

Melengkapi Bagian 2.15: Asumsi-Asumsi Dasar Mekanika Klasik

Kalimat yang terpotong, “Pertama, sistem memiliki keadaan yang dapat dinyatakan ...”, berada pada bagian penutup Bab 2. Setelah bab ini membahas keadaan, lintasan, gaya, energi, momentum, ruang fase, determinisme, probabilitas, observable, dan pengukuran, bagian 2.15 tampaknya dimaksudkan sebagai rangkuman: apa saja asumsi klasik yang perlu kita sadari sebelum masuk ke mekanika kuantum.

Kelanjutan yang paling alami adalah bahwa, dalam mekanika klasik, sistem dianggap memiliki keadaan yang dapat dinyatakan oleh nilai-nilai besaran fisis tertentu. Untuk partikel Newtonian biasa, keadaan itu dinyatakan oleh posisi dan momentum. Jika sistem terdiri dari satu partikel dalam tiga dimensi, keadaan klasiknya dapat ditulis sebagai

$$(x, y, z, p_x, p_y, p_z).$$

Artinya, pada suatu saat, partikel dianggap memiliki posisi tertentu dan momentum tertentu. Jika kita mengetahui keenam bilangan itu, serta hukum gaya atau Hamiltonian yang mengatur sistem, maka teori klasik memberi aturan untuk menentukan perubahan keadaan dari waktu ke waktu.

Keadaan klasik sebagai daftar nilai

Gagasan ini sederhana tetapi sangat penting. Dalam mekanika klasik, keadaan bukan hanya catatan hasil pengukuran. Keadaan adalah apa yang dianggap dimiliki sistem secara objektif dalam model teorinya. Sebuah planet tetap memiliki posisi dan momentum tertentu meskipun tidak sedang diamati. Sebuah bola tetap berada di titik tertentu pada lintasannya meskipun kamera tidak merekamnya. Pengukuran ideal hanya membaca nilai-nilai itu.

Dalam formulasi Hamiltonian, pernyataan ini menjadi lebih rapi. Jika koordinat umum sistem ditulis q dan momentumnya ditulis p , maka keadaan sistem adalah titik di ruang fase. Untuk satu derajat kebebasan, ruang fase memiliki dua koordinat, yaitu (q, p) . Untuk banyak derajat kebebasan, keadaan ditulis

$$(q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n).$$

Hamiltonian $H(q, p, t)$ kemudian menentukan evolusi keadaan melalui persamaan Hamilton

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}.$$

Di sini \dot{q}_i berarti laju perubahan q_i terhadap waktu, dan \dot{p}_i berarti laju perubahan p_i . Struktur ini adalah salah satu alasan mengapa mekanika Hamiltonian menjadi jembatan penting menuju mekanika kuantum, meskipun dalam kuantum “keadaan” tidak lagi berupa titik biasa di ruang fase [Goldstein, Poole, & Safko 2002; Arnold 1989].

Namun perlu hati-hati: tidak semua sistem klasik sesederhana “satu partikel dengan enam bilangan”. Sistem dengan kendala, benda tegar, fluida, atau medan klasik membutuhkan koordinat yang lebih umum. Medan elektromagnetik klasik, misalnya, tidak dideskripsikan oleh posisi satu partikel, melainkan oleh nilai medan di setiap titik ruang. Jadi pernyataan yang aman adalah: mekanika klasik menganggap sistem memiliki keadaan tertentu, dan keadaan itu dapat direpresentasikan oleh nilai-nilai variabel klasik yang sesuai dengan sistem tersebut.

Lintasan dan determinisme

Asumsi kedua adalah bahwa keadaan berubah menurut hukum gerak tertentu. Dalam banyak kasus klasik, jika keadaan awal diketahui secara tepat, maka keadaan masa depan ditentukan. Inilah makna determinisme klasik dalam bentuk idealnya.

Misalnya, untuk partikel bermassa m di bawah gaya F , hukum Newton memberi

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}.$$

Jika posisi awal $\mathbf{x}(0)$ dan kecepatan awal $\mathbf{v}(0)$ diketahui, maka persamaan gerak menentukan lintasan $\mathbf{x}(t)$, setidaknya selama persamaan itu memiliki solusi yang baik. Dalam bahasa klasik, partikel tidak hanya “mungkin” melalui lintasan tertentu; model mengatakan bahwa partikel memang memiliki lintasan tertentu.

Tetapi determinisme klasik tidak sama dengan kemampuan praktis untuk meramal secara sempurna. Sistem kacau, seperti cuaca atau tiga benda yang saling tarik-menarik secara gravitasi, dapat sangat peka terhadap kondisi awal. Perbedaan awal yang sangat kecil dapat tumbuh menjadi perbedaan besar. Ini disebut chaos klasik. Chaos tidak berarti hukum geraknya acak; ia berarti prediksi jangka panjang menjadi sulit karena kondisi awal tidak pernah diketahui dengan ketelitian tak terbatas [Taylor 2005].

Ada juga batas matematis yang perlu disebutkan. Determinisme biasanya memerlukan gaya atau persamaan gerak yang cukup “baik” secara matematis agar solusi ada dan unik. Untuk gaya yang singular atau tidak memenuhi syarat kehalusan tertentu, persoalan dapat menjadi lebih halus. Jadi, sebagai ringkasan untuk bab pengantar, determinisme klasik adalah asumsi yang sangat berguna, tetapi secara matematis ia selalu bergantung pada bentuk hukum gerak yang dipakai.

Observable klasik sebagai fungsi keadaan

Asumsi ketiga adalah bahwa besaran yang dapat diukur, atau observable, mempunyai nilai yang ditentukan oleh keadaan. Jika keadaan satu partikel satu dimensi adalah (x,p) , maka energi total dalam potensial $V(x)$ adalah

$$E(x, p) = \frac{p^2}{2m} + V(x).$$

Begitu x dan p diketahui, nilai E juga diketahui. Dengan cara yang sama, momentum sudut, energi kinetik, dan banyak besaran lain dapat dipandang sebagai fungsi pada ruang fase.

Inilah titik yang nanti berlawanan tajam dengan mekanika kuantum. Dalam teori kuantum, observable direpresentasikan oleh operator, dan tidak semua observable memiliki nilai pasti sekaligus dalam satu keadaan. Posisi dan momentum, misalnya, diwakili oleh operator yang tidak komutatif. Hubungan tak komutatif ini menjadi akar matematis prinsip ketidakpastian Heisenberg. Tetapi pada akhir Bab 2, yang penting bukan membahas kuantum secara lengkap, melainkan membuat gambaran klasik cukup jelas: dalam mekanika klasik, nilai observable dianggap sudah ada sebelum pengukuran ideal dilakukan.

Probabilitas klasik sebagai ketidaktahuan

Asumsi keempat adalah bahwa probabilitas dalam mekanika klasik biasanya mencerminkan ketidaktahuan kita, bukan ketidakpastian mendasar dalam keadaan sistem. Ketika kita berkata peluang dadu menunjukkan angka enam adalah $1/6$, kita tidak biasanya membayangkan bahwa dadu tidak memiliki lintasan tertentu. Dalam gambaran klasik, dadu memiliki posisi, orientasi, kecepatan, momentum sudut, gaya kontak, dan tumbukan tertentu. Kita memakai probabilitas karena informasi rinci itu terlalu rumit atau tidak tersedia.

Hal yang sama terjadi dalam mekanika statistik klasik. Gas dalam sebuah kotak mengandung jumlah molekul yang sangat besar. Secara klasik, setiap molekul dianggap memiliki posisi dan momentum tertentu. Tetapi karena mustahil melacak semua molekul secara praktis, kita memakai distribusi probabilitas pada ruang fase. Ini menjadi dasar mekanika statistik klasik [Pathria & Beale 2011].

Perbedaan dengan mekanika kuantum harus dinyatakan dengan hati-hati. Dalam praktik standar mekanika kuantum, fungsi gelombang tidak dipakai sekadar sebagai daftar tersembunyi posisi dan momentum pasti yang belum kita ketahui. Aturan Born menghubungkan kuadrat modulus amplitudo dengan probabilitas hasil pengukuran [Born 1926]. Namun persoalan interpretasi kuantum memiliki sejarah panjang dan tidak semua interpretasi menggunakan bahasa filsafat yang sama. Untuk keperluan buku pengantar ini, cukup dikatakan bahwa probabilitas kuantum tidak dapat disamakan begitu saja dengan probabilitas klasik akibat ketidaktahuan biasa.

Pengukuran klasik sebagai pembacaan nilai

Asumsi kelima adalah bahwa pengukuran ideal dapat dianggap membaca nilai yang sudah dimiliki sistem. Dalam praktik, setiap alat ukur berinteraksi dengan sistem. Kamera memerlukan cahaya, termometer bertukar energi dengan benda, sensor kecepatan memerlukan kontak atau sinyal. Tetapi mekanika klasik memungkinkan kita membayangkan batas ideal di mana gangguan pengukuran dibuat sangat kecil sehingga tidak mengubah konsep dasar: benda sudah memiliki posisi, kecepatan, energi, atau suhu tertentu sebelum diukur.

Asumsi ini bekerja sangat baik untuk banyak benda makroskopik. Bola tenis tidak kehilangan makna lintasannya hanya karena kita memotretnya. Mobil tetap memiliki kecepatan meskipun sensor tidak sempurna. Planet tetap bergerak pada orbit tertentu meskipun teleskop memiliki batas resolusi.

Dalam mekanika kuantum, gambaran ini tidak dapat dipakai secara umum. Pengukuran bukan hanya proses pasif yang mengungkap semua nilai yang sudah pasti. Misalnya, pengukuran posisi yang sangat tajam dapat mengubah keadaan momentum. Ini bukan semata-mata karena alat ukur kasar, melainkan karena struktur teori kuantum sendiri.

Usulan kelanjutan teks 2.15

Dengan mempertahankan gaya parent document, bagian 2.15 dapat dilanjutkan kira-kira sebagai berikut:

Pertama, sistem memiliki keadaan yang dapat dinyatakan oleh nilai-nilai besaran klasik. Untuk partikel Newtonian, keadaan itu biasanya berupa posisi dan momentum. Untuk satu partikel dalam tiga dimensi, keadaan dapat ditulis sebagai (x, y, z, p_x, p_y, p_z) . Untuk sistem yang lebih rumit, daftar variabelnya dapat berubah, tetapi gagasan dasarnya sama: sistem dianggap memiliki keadaan tertentu.

Kedua, keadaan berubah menurut hukum gerak. Dalam mekanika Newton, hukum itu dinyatakan melalui gaya dan percepatan. Dalam mekanika Hamilton, hukum itu dinyatakan melalui Hamiltonian dan persamaan Hamilton. Jika keadaan awal dan hukum gerak diketahui, keadaan berikutnya dapat dihitung, setidaknya dalam idealisasi matematis yang sesuai.

Ketiga, mekanika klasik menganggap sistem memiliki lintasan. Partikel tidak hanya memiliki posisi saat diukur, tetapi posisi tertentu pada setiap saat. Lintasan adalah riwayat posisi itu terhadap waktu. Inilah gambaran yang sangat kuat dalam fisika klasik, tetapi tidak dapat langsung dipindahkan ke mekanika kuantum.

Keempat, observable klasik adalah fungsi dari keadaan. Jika keadaan diketahui, maka posisi, momentum, energi, dan besaran lain yang bergantung pada keadaan juga memiliki nilai tertentu. Pengukuran ideal membaca nilai tersebut.

Kelima, probabilitas klasik biasanya muncul karena keterbatasan pengetahuan atau keterbatasan praktis dalam menghitung. Dalam gas, dadu, atau sistem kacau, kita sering memakai probabilitas karena tidak mengetahui semua rincian keadaan awal. Tetapi dalam gambaran klasik, rincian itu tetap dianggap ada.

Keenam, pengukuran klasik dapat diidealkan sebagai proses yang tidak mengganggu sistem secara mendasar. Gangguan pengukuran mungkin ada, tetapi dianggap dapat diperkecil. Ini berbeda dari mekanika kuantum, di mana hubungan antara keadaan, observable, dan pengukuran berubah secara mendalam.

Maka, titik berangkat klasik dapat diringkas seperti ini: dunia klasik adalah dunia keadaan pasti, lintasan pasti, dan observable yang nilainya ditentukan oleh keadaan. Mekanika kuantum tidak membuang semua keberhasilan mekanika klasik, tetapi ia mengubah makna beberapa konsep dasarnya. Karena itu, ketika memasuki bab-bab berikutnya, kita harus berhati-hati: kata-kata seperti “keadaan”, “momentum”, “energi”, dan “pengukuran” masih dipakai, tetapi struktur teorinya tidak lagi sama.

References

Arnold, V. I. (1989). *Mathematical Methods of Classical Mechanics* (2nd ed.). Springer.

Born, M. (1926). "Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge." *Zeitschrift für Physik*, 37, 863–867. <https://doi.org/10.1007/BF01397477>

Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. (2002). *Classical Mechanics* (3rd ed.). Addison-Wesley.

Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman. University of California Press. Original work published 1687.

Pathria, R. K., & Beale, P. D. (2011). *Statistical Mechanics* (3rd ed.). Academic Press.

Taylor, J. R. (2005). *Classical Mechanics*. University Science Books.

Document information

(selanjutnya >>)

Project	Mekanika Kuantum dari Prinsip Pertama
Document	Document 1.6.1
Author	mujirin
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 19:33 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum-dari-prinsip-pertama/documents/selanjutnya/