

## MODUL-2: BASIS DAN JEMBATAN KE ARAH FISIKA KWANTUM

### 1. Pendahuluan: Pengetahuan Sebagai Proses Bentuk dan Kreatif

Pengetahuan dapat dianggap sebagai suatu proses pembentukan (konstruksi) yang menerus sampai dapat menjelaskan gejala-gejala alam dan keberadaan alam itu sendiri. Gagasan yang lama diganti oleh gagasan yang baru apabila yang baru lebih dapat menjelaskan secara lebih mengena, mendalam, dan menyeluruh (meluas jangkauannya) terhadap berbagai gejala lain yang sebelumnya bukan merupakan fokus tinjauan. Seperti halnya yang terjadi dengan gagasan Newton dalam mengungkapkan teori-teorinya yang tidak lain merupakan konstruksi lanjutan dari yang sebelumnya pernah dicapai, misalnya tentang: (1) 'universal science' dengan menggunakan bahasa matematis tidak lain mengembangkan gagasan yang telah dikembangkan oleh Rene Descartes (1596~1650); (2) aturan metodologis (epistemologis) yang dikembangkannya tidak lain menerapkan gagasan Francis Bacon (1561~1626); (3) kosmologi melanjutkan teori yang telah dikerjakan oleh Galileo (1564~1642) dan yang sebelumnya telah diamati oleh Kepler (1571~1630) mengenai konsep 'gaya', dan yang telah dirintis oleh Gilbert (1600) mengenai konsep 'tarik-menarik' magnetis antara dua buah benda; (Collingwood, R.G., 1945: 106~109)

Bagi ilmuwan yang lahir kemudian hanya dapat mengembangkan kemampuannya untuk menghasilkan teori-teori baru apabila telah terdapat hasil-hasil yang sebelumnya telah terdokumentasikan. Pengembaraannya dalam lautan ilmu dapat menggunakan fakta empiris secara induktif, menganalisisnya secara parsial, baru kemudian menyusun teori agar dapat memayungi fakta-fakta parsial yang telah dikumpulkannya. Hasil sintesa ilmuwan itu, digunakan untuk dapat memberikan prediksinya ke masa depan secara deduktif. Tentu saja akibat dari pelingkupan yang menyederhanakan permasalahan, maka prediksinya ke masa depan dapat saja meleset. Kondisi inilah yang dapat menyemangati para pelanjut untuk lebih gencar lagi melakukan kegiatan penelitian ilmiah dengan tidak perlu memaki para pendahulunya sebagai pemberi informasi awal. Terhadap hasil-hasil pemikiran Newton, David Bohm menyatakan bahwa:

*Thus, Newtonian mechanics, thought originally to be of completely universal validity, was eventually found to be valid in a limited domain and only to a limited degree of approximation, Newtonian mechanics had to give way to the theory of relativity (and the quantum theory). ....nevertheless, within the domain of low velocities, the new theory approached the old one as a limiting case. (David Bohm, 1980: 82).*

Telaah terhadap suatu dokumen hasil-hasil penelitian secara kritis akan dipengaruhi oleh kegiatan berpikir penelaah sendiri yang terdiri dari dua modus, yaitu berpikir figuratif dan

operatif. Berpikir figuratif adalah kegiatan imajinasi pada keadaan sesaat dan statis yang mencakup penggunaan persepsi, konsepsi, dan kesadaran penelaah terhadap sesuatu objek atau gejala. Sedangkan berpikir operatif berkaitan dengan transformasi operasi intelektual dari suatu tingkat ke tingkat yang lebih tinggi (Piaget [1970] dalam P. Suparno [1997]). Tampaknya modus yang kedua lebih penting tetapi tidak perlu mengecualikan modus yang pertama, bagi peningkatan kualitas keilmuan dan pengembangan pengetahuan, paling tidak dalam pandangan filsafat konstruktivisme. Menurut von Glaserfeld dan Kitchener (1987) sebagai pihak konstruktivisme yang termuat dalam P. Suparno (1970) bahwa pengetahuan itu: (1) bukan merupakan gambaran dunia realita belaka, tetapi selalu merupakan konstruksi realita melalui kegiatan subjek, (2) terbentuk dari kegiatan subjek berupa skema kognitif, kategori, konsep, dan struktur yang perlu untuk sebuah pengetahuan, (3) dibentuk dalam struktur konsepsi subjek, jika ternyata berlaku dalam masalah-masalah yang dihadapi subjek, maka konsep tersebut ditransformasi menjadi sebuah pengetahuan.

## 2. Inti Gagasan Newton Tentang Gerak: Realita Keseharian

Seperti sebagian di antara para pemikir lainnya, Newton memulai teorinya dengan realitas tentang gerak. Dengan gerak, suatu benda dapat diamati apakah ia bergerak teratur (normal), bergerak cepat atau bergerak lambat. Tampaknya realitas gerak bagi Newton adalah sumber inspirasi utamanya. Suatu benda memiliki kuantitas materi yang disebut sebagai massa diam atau massa inersial atau ukuran kelembaman (ukuran kemalasan). Perkalian antara kuantitas materi (massa) dengan kecepatannya membentuk konsep tentang momentum sebagai suatu kuantitas gerak.

Kuantitas materi bagi Newton merupakan ukuran volume atau banyaknya materi yang terkandung dalam sesuatu yang dinamakan benda, baik yang pejal maupun yang keropos/berongga. Sedangkan kuantitas gerak adalah kesatuan antara kuantitas materi (massa) dan ukuran geraknya, yaitu kecepatannya, sehingga perumusan momentum ( $p=mv$ ) merupakan perkalian antara massa ( $m$ ) dan kecepatannya ( $v$ ). Gerakan sebuah apel yang jatuh (bergerak mendekati permukaan bumi) merupakan gerak dengan momentum yang berubah. Perubahan momentum inilah yang melahirkan sebuah konsep tentang kuantitas kekuatan atau gaya ( $F$ ). Semakin besar perubahan momentum yang terjadi, maka kuantitas gaya itu semakin besar. Pengukuran kuantitas gaya yang dapat dilakukan pada saat itu adalah pengukuran berat apel itu sendiri.

Realitas gerak suatu benda memerlukan ruang dan waktu, timbul pertanyaan mana yang lebih dulu ada: apakah benda/ materi terlebih dahulu tercipta, kemudian disediakan ruang dan waktu ? ataukah ruang dan waktu terlebih dahulu tercipta kemudian benda/ materi ditempatkan di dalamnya ?. Pertanyaan ini pada awal abad ke-20 menjadi penting terutama bagi mendukung teori tentang asal-mula jagat raya ini. Tampaknya bagi Newton pertanyaan itu tidak terlalu menjadi pusat perhatiannya, yang penting bagaimana agar dapat memaknai realitas gerakan yang teratur (normal), lambat atau cepat. Gerakan itu sendiri terbagi atas

gerakan translasi, rotasi, dan vibrasi. Suatu gerak benda yang dipercepat adalah apabila jarak tempuhnya semakin dapat dicapai dengan waktu tempuh yang singkat, sebaliknya gerak benda yang diperlambat adalah apabila jarak tempuh semakin memerlukan waktu tempuh yang lama.

Newton kemudian menyusun tiga buah hukum tentang gerak berdasarkan pada hadir tidaknya gaya yang mempengaruhinya, yaitu: (1) sebuah benda akan berada dalam keadaan diam atau bergerak lurus dengan kecepatan tetap apabila tidak terdapat gaya yang mempengaruhinya; (2) laju dan arah perubahan momentum suatu benda akan terjadi dan sebanding dengan besar dan arah gaya yang mempengaruhinya; (3) setiap aksi sebuah gaya akan memiliki gaya reaksi yang sama besar tetapi dengan arah yang berlawanan. Gambaran ringkas tentang gerak dapat dilihat pada Tabel-1 untuk gerak translasi dan pada Tabel-2 untuk gerak rotasi, sedangkan untuk gerak vibrasi dapat dibayangkan sebagai proyeksi gerak rotasi pada bidang mendatar.

Table-1. Deskripsi gerak translasi.

Gerak Translasi	Waktu Tempuh	Jarak Tempuh	Momentum Linier	Gaya
Dipercepat	Singkat	Jauh	Menguat	Pendorong/ Penarik
	$\Delta t$	$\Delta x$		
Diperlambat	Lama	Dekat	Melemah	Penghambat
	$\Delta t$	$\Delta x$		
Teratur	Lama	Jauh	Tetap	Tidak Ada
	Singkat	Dekat		

Tabel-2. Deskripsi gerak rotasi.

Gerak Rotasi	Waktu Tempuh	Sudut Putar	Momentum Putar	Gaya Putar
Dipercepat	Singkat	Besar	Menguat	Pemutar/ Pembelok
	$\Delta t$	$\Delta q$		
Diperlambat	Lama	Kecil	Melemah	Penghambat
	$\Delta t$	$\Delta q$		
Teratur	Singkat	Kecil	Tetap	Tidak Ada
	Lama	Besar		

Kwantitas gerak dapat pula terbangkit karena dalam rangka menuju pada keadaan seimbang. Misalnya air mengalir dari posisi (atau head) tinggi ke arah posisi (atau head) rendah; panas mengalir dari posisi bersuhu tinggi ke arah posisi bersuhu rendah; arus mengalir dari posisi

bertegangan tinggi ke arah posisi bertegangan rendah, dan bahan (zat) terlarut menyebar dari posisi dengan konsentrasi tinggi ke arah posisi dengan konsentrasi rendah. Proses-proses ini berlangsung secara difusi seperti dijelaskan pada Tabel-3. Karena bentuk persamaannya berupa persamaan diferensial parabolik, maka banyak masalah difusi dapat terselesaikan dengan baik dengan bantuan pemberlakuan syarat awal dan batas yang sesuai. Bahkan bentuk-bentuk persamaan diferensial lainnya biasa ditransformasikan terlebih dahulu ke dalam bentuk yang parabolik, setelah terselesaikan maka dilakukan transformasi balik dalam rangka memperoleh solusi yang diinginkan.

Tabel-3 Kesamaan bentuk formula untuk aliran massa, bahang, dan listrik

Gejala Fisis	Materi (fluida)	Energi Panas (Bahang)	Muatan Listrik
Potensial	Ketinggian total $h$ (cm)	Suhu $T$ (°C)	Tegangan $V$ (volts)
Aliran (Arus)	$q_h$ (cm <sup>3</sup> /detik)	$q_t$ (cal./detik)	$I$ (coulomb /detik)
Konduksi	Hukum Darcy $q_h = -A \cdot k_h \frac{\partial h}{\partial x}$	Hukum Fourier $q_t = -A \cdot k_t \frac{\partial T}{\partial x}$	Hukum Ohm $I = -A \cdot s \frac{\partial V}{\partial x}$
Kontinuitas	$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot q_h = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot q_t = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot I = 0$
Difusi	$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k_h}{M} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_t}{C} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{s}{C} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$
Kapasitansi	$M = \frac{dW}{dh}$	$C = \frac{dQ}{dT}$	$C = \frac{Q}{V}$

### 3. Jembatan Pemahaman Dinamika Titik Massa dengan Dinamika Foton

Di dalam pembelajaran diperlukan jembatan yang dapat menyambung pemahaman dari konstruksi pemikiran bahan terdahulu dengan bahan yang kemudian disajikan, sehingga dapat dicapai suatu konstruksi pemikiran yang sinambung. Walaupun itu tidak mudah, tetapi dengan mengikuti tradisi para fisikawan pendahulu, upaya itu dapat ditelusuri melalui bahan-bahan yang terkadang sudah sulit ditemukan. Seperti halnya untuk menjembatani antara bahan pengajaran mekanika dengan optika diperlukan Tabel-4 yang membandingkan antara beberapa parameter kuantitas fisis dalam kedua bidang itu yang dapat disepadankan/

dianalogikan. Karena sifatnya, paket gelombang optik pada kasus khusus dapat disepadankan dengan gerak titik massa, di samping memang memiliki sifat-sifat penalaran gelombang yang dibahas khusus dalam mekanika gelombang. Pertautan ini tidak hanya menjembatani antara mekanika dan optika, tetapi sekaligus menyambungkannya dengan gagasan dalam pembahasan fisika kuantum. Jembatan antara mekanika dan optika, sesungguhnya telah memberikan jalan bagi pergeseran paradigma dari deterministik ke arah probabilistik.

Tabel-4 Kesepadanan konsep dinamika titik massa dan photon

MEKANIKA NEWTON	OPTIKA
Titik massa	Paket Gelombang
Energi potensial sebagai fungsi dari posisi [ $U(x)$ ]	Index refraksi sebagai fungsi dari posisi [ $n(x)$ ]
Energi total mekanik [ $W ( \mathbf{n} )$ ]	Frekuensi [ $\mathbf{n}$ ]
Kecepatan: $V = \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{W - U}$	Kecepatan grup: $V = \frac{1}{\frac{d}{dn} \left( \frac{n}{C} \right)}$
Lintasan: Prinsip Maupertuis  $\sqrt{\frac{2}{m}} \int \sqrt{(W - U)} ds = \min$ $\int V ds = \min$	Jejak Sinar: Prinsip Fermat  $\int \frac{ds}{C} = \min$ $n \int \frac{ds}{C} = \min \rightarrow \int \frac{ds}{l} = \min$
$\frac{1}{C} = \frac{p}{h\mathbf{n}}$	Kecepatan fasa [ $C$ ]

Penelusuran kesepadanan antara mekanika dan optika seperti disajikan pada Tabel-4 dapat dimulai dari fenomena superposisi gelombang dalam membentuk interferensi konstruktif dan/ atau destruktif. Misalnya, paket gelombang dengan frekuensi kecil yang terdistribusi dapat dinyatakan seperti di bawah ini.

$$\Psi = \sum a \cos \left[ 2\pi \mathbf{n} \left( t - \frac{x}{C(\mathbf{n})} \right) \right] \dots\dots\dots(01)$$

Jika semua amplitudo  $a$  lebih besar dari nol, maka penjumlahan tersebut akan menghasilkan interferensi konstruktif pada  $x=0$  dan  $t=0$ . Pemenuhan terhadap pencarian posisi

interferensi konstruktif untuk  $t \neq 0$  memerlukan syarat perlu untuk mencapai kondisi (extrimum/ stationer):

$$\frac{d}{dn} \left[ n \left( t - \frac{x}{C(n)} \right) \right] = 0, \text{ sehingga diperoleh } t = x \frac{d}{dn} \left( \frac{n}{C(n)} \right) \dots\dots\dots(02)$$

Berdasarkan syarat perlu tersebut diperoleh hubungan antara kecepatan titik massa dalam mekanika (kecepatan grup dalam optika)  $V$  dengan kecepatan fasa  $C$ , seperti berikut:

$$\frac{t}{x} = \frac{1}{V} = \frac{d}{dn} \left( \frac{n}{C(n)} \right) ; \quad \frac{d}{dn} \left( \frac{n}{C(n)} \right) = \sqrt{\frac{m}{2}} \frac{1}{\sqrt{W(n) - U(x)}} \dots\dots\dots(03)$$

Tetapi untuk menjamin kesepadanan lintasan titik massa dengan jejak sinar diperlukan terlebih dahulu syarat perlu yang menghubungkan antara kecepatan fasa dengan suatu fungsi yang bergantung pada energi kinetik dan frekuensi, yaitu:

$$\frac{1}{C(n, x)} = f(n) \sqrt{W(n) - U(x)} \dots\dots\dots(04)$$

Sehingga kedua syarat perlu tersebut dapat digabungkan menjadi:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{m}{2}} \frac{1}{\sqrt{W(n) - U(x)}} &= \frac{d}{dn} \left( n f(n) \sqrt{W(n) - U(x)} \right) \\ &= \frac{d(n f(n))}{dn} \sqrt{W(n) - U(x)} + \frac{n f(n)}{2} \frac{dW/dn}{\sqrt{W(n) - U(x)}} \end{aligned} \dots\dots\dots(05)$$

Dengan memberlakukan persamaan berikut:

$$\frac{d(n f(n))}{dn} = 0 \rightarrow n f(n) = \text{tetap} \dots\dots\dots(06)$$

maka dapat diperoleh bahwa energi mekanik total  $W(n)$  akan memiliki pernyataan sebagai berikut:

$$\sqrt{\frac{m}{2}} = \frac{n f}{2} \frac{dW}{dn} \rightarrow \frac{dW}{dn} = \text{tetap} \rightarrow W(n) = hn + \text{tetapan} \dots\dots\dots(07)$$

atau

$$W(\mathbf{n}) = h\nu = f \cdot \frac{\sqrt{2m}}{h\nu} \dots\dots\dots(08)$$

sehingga indeks refraksi dapat diturunkan/didefinisikan apabila pernyataan untuk kecepatan fasa telah diperoleh:

$$C(\mathbf{n}, x) = \frac{h\nu}{2m} \frac{1}{\sqrt{h\nu - U(x)}} \dots\dots\dots(09)$$

Bentuk lain dari pernyataan serupa yang biasa dikenal adalah:

$$W = h\nu \rightarrow C = \frac{h\nu}{\sqrt{2m}\sqrt{h\nu - U}} \dots\dots\dots(10)$$

dan pernyataan untuk panjang gelombang de Broglie adalah:

$$\lambda = \frac{h}{2p} = \frac{C}{\nu} = \frac{h}{\sqrt{2m}\sqrt{h\nu - U}} = \frac{h}{mV} = \frac{h}{p} \dots\dots\dots(11)$$

Konstanta Planck  $h$  dan  $\hbar$  ( $h$  coret) memiliki nilai sebagai berikut:

$$h = 6.6252 \times 10^{-27} \text{ erg.detik}; \quad \hbar = 1.05444 \times 10^{-27} \text{ erg.detik} \dots\dots\dots(12)$$

#### 4. Penutup

Pertautan antara '*kwantitas materi*' dan '*kwantitas gelombang*' yang keduanya dalam keadaan bergerak terwakili oleh pernyataan de Broglie (11). Sehingga lintasan suatu sinar atau berkas partikel dapat teramati sebagai kwantitas momentum ketika perangkat pengamatannya berupa percobaan, misalnya, efek foto listrik, dan dapat teramati sebagai gelombang ketika perangkat pengamatannya berupa percobaan difraksi atau interferensi. Ketika suatu berkas partikel diamati, maka dapat dibayangkan bahwa partikel tersebut merupakan superposisi dari sejumlah gelombang yang tidak terhingga banyaknya. Dalam peristiwa ini, bentuk partikel tidak lain merupakan perwujudan dari letak perut hasil superposisi tersebut. Tetapi tentu saja, partikel tersebut dalam keadaan bergerak sehingga yang dapat diukur adalah kwantitas momentumnya, sedangkan sebagai gerak gelombang yang terukur adalah kwantitas panjang gelombangnya ( $\lambda$ ) atau angka gelombangnya ( $k = 2\pi / \lambda$ ).