## KB.2 Fisika Molekul

2.1 Prinsip Pauli.

Konsep fungsi gelombang-fungsi gelombang simetri dan antisimetri berlaku untuk sistem yang mengandung partikel-partikel identik. Ada perbedaan yang fundamental antara penjelasan mekanika kuantum dengan penjelasan mekanika klasik tentang sistem yang mengandung partikel-partikel identik tersebut. Dalam mekanika kuantum, partikel-partikel identik adalah tak dapat dibedakan (indistinguishable). Sebaliknya, dalam mekanika klasik, dalam sebuah sistem partikel-partikel identik kita masih dapat memberi label kepada setiap partikel dan mengikuti gerak setiap partikel itu. Dengan kata lain, dalam mekanika klasik partikel-partikel identik masih dapat dibedakan (distinguishable). Hal ini sangat tidak mungkin dalam tingkat mekanika kuantum. Tidak ada hasil penelitian yang membedakan antara dua keadaan yang diperoleh dari pertukaran partikel-partikel identik.

Sebagai contoh, pikirkanlah sebuah sistem yang terdiri atas dua partikel identik yang bergerak dalam lintasan satu dimensi, misal dalam sumbu-x. Misalkan koordinat partikel pertama adalah $x_1$ dan koordinat partikel kedua adalah $x_2$. Dengan demikian, peluang untuk menemukan partikel pertama dalam rentang $dx_1$ disekitar $x_1$ dan partikel kedua dalam rentang $dx_2$ disekitar $x_2$ dapat dinyatakan oleh persamaan

$$P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|^2\, dx_1\, dx_2,$$

Dimana $x_1$ dan $x_2$ di ruas kanan menyatakan posisi masing-masing partikel 1 dan 2. Nah! sekarang jika kedua partikel itu tak dapat dibedakan, maka kita tidak mungkin membedakan antara dua kedaan berikut:

a. Partikel 1 di $x_1$ ; Partikel 2 di $x_2$

b. Partikel 2 di $x_1$; Partikel 1 di $x_1$.

Hal ini berarti bahwa rapat peluang untuk menemukan kedua konfigurasi tersebut di atas adalah sama, yaitu:

$$|\varphi(x_1, x_2)|^2 = |\varphi(x_2, x_1)|^2. \qquad (1)$$

Hanya fungsi gelombang dengan sifat-sifat simetri seperti ini yang merupakan fungsi gelombang yang sah untuk sebuah sistem partikel identik. Dalam mekanika kuantum, fungsi gelombang-fungsi gelombang tersebut dapat dikategorikan ke dalam fungsi gelombang simetri ($\varphi_S$) dan fungsi gelombang antisimetri ($\varphi_A$). Fungsi gelombang-fungsi gelombang ini memiliki sifat-sifat berikut:

$$\varphi_S(x_1, x_2) = \varphi_S(x_2, x_1) \quad \text{dan} \quad \varphi_A(x_1, x_2) = - \varphi_A(x_2, x_1) \tag{2}$$

yang memenuhi persamaan (1) di atas. Untuk partikel-partikel dalam ruang 3 dimensi, kita dapat menulis persamaan yang mirip dengan persamaan (2) di atas sebagai berikut:

$$\varphi_S(r_1, r_2) = \varphi_S(r_2, r_1) \quad \text{dan} \quad \varphi_A(r_1, r_2) = - \varphi_A(r_2, r_1). \tag{3}$$

Selanjutnya marilah kita misalkan hamiltonian yang menggambarkan sebuah sistem yang terdiri atas dua partikel tersebut dengan huruf H. Jika kedua partikel tersebut benar-benar tak dapat dibedakan, maka hamiltonian ini harus simetri relatif terhadap posisi dari kedua partikel, yaitu:

$$H(r_1, r_2) = H(r_2, r_1). \tag{4}$$

Disamping itu, kedua partikel itu juga memiliki koordinat spin (S). Jadi hamiltonian tersebut juga harus simetri relatif terhadap spin. Karena sifat simetri dari H yang lengkap adalah sebagai berikut:

$$H(r_1, S_1; r_2, S_2) = H(r_2, S2; r_1, S_1),$$

sehingga sifat-sifat untuk $\varphi_S$ dan $\varphi_A$ menjadi:

$$\varphi_S(r_1, S_1; r_2, S_2) = \varphi_S(r_2, S_2; r_1, S_1) \quad \text{dan}$$

$$\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_A(r_2,S_2; r_1,S_1). \tag{5}$$

