atoms to Stars: A Historical Account", Invited Talk at the 12th Workshop on Nuclear Astrophysics: 184–196. arXiv:quant-ph/0403199. Bibcode:2004quant.ph..3199S. CiteSeerX 10.1.1.251.9585
- Sansonetti, J., E., dan Martin W., C., 2005, "Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data", Journal Of Physical And Chemical Reference Data, volume 34, number 4, pp. 1559–2259. doi:10.1063/1.1800011, see p. 1816
- Sakthivadivel, D., A., R., 2022, "Magnetisation and Mean Field Theory in the Ising Model", SciPost Physics Lecture Notes. 35: 1–16. arXiv:2102.00960. doi:10.21468/SciPostPhysLectNotes.35. S2CID 237623181
- Sakurai, J., J., dan Napolitano, J., 1977, "Modern Quantum Mechanics, 2nd", Addison Wesley, 1994
- Suzuki, M., 1985, "Decomposition formulas of exponential operators and Lie exponentials with some applications to quantum mechanics and statistical physics", Journal of Mathematical Physics. 26 (4): 601–612. Bibcode:1985JMP.26.601S. doi:10.1063/1.526596
- Titelman, G., 1996, "Random House Dictionary of Popular Proverbs and Sayings", Random House Reference. p. 119. ISBN 0-679-44554-4
- Thomson, G., P., 1927, "Diffraction of Cathode Rays by a Thin Film", Nature. 119 (3007): 890. Bibcode:1927Natur.119Q.890T. doi:10.1038/119890a0. S2CID 4122313
- Walker, J., Halliday, D., dan Resnick, R., 2014, "Fundamentals of physics, (Tenth edition ", (Online-Ausg.)). Wiley