

## MODUL-3: Dari Mekanika Klasik ke Mekanika Relativistik dan Mekanika Kwantum

### 1. Pendahuluan

Kekaguman Einstein terhadap ketertiban alam diperoleh lewat telaahannya, sehingga sering kali ia mengatakan bahwa "*Tuhan tidak bermain dadu (tidak spekulatif) dengan alam semesta ini*". Tetapi ketertiban tersebut diperoleh setelah sekian lama melalui perenungan dan diskusi yang panjang terkadang melelahkan. Betapa tidak, dalam pandangan Stephen Hawking, umat manusia tepatnya mulai dari abad ke-17, yaitu Galileo merintis penelaahan secara fisis dan intuitif tentang alam semesta, bahkan Hawking menyebutkan bahwa pemikiran deduktif Galileo masih merupakan pegangan bagi ilmuwan di abad ke-20. Teori gravitasi yang dikembangkan oleh Hawking berpijak pada hasil pemikiran deduktif Galileo. Setelah Galileo, Sir Isaac Newton berjasa dalam mengoreksi, mendefinisikan ulang, dan melakukan berbagai penyesuaian terhadap penjelasan sebelumnya. Kemudian Einstein melanjutkan pemikiran Newton dengan pengujian, perbaikan dan perluasan hukum-hukum dasarnya tentang gerak dengan melibatkan alam semesta secara keseluruhan dalam pembahasan relativitas khusus dan umum. Barulah kemudian Hawking dengan para kosmologis lainnya dapat menghasilkan penjelasan modern tentang gravitasi dan beberapa gaya interaksi lainnya yang menjadi perhatian para kosmologis.

### 2. Benang Merah antara Mekanika Klasik dan Mekanika Relativistik

Postulat yang terpenting dalam teori relativitas Einstein adalah bahwa kecepatan cahaya itu bersifat absolut (mutlak) tidak bergantung dari mana ia dilihat dan dari mana ia terpancar: apakah dari kerangka acuan yang ini atau itu yang keduanya memiliki gerak relatif. Sehingga berakibat pada konsep ruang-waktu yang relatif dan konsep massa-energi yang saling dapat dipertukarkan. Dengan begitu maka kata tanya '*kapan ? dan di mana ?*' harus menyatu menjadi satu kata tanya misalnya dengan kata '*mana ?*' dalam kordinat ruang-waktu (4 dimensi) karena keduanya terkait. Seperti halnya pemetaan secara geografis (meruang) dapat dipadukan dengan fakta historis dan citra futuris (mewaktu). Dalam tinjauan ruang Minkowski antara koordinat ruang-waktu 4-dimensi dalam kerangka bergerak dan dalam kerangka diam memiliki sifat simetri, seperti ditunjukkan oleh:

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - ct^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - ct'^2 \dots\dots\dots(01)$$

Bahwa kerangka tinjauan boleh berbeda, tetapi struktur pemikiran yang diungkapkan dalam formula tidak ada perbedaan. Di sisi lain, keberadaan massa (materi) memerlukan ruang, menyebar tumpah ruah mengisi ruang, dan dapat pula meluruh dengan waktu membebaskan energi seperti zat radioaktif, sehingga materi dapat pula menjadi sumber energi atau sebaliknya. Postulat itu secara matematis ditulis seperti berikut:

$$c = \frac{x}{t} = \frac{x^*}{t^*} = \frac{\text{Jarak}}{\text{waktu}}; \quad c = \sqrt{\frac{E}{m}} = \sqrt{\frac{E^*}{m^*}} = \sqrt{\frac{\text{Energi}}{\text{massa}}} \dots\dots\dots(02)$$

Hawking dan Penrose sependapat dengan Einstein bahwa posisi-posisi (titik-titik) dalam peta cakrawala ruang-waktu satu sama lain saling memiliki keterkaitan. Dengan kata lain, dua peristiwa dapat terhubung satu sama lain melalui komunikasi cahaya atau dengan sinyal yang memiliki kecepatan sedikit di bawah kecepatan cahaya. Peristiwa dulu di situ dengan peristiwa kini di sini satu sama lain terhubung. Jarak antara di situ dan di sini, dan kurun antara dulu dan kini, menyatu dalam suatu metrik lintasan berdimensi empat. Kesatupaduan ukuran jarak-kurun dalam cakrawala ruang-waktu diakui oleh Friedman (1922), setelah menyelesaikan persamaan Einstein, sebagai sesuatu yang memiliki sifat mengembang (*expanding universe*). Bahkan grup lainnya dari Rusia (1963) sampai kepada pendapat yang menyatakan bahwa alam semesta ini tidak hanya berkembang tetapi juga menyusut (alam semesta yang kembang-kempis) paling tidak pada saat-saat permulaan. Hawking dan Penrose lebih mementingkan awal kejadiannya, yaitu bahwa alam semesta ini berasal dari suatu titik ketiadaan/kelenyapan (singularitas). Tidak hanya energi dan materi, tetapi juga ruang dan waktu semuanya memiliki permulaan dari suatu titik yang sama. Transformasi Lorentz berperan sebagai jembatan telusur antara kerangka diam dan bergerak.

Sebagai gambaran tentang hubungan relativistik melalui transformasi Lorentz antara kerangka ruang-waktu  $K$  dan  $K'$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  terhadap  $K$  adalah seperti berikut:

$$\begin{aligned} x' &= g(v) (x - vt); \quad y' = y; \quad z' = z; \\ t' &= g(v) (t - vx/c^2); \quad \dots\dots\dots(03) \\ g(v) &= 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \end{aligned}$$

Selanjutnya antara kerangka ruang-waktu  $K'$  dan  $K''$  yang bergerak dengan kecepatan  $w$  terhadap  $K'$  akan memiliki bentuk serupa dengan bentuk sebelumnya, yaitu:

$$\begin{aligned} x'' &= g(w) (x' - wt'); \quad y'' = y'; \quad z'' = z'; \\ t'' &= g(w) (t' - wx'/c^2); \quad \dots\dots\dots(04) \\ g(w) &= 1/\sqrt{1 - w^2/c^2} \end{aligned}$$

Apabila kemudian dicari juga hubungan relativistik antara kerangka ruang-waktu  $K$  dan  $K''$  yang bergerak dengan kecepatan  $u$  yang sudah barang tentu akan bergantung pada kecepatan  $v$  dan  $w$ , ternyata juga bentuk serupa akan diperoleh seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 x'' &= g(u)(x-ut); y'' = y; z'' = z; \\
 t'' &= g(u)(t - ux/c^2) \\
 g(u) &= 1/\sqrt{1 - u^2/c^2} \dots\dots\dots(05) \\
 u &= \frac{v + w}{1 + vw/c^2}
 \end{aligned}$$

Pada bentuk terakhir diperoleh penjumlahan kecepatan antara  $v$  dan  $w$  menjadi  $u$ . Ketika nilai perkalian antara  $v$  dan  $w$  sangat kecil dibandingkan dengan nilai  $c^2$ , maka penjumlahan kecepatan akan kembali ke bentuk mekanika klasik (Newton). Sebagai contoh perhitungan praktis diberikan pada Tabel-1 dengan menyandingkan padanannya dalam mekanika klasik (Newton). Implikasi dari transformasi Lorentz dalam perumusan kuantitas mekanika lainnya, seperti gaya, momentum dan energi dapat ditelusuri pada Tabel-2.

Tabel-1 Komparasi penentuan jarak apabila besar gaya aksi diketahui.

MEKANIKA NEWTON	MEKANIKA RELATIVISTIK
Gaya: $m_0 \frac{du(t)}{dt} = F$ $m_0 u(t) = Ft$	Gaya: $m_0 \frac{d}{dt} \left( \frac{u(t)}{\sqrt{1 - u(t)^2/c^2}} \right) = F$ $\frac{m_0 u(t)}{\sqrt{1 - u(t)^2/c^2}} = Ft$
Kecepatan: $u(t) = \frac{F}{m_0} t$	Kecepatan: $u(t) = \frac{c Ft}{\sqrt{m_0^2 c^2 + F^2 t^2}}$
Posisi: $x(t) = \frac{1}{2} \frac{F}{m_0} t^2$	Posisi: $x(t) = \frac{c}{F} \sqrt{m_0^2 c^2 + F^2 t^2} - \frac{m_0 c^2}{F}$

Dengan menggunakan persamaan (03) dapat diturunkan kecepatan untuk arah  $x'$ ,  $y'$ , dan  $z'$  dalam kerangka  $K'$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  terhadap kerangka  $K$ , yaitu:

$$u'_x(t') = \frac{dx'(t')}{dt'} = g(v) \frac{d}{dt'}(x(t) - vt) = g(v) (u_x(t) - v) \frac{dt}{dt'} \dots\dots\dots(06)$$

masih dari persamaan (03) yang menyangkut transformasi tentang waktu, akan diperoleh bahwa:

Tabel-2 Komparasi kesepadanan formula mekanika Newton (klasik) dan relativistik

MEKANIKA NEWTON	MEKANIKA RELATIVISTIK
<p>Dekomposisi kwadrat kecepatan dalam 3-dimensi:</p> $u(t)^2 = u_x(t)^2 + u_y(t)^2 + u_z(t)^2$ $g(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}}$ <p>Hubungan waktu dalam kerangka diam dan bergerak:</p> $dt = g(t) dt$	<p>Decomposisi kwadrat kecepatan dalam 4-dimensi:</p> $w_j(t)^2 = \frac{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 - c^2}{1 - u^2 / c^2} = -c^2$ <p><math>j = 1, 2, 3, 4</math>, dan <math>w_j</math> masing-masing adalah:</p> $w_1(t) = g(t)u_x(t); w_2(t) = g(t)u_y(t);$ $w_3(t) = g(t)u_z(t); w_4(t) = ig(t)c$
<p>Gaya:</p> $F_j(t) = m_0 \frac{du_j(t)}{dt}; j = x, y, z$	<p>Gaya:</p> $f_j(t) = m_0 \frac{dw_j(t)}{dt}; j = 1, 2, 3, 4$
<p>Turunan kwadrat kecepatan terhadap waktu:</p> $u_j(t) \frac{du_j(t)}{dt} = u_j(t) \frac{F_j(t)}{m_0}$ <p>Besaran ini merupakan daya persatuan massa atau laju perubahan kerja per satuan waktu per satuan massa:</p> $\frac{1}{m_0} \frac{dW}{dt} = \frac{1}{m_0} u_j(t) F_j(t)$	<p>Turunan kwadrat kecepatan terhadap waktu:</p> $w_j \frac{dw_j}{dt} = 0;$ $w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4 = 0$ $f_4(t) = \frac{i}{c} \frac{F_j(t) u_j(t)}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}}$ $f_j(t) = \frac{F_j(t)}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}}; j = 1, 2, 3$
<p>Daya:</p> $\frac{d\left(\frac{1}{2} m_0 u_j(t) u_j(t)\right)}{dt} = u_j(t) F_j(t)$	<p>Daya:</p> $\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}} \right) = u_j(t) F_j(t)$
<p>Energi kinetik dan momentum:</p> $T = \frac{1}{2} m_0 u_j(t) u_j(t); p_j = m_0 u_j(t)$ $T = \frac{p_j(t) p_j(t)}{2m_0}$	<p>Energi kinetik dan momentum:</p> $T = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}}; p_j = \frac{m_0 u_j(t)}{\sqrt{1 - u(t)^2 / c^2}}$ $T = c \sqrt{p_j(t) p_j(t) + m_0^2 c^2}$

$$\frac{dt}{dt'} = \gamma(v) \left( 1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'(t')}{dt'} \right) = \gamma(v) \left( 1 + \frac{v u'_x(t')}{c^2} \right) \dots \dots \dots (07)$$

Dengan menggunakan persamaan (07) ke dalam persamaan (06), akan diperoleh:

$$u'_x(t') = \gamma(v)^2 (u_x(t) - v) \left( 1 + \frac{v u'_x(t')}{c^2} \right) \rightarrow u'_x(t') = \frac{u_x(t) - v}{1 - v u_x(t)/c^2} \dots \dots \dots (08)$$

Melalui cara yang sama kecepatan dalam kerangka bergerak untuk arah y dan z, masing-masing dapat diturunkan menjadi:

$$u'_y(t') = \frac{u_y(t)}{\gamma(v) (1 - v u_x(t)/c^2)}; \quad u'_z(t') = \frac{u_z(t)}{\gamma(v) (1 - v u_x(t)/c^2)} \dots \dots \dots (09)$$

### 3. Memperkenalkan Konsep Mekanika Kwantum

Mekanika kuantum mengkaji dunia misteri menurut skala kemampuan deteksi mata, tetapi interaksi manusia dengan dunia misteri tersebut semakin akrab seperti pengembangan model atom dan inti atom, perilaku kelistrikan & kemagnetan, dan aneka gejala mikroskopik lainnya. Dalam pendekatan kependidikan, mekanika kuantum merupakan matakuliah lanjutan dari fisika kuantum. Bagi mahasiswa fisika, matakuliah ini merupakan syarat perlu yang harus diambil mengingat perannya sebagai ilmu dasar yang mempelajari gejala dan sifat sistem pada skala mikroskopik yang berada di luar jangkauan pengalaman sehari-hari. Tidak seperti mekanika kuantum, mekanika klasik (Newtonian) kerap kali lebih menarik bagi mahasiswa mengingat gejala dan sifatnya terjangkau oleh pengalaman sehari-hari, bahkan sering muncul dipopulerkan dalam bentuk tayangan *kuiz Galileo* di SCTV. Tetapi akhir-akhir ini diakui bahwa mekanika kuantum telah berhasil menjelaskan gejala kuantum dari sistem makroskopik (bhuana agung) seperti fisika zat padat (*solid state physics*) termasuk di dalamnya zat-zat yang bersifat isolator, semikonduktor, superkonduktor, astrofisika, dan kosmologi, bahkan telah berkembang pula kajian tentang gravitasi kuantum (*Quantum Gravity*). Tidak menutup kemungkinan, pada perkembangan biologi molekuler dan bioteknologi serta aplikasi fisika pada bidang kedokteran mendatang seperti yang telah dialami pada bidang rekayasa (*engineering*), peranan mekanika kuantum akan (mulai) diperlukan.

#### a. Konsep dasar

Dalam bahasan mekanika kuantum, informasi tentang perilaku zarah (zarah) terkumpul dalam atau dapat diperoleh dari apa yang disebut dengan '*fungsi-diri*' (*eigenfunction*). Bentuk *fungsi-diri* suatu zarah berupa fungsi gelombang (sinusoid). Dalam tampilan satu dimensi, fungsi gelombang merambat ke kanan, sedangkan pasangannya merambat ke kiri. Dalam tampilan dua dimensi, fungsi gelombang menyebar ke luar, sedangkan pasangannya merasuk ke dalam. Dalam tampilan tiga dimensi, fungsi gelombang memancar ke luar, sedangkan pasangannya menguncup ke dalam. Perkalian antara fungsi gelombang dan pasangannya

menghasilkan nilai probabilitas (peluang) bagi kuantitas posisi (koordinat dalam ruang), kuantitas gerak (momentum linier, sudut, spin atau total), dan kuantitas energi. Sehingga salah satu hasil kajian dari mekanika kuantum adalah mencari nilai rata-rata dari kuantitas fisis (posisi, momentum, dan energi) bagi suatu zarah yang sedang diamati.

Setiap objek pengamatan (*observable quantities: position, momentum, and energy*) dari perilaku suatu zarah memiliki operator yang apabila beroperasi pada fungsi-dirinya, maka akan memberikan informasi tentang kuantitas fisis yang diinginkan operator. Langkah berikutnya adalah mencari nilai rata-rata beserta simpangan pengukurannya (kesalahannya) melalui nilai probabilitas yang diperoleh dari perkalian antara fungsi-diri dan pasangannya. Nilai simpangan ditentukan melalui penghitungan akar kwadrat rata-rata atau '*root mean square*' dalam statistik. Terdapat kenyataan bahwa kesalahan (simpangan) dari hasil pengukuran kuantitas momentum dibatasi oleh kesalahan dalam pengukuran kuantitas posisi. Pernyataan itu bermakna bahwa jika terjadi penyusutan simpangan dalam pengukuran kuantitas gerak akan mengakibatkan pembesaran simpangan dalam pengukuran posisi dan begitu pula sebaliknya. Fenomena ketidak-tentuan ini diungkapkan sebagai prinsip ketidakpastian W. Heisenberg.

#### b. Persamaan pengatur

Kondisi *gerak bebas* suatu zarah dalam suatu ruang memiliki arti bahwa dalam ruang tersebut tidak terdapat pengaruh medan apapun, sehingga energi yang menguasai zarah tersebut adalah hanya energi kinetik dan geraknya memiliki lintasan yang lurus. Ketika gerak suatu zarah telah dipengaruhi oleh suatu medan, maka lintasan geraknya akan (dapat) membelok, menghambur (*scattering*), atau terperangkap menjadi gerak melingkar. Peran mekanika kuantum dalam hal ini berupaya mencari persamaan gerak zarah yang sedang diamati dengan memperhatikan energi potensial dari medan yang mempengaruhinya. Persamaan gerak bagi zarah yang diamati itu dikenal sebagai persamaan Schroedinger.

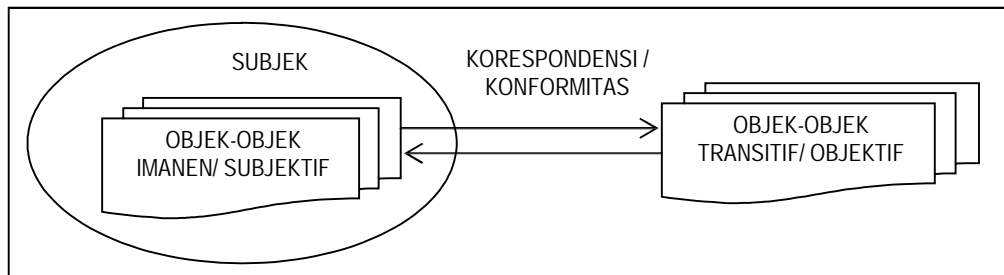
Persamaan Schroedinger diekspresikan dalam bentuk persamaan diferensial paling tidak termasuk ke dalam kategori orde kedua dan bersifat linier. Solusi persamaan Schroedinger adalah *fungsi-diri* dari zarah yang sedang dalam pengamatan. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, dari bentuk *fungsi-diri* itulah berbagai informasi mengenai perilaku gerak zarah dapat diperoleh. Dalam tinjauan energi, bentuk persamaan Schroedinger bagi zarah elektron yang dipengaruhi oleh medan inti atom merupakan proses beroperasinya operator energi total (Hamiltonian) yang menghasilkan *nilai-diri* (*eigen value*) yang berhubungan dengan tingkatan atau aras-aras atau petala-petala tempat elektron mengelilingi inti atom.

#### 4. Penutup

R.E. Brennan(1948) mencegah keputus-asaan ilmuwan, dengan menyatakan bahwa begitu banyak hal (objek transitif) di alam ini yang secara terus menerus mengetuk pintu bio-sensoris manusia agar dapat tersimpan dalam arsip objek imanennya. Hubungan subjek dan objek,

apalagi antara objek yang diketahui dan subjek yang mengetahuinya terdapat suatu ikatan yang dengannya, subjek dan objek membentuk suatu realitas dalam tindakan (bio-mekanis) yang menghasilkan suatu pengetahuan. Dalam hubungan tersebut, apabila didasari rasa cinta (kesungguhan) maka akan terlahir suatu pengetahuan yang bermanfaat. Karena hubungan itu, objek transitif dapat mengirim sinyal/pertanda ke lembaga pertimbangan dari unsur kesadaran subjek, apabila terjadi keputusan penerimaan oleh budi/akal subjek, maka terdapat informasi tentang objek transitif tersebut dalam diri subjek.

Gambaran tentang bentuk, ukuran, dan isi objek transitif adalah potret yang akan disimpan dalam memori pemikiran sebagai objek imanen (*immanent*) apabila terdapat keidentikan formatnya, seperti dijelaskan pada Gambar-1. Yang disebut pertama adalah objek eksternal yang berada di luar subjek, sehingga disebut pula sebagai objek objektif. Sedangkan yang kedua adalah objek internal, sehingga disebut pula sebagai objek subjektif. Pengertian subjek tidak lain adalah pikiran yang melaksanakan tindakan pengetahuan, yaitu dengan mengetahui sesuatu. Sementara itu, keberadaan objek mengacu kepada benda atau proposisi yang diketahui oleh subjek. M.H. Yazdi (1992) memberikan gambaran bahwa pikiran itu dirancang untuk berfungsi sebagai *causa efficiens* bagi tindak intensional untuk mengetahui sesuatu, dan objek berfungsi sebagai *causa finalis*. Gagasan tentang objek muncul lebih dulu dalam pikiran subjek sebagai *causa prima*. Sehingga objek transitif muncul secara simultan sebagai *causa prima* dan *causa finalis*.



Gambar-1 Konfigurasi objek imanen dan objek transitif

#### Daftar Pustaka (MODUL-1; MODUL-2; MODUL-3)

1. Bohm, D., (1980), *Wholeness and the implicate order*, Routledge, New York, pp. 82.
2. Boslough, John, (1985), *Stephen Hawking's Universe*, Avon Book, New York, pp. 23-24.
3. Brennan, R.E., (1948), *The Image of His Maker: A study of the nature of man*, (1948), The Bruce Publishing Company, pp.91.
4. Collingwood, R.G., (1945), *The idea of nature*, Oxford Univ. Press, London, pp. 106-109.
5. Jauncey, G.E.M., (1948), *Modern physics*, 3<sup>rd</sup> edition, Van Nostrand, pp. 18-20.
6. Schrodinger, E. (1948), *What is life ?*, Cambridge Univ. Press, 1944, pp. 126-127.
7. Semiawan, C.R., I.M. Putrawan, Th. I. Setiawan, (1988), *Dimensi kreatif dalam filsafat ilmu*, Rosda, Bandung, hal.60-61.
8. Soeparmo, (1984), *Struktur keilmuan dan teori ilmu pengetahuan alam*, 1984, Airlangga Univ. Press.
9. Suparno, P., (1997), *Filsafat konstruktivisme dalam pendidikan*, Kanisius, Yogyakarta, hal. 20-21.
10. Yazdi, M.H., (1992), *Ilmu Hudhuri: Prinsip-prinsip epistemologi dalam filsafat islam*, Mizan, Bdg, pp.101.
11. Taryadi, Alfons, (1988), *Dalam Epistemologi pemecahan masalah*, Gramedia, p. 110