Demikian pula halnya dengan rapat peluang. Sifat simetri dari rapat peluang menjadi:

$$|\varphi(1, 2)|^2 = |\varphi(2, 1)|^2.$$

dimana angka 1 = ($r_1$, $S_1$) dan angka 2 = ($r_2$, $S_2$).

Sifat-sifat simetri ini akan lebih enak jika ditulis dalam bentuk sifat-sifat operator pertukaran (exchange operator) $\chi$ yang didefinisikan oleh persamaan :

$$\chi\, \varphi(1,2) = \varphi(2,1) \qquad (6)$$

Operator $\chi$ memiliki dua eigenvalue, yaitu:

$$\chi\, \varphi_S(1,2) = \varphi_S(2,1) = +\varphi_S(1,2) \text{ dan}$$
$$\chi\, \varphi_A(1,2) = \varphi_A(2,1) = -\varphi_A(1,2). \qquad (7)$$

sehingga dari persamaan (7) dapat kita lihat bahwa eigenfunction dari $\chi$ adalah $\varphi_S$ dengan eigenvalue +1 dan $\varphi_A$ dengan eigenvalue –1. Disamping itu, $\chi$ adalah komutatif dengan H, sehingga

$$[\chi, H] = 0,$$

dan akibatnya $\chi$ merupakan tetapan dari gerak kedua partikel tersebut. Jadi

$$(d/dt)\langle\chi\rangle = 0. \qquad (8)$$

Tetapnya nilai $\langle\chi\rangle$ adalah merupakan sebuah sifat permanen dari sebuah sistem partikel identik. Seperti dijelaskan di atas bahwa operator $\chi$ mempunyai eigenvalui + 1 dan –1. Partikel-partikel yang ditandai oleh eigenvalue +1 disebut partikel <u>*boson*</u>. Fungsi gelombang untuk partikel boson ini adalah simetri ($\varphi_S$). Dan partikel-partikel yang ditandai oleh eigenvalue –1 disebut partikel <u>*fermion*</u>. Fungsi gelombang fermion adalah antisimetri ($\varphi_A$). Disamping eigenvalue dari operator $\chi$, ada kategori lain yang digunakan untuk mengelompokan partikel-partikel tersebut apakah mereka termasuk boson atau fermion. Kategori tersebut adalah <u>*spin*</u> dari partikel-partikel tersebut. Boson memiliki nilai spin berupa bilangan bulat positif, yaitu 1, 2, 3, 4, 5,…………., dan seterusnya, sedangkan fermion memiliki nilai spin berupa setengah bilangan ganjil positif, yaitu : ½ , 3/2, 5/2, 7/2, ………dan seterusnya. Contoh partikel-partikel boson adalah foton, pion ($\pi$), dan K-meson. Sedangkan contoh partikel-partikel fermion adalah elektron dan neutron.

Prinsip Pauli tersebut di atas dipatuhi oleh partikel fermion. Seperti disebutkan di ats bahwa fungsi gelombang sebuah sistem yang terdiri atas partikel-partikel identik fermion adalah antisimetri. Sekarang cobalah kita perhatikan sebuah sistem yang terdiri atas dua fermion. Fungsi gelombang mereka adalah $\varphi_A(1, 2)$. Seperti dijelaskan di atas bahwa sifat fungsi gelombang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_A(r_2, S_2; r_1, S_1). \qquad (9)$$

Misalkan kedua partikel tersebut memiliki koordinat yang sama, yaitu $r_1$, dan $S_1$. Dengan kata lain, kedua partikel tersebut berada dalam keadaan $\varphi_A(1,1)$. Sifat dari keadaan ini tentunya adalah sama dengan sifat yang ditunjukkan dalam persamaan (9) di atas, yaitu sebagai berikut:

$$\varphi_A(r_1, S_1; r_1, S_1) = - \varphi_A(r_1, S_1; r_1, S_1). \qquad (10)$$

Coba Anda perhatikan dengan baik persamaan (10) di atas ! Jika kita amati dengan baik, persamaan (10) di atas ini akan benar <u>jika dan hanya jika</u> nilai

$$\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = 0. \qquad (11)$$

Karena jika nilai $\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2)$ tidak **sama** dengan nol, maka persamaan (10) di atas menjadi tidak benar. Contoh, jika nilai $\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = 2$, maka menurut persamaan (10) di atas kita harus memperoleh keadaan berikut:

$2 = -2$ (yang jelas salah).

Konsekwensinya, persamaan (11) di atas menyatakan bahwa *peluang untuk menemukan partikel-partikel di tempat yang sama dengan nilai spin yang sama adalah* ***nol***. Inilah keutamaan dari prinsip Pauli yang menyatakan bahwa ***dua fermion tidak dapat berada dalam keadaan kuantum yang sama.*** Jadi Anda tidak mungkin mendapatkan dua buah elektron di tingkat energi yang sama dan di tempat yang sama di dalam ruang, kecuali jika nilai spin mereka berbeda, misalnya yang satu spin up dan yang lain spin down.

## 2. 2 Tabel Periodik

Untuk memhami tabel periodik dari unsur-unsur kimia, kita dapat menggunakan pendekatan ***medan listrik sentral***, yaitu medan listrik yang selalu menuju atau meninggalkan pusat lingkaran. Di dalam model ini kita mengaanggap bahwa setiap elektron melihat hanya medan listrik statis yang ditimbulkan inti dan elektron-elektron lainnya. Medan listrik gabungan ini diasumsikan memiliki sifat *simetri bola,* artinya medan itu serba sama ke segala arah di dalam ruang. Karena itu, operator-operator

$H$, $L^2$, $L_z$, dan $S_z$.

yang relevan untuk sebuah elektron membentuk sebuah set (himpunan) operator-operator komutatif, sehingga keadaan setiap elektron ditandai oleh eigenvalue-eigenvalue:

$n$, $l$, $m_l$, dan $m_s$.

Bilangan kuantum-bilangan kuantum (eigenvalue-eigenvalue) ini sesuai dengan sebuah fungsigelombang untuk elektron ke *i* yang berbentuk:

$$\varphi_{nlm_l m_s}(r_i, S_i) = R_{nl}(r_i)\ Y_l^m(\theta_i, \phi_i)\ \xi_z^{\pm}(i), \qquad (14)$$

dimana $\xi_z^{\pm}(i) \equiv \alpha(i)$ atau $\beta(i)$.

Prinsip Pauli melarang dua buah elektron untuk berada dalam keadaan kuantum yang sama, yaitu ia melarang dua buah elektron untuk memiliki himpunan nilai-nilai $n, l, m_l$ *dan* $m_s$.

Kaitan antara bilangan kuantum n dan $l$ adalah sebagai berikut:
$l$ = 0, 1, 2, 3, 4, ………….., (n-1). Contoh, untuk n = 3, maka nilai-nilai $l$ yang mungkin adalah 0, 1, dan 2. Untuk setiap nilai $l$ kita juga akan mendapatkan nilai-nilai $m_l$ sebanyak ($2l + 1$), yaitu $m_l = -l, -l + 1, -l + 2, -l + 3$, ………., 0, 1, 2, 3, 4, ………., $+l$. Sehingga untuk sebuah nilai n kita akan mendapatkan $n^2$ buah keadaan yang berbeda.

Contoh: Untuk n = 2, kita akan memperoleh $l$ = 0, dan 1, sehingga kita akan mendapatkan nilai $m_l$ sebagai berikut:

a. untuk $l$ = 0, nilai $m_l$ = 0.
b. untuk $l$ = 1, nilai $m_l$ = -1, 0, +1.

Jadi kita akan memperoleh 4 keadaan yang berbeda untuk sebuah tingkat energi yang sama yaitu n. Keempat keadaan ini adalah sesuai dengan himpunan $nlm_l$, yaitu : {200, 21-1, 210, dan 211). Hal seperti ini sering disebut bahwa energi eigen tersebut adalah degenerasi.

Apabila ketergantungan terhadap spin elektron itu juga kita perhitungkan, maka tingkat degenerasi ini akan dilipatgandakan, karena setiap satu spin kita akan memdapatkan dua nilai bilangan kuantum spin ($m_s$). Dengan demikian, tingkat degenerasi yang tadinya sama dengan $n^2$ akan menjadi $2n^2$. Artinya, untuk sebuah kulit ke n akan terdapat $2n^2$ fungsi gelombang seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (14) di atas.

Aturan degenerasi ini bersama dengan prinsip Pauli dapat digunakan untuk menjelaskan <u>*struktur kulit*</u> dari konfigurasi elektron unsur-unsur. Atom-atom yang kulit ke n-nya terisi penuh akan memiliki momentum sudut total sama dengan nol dan spin total sama dengan nol. Elektron-elektron terluar (elektron valensi) menentukan sifat-sifat kimia dari atom tersebut.

Keterulangan (periodicity) dari sifat-sifat kimia tersebut didasarkan pada kenyataan bahwa jumlah elektron valensi terulang setelah sebuah kulit terisi penuh.

Untuk n = 1, nilai $l$ yang mungkin adalah hanya 0. Tetapi nilai $m_s$ ada dua yaitu + ½ dan - ½ . Karena itu, Anda akan mendapatkan dua buah elektron dalam kulit dengan n = 1. Kulit n = 1 ini sering disebut kulit-K dalam notasi sinar-x. Dalam kedaan dasar (ground state) atom helium (Z = 2), kulit n = 1 akan terisi penuh, dan konfigurasi elektronnya dinyatakan oleh notasi: $1s^2$. Huruf s ini ditunjukan oleh nilai $l$ = 0. Huruf-huruf lainnya ditentukan oleh aturan berikut:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $l$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | dst |
| notasi | s | p | d | f | g | h | i | k | dst |

Contoh lainnya adalah atom Li dengan Z = 3. Konfigurasi elektron atom Li adalah sebagai berikut

$1s^2\ 2s^1$.

Artinya, ada dua elektron di kulit n = 1, $l$ = 0, dan satu elektron di n = 2, $l$ = 0. Tidak ada elektron di n = 2, $l$ = 1, karena kita selalu mengisi elektron mulai dari kulit terbawah, yaitu mulai dari kulit dengan nilai n terendah (n = 1). Pada atom Li tersebut, elektron valensi-nya tidak berpasangan, sehingga hal ini akan menghasilkan nilai j = ½ (karena ingat bahwa nilai-nilai vektor j ditentukan oleh j = $l$ + s, ………. |$l$-$s$|).

**Latihan.**

Tentukanlah konfigurasi elektron atom Be (Z = 4) dan Ni (Z = 7).

Petunjuk: Mulailah mengisi elektron dari kulit terbawah.

**Rangkuman**

1. Ada perbedaan yang fundamental antara penjelasan mekanika kuantum dengan penjelasan mekanika klasik tentang sistem yang mengandung partikel-partikel identik tersebut. Dalam mekanika kuantum, partikel-partikel identik adalah tak dapat dibedakan (indistinguishable). Sebaliknya, dalam mekanika klasik, dalam sebuah sistem partikel-partikel identik kita masih dapat memberi label kepada setiap partikel dan mengikuti gerak setiap partikel itu.
2. Peluang untuk menemukan partikel pertama dalam rentang $dx_1$ disekitar $x_1$ dan partikel kedua dalam rentang $dx_2$ disekitar $x_2$ dapat dinyatakan oleh persamaan
   $P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|^2\, dx_1\, dx_2$.
3. Fungsi gelombang-fungsi gelombang simetri ($\varphi_S$) dan antisimetri ($\varphi_A$ ) untuk satu dimensi memiliki sifat-sifat berikut:
   $\varphi_S(x_1, x_2) = \varphi_S(x_2, x_1)$ dan $\varphi_A(x_1, x_2) = - \varphi_A(x_2, x_1)$
4. Fungsi gelombang-fungsi gelombang simetri ($\varphi_S$) dan antisimetri ($\varphi_A$ ) untuk tiga dimensi memiliki sifat-sifat berikut:
   $\varphi_S(r_1, r_2) = \varphi_S(r_2, r_1)$ dan $\varphi_A(r_1, r_2) = - \varphi_A(r_2, r_1)$.
5. Hamiltonian untuk partikel identik dalam mekanika kuantum memiliki sifat simetri relatif terhadap posisi dan spin dari partikel-partikel tersebut, sehingga:
   $H(r_1, S_1; r_2, S_2) = H(r_2, S2; r_1, S_1)$.
   Demikian pula hal nya dengan fungsi gelombangnya, sehingga:
   $\varphi_S(r_1, S_1; r_2, S_2) = \varphi_S(r_2, S_2; r_1, S_1)$ dan
   $\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_A(r_2,S_2; r_1,S_1)$.
6. Prinsip Pauli yang menyatakan bahwa ***dua fermion (seperti elektron) tidak dapat berada dalam keadaan kuantum yang sama.*** Atau dengan kata lain, *peluang untuk menemukan partikel-partikel fermion di tempat yang sama dengan nilai spin yang sama adalah* ***nol***.
7. Kaitan antara bilangan kuantum n dan $l$ adalah sebagai berikut:
   $l = 0, 1, 2, 3, 4, \ldots\ldots\ldots, (n-1)$.
8. Untuk setiap nilai $l$ kita juga akan mendapatkan nilai-nilai $m_l$ sebanyak $(2l + 1)$.
9. Untuk sebuah kulit ke n akan terdapat $2n^2$ fungsi gelombang seperti yang ditunjukkan oleh persamaan

$\varphi_{nlm_l m_s}$ ($r_i$, $S_i$) = $R_{nl}$ ($r_i$) $Y_l^m$ ($\theta_i$, $\phi_i$) $\xi_z^{\pm}(i)$.

10. Aturan degenerasi bersama dengan prinsip Pauli dapat digunakan untuk menjelaskan ***struktur kulit*** dari konfigurasi elektron unsur-unsur.

**Tes formatif-2**

Petunjuk: Jawablah semua soal di bawah ini dengan cara memberi tanda silang pada huruf di depan jawaban yang benar.

1. Perbedaan yang fundamental antara penjelasan mekanika kuantum dengan penjelasan mekanika klasik tentang sistem yang mengandung partikel-partikel identik adalah:
   a. Dalam mekanika klasik partikel-partikel itu dapat dipisahkan, sedangkan dalam mekanikan kuantum partikel-partikel tersebut tak dapat dipisahkan.
   b. Dalam mekanika klasik partikel-partikel itu tak dapat dipisahkan, sedangkan dalam mekanikan kuantum partikel-partikel tersebut dapat dipisahkan.
   c. Dalam mekanika klasik gerak partikel-partikel itu tak dapat diikuti, sedangkan dalam mekanikan kuantum gerak partikel-partikel tersebut dapat diikuti.
   d. Dalam mekanika klasik partikel-partikel itu tak dapat diberi label, sedangkan dalam mekanikan kuantum partikel-partikel tersebut dapat diberi label.

2. Peluang untuk menemukan partikel pertama dalam rentang $dx_1$ disekitar $x_1$ dan partikel kedua dalam rentang $dx_2$ disekitar $x_2$ dapat dinyatakan oleh persamaan
   a. $P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|\, dx_1\, dx_2$.
   b. $P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|^2\, dx_1\, dx_2$.
   c. $P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|^3\, dx_1\, dx_2$
   d. $P_{12}\, dx_1 dx_2 = |\varphi(x_1, x_2)|^4\, dx_1\, dx_2$

3. Fungsi gelombang-fungsi gelombang simetri ($\varphi_S$) dan antisimetri ($\varphi_A$) untuk satu dimensi memiliki sifat-sifat berikut:
   a. $\varphi_S(x_1, x_2) = \varphi_S(x_2, x_1)$ dan $\varphi_A(x_1, x_2) = \varphi_A(x_2, x_1)$
   b. $\varphi_S(x_1, x_2) = -\varphi_S(x_2, x_1)$ dan $\varphi_A(x_1, x_2) = -\varphi_A(x_2, x_1)$
   c. $\varphi_S(x_1, x_2) = \varphi_S(x_2, x_1)$ dan $\varphi_A(x_1, x_2) = -\varphi_A(x_2, x_1)$
   d. $\varphi_S(x_1, x_2) = -\varphi_S(x_2, x_1)$ dan $\varphi_A(x_1, x_2) = \varphi_A(x_2, x_1)$

4. Hamiltonian untuk partikel identik dalam mekanika kuantum memiliki sifat simetri relatif terhadap posisi dan spin dari partikel-partikel tersebut, sehingga:

a. $H(r_1, S_1; r_2, S_2) = H(r_2, S2; r_1, S_1)$ dan $\varphi_S(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_S(r_2, S_2; r_1, S_1)$

b. $H(r_1, S_1; r_2, S_2) = H(r_2, S2; r_1, S_1)$ dan $\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_A(r_2,S_2; r_1,S_1)$.

c. $H(r_1, S_1; r_2, S_2) = - H(r_2, S2; r_1, S_1)$ dan $\varphi_A(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_A(r_2,S_2; r_1,S_1)$.

d. $H(r_1, S_1; r_2, S_2) = -H(r_2, S2; r_1, S_1)$ dan $\varphi_S(r_1, S_1; r_2, S_2) = - \varphi_S(r_2, S_2; r_1, S_1)$.

5. Prinsip Pauli yang menyatakan bahwa :

a. dua fermion (seperti elektron) dapat berada dalam tingkat energi yang sama.

b. dua fermion (seperti elektron) dapat berada dalam tingkat energi yang sama kecuali jika spinnya berbeda.

c. dua fermion (seperti elektron) tak dapat berada dalam tingkat energi yang sama.

d. dua fermion (seperti elektron) dapat berada dalam tingkat energi yang sama jika nilai spinnya berbeda.

6. Tingkat energi yang ditandai dengan huruf M (kulit M) akan memiliki bilangan kuantum orbit sebagai berikut:

a. $l = 3$

b. $l = 3, 2, 1, 0$.

c. $l = 2, 1, 0$.

d. $l = 2$.

7. Tingkat energi yang ditandai dengan huruf M (kulit M) akan memiliki bilangan kuantum $m_l$ sebanyak:

a. 9 buah.

b. 5 buah

c. 3 buah

d. 1 buah.

8. Jumlah fungsi gelombang dalam Kulit L adalah :

a. 8 buah.
b. 6 buah
c. 4 buah
d. 2 buah.

9. Konfigurasi elektron valensi suatu unsur dinyatakan sebagai berikut : $2p^3$. Hal ini berarti bahwa:
   a. ada 3 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 2.
   b. ada 3 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 3.
   c. ada 3 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 1.
   d. ada 3 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 0.

10. Arti dari konfigurasi elektron berikut : $2s^2$ $2p^6$ adalah:
   a. ada 2 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 1 dan 6 buah elektron di kulit n = 2 dan $l$ = 2.
   b. ada 2 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 0 dan 6 buah elektron di kulit n = 2 dan $l$ = 1.
   c. ada 2 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 0 dan 6 buah elektron di kulit n = 2 dan $l$ = 2.
   d. ada 2 buah elektron di kulit n = 2, $l$ = 2 dan 6 buah elektron di kulit n = 2 dan $l$ = 3.

**Tindak Lanjut (Balikan):**

Cocokanlah jawaban Anda dengan kunci jawaban tes formatif 2 pada akhir modul ini, dan berilah skor (nilai) sesuai dengan bobot nilai setiap soal yang dijawab dengan benar. Kemudian jumlahkan skor yang Anda peroleh lalu gunakan rumus di bawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan (TP) Anda terhadap materi KB-2 ini.

Rumus (TP) = (jumlah skor/jumlah soal) x 100 %

Arti TP yang Anda peroleh adalah sebagai berikut :

90 % - 100 % = baik sekali.

80 % - 89 % = baik

70 % - 79 % = cukup

< 70 % = rendah.

Apabila TP Anda $\geq$ 80 %, maka Anda boleh melanjutkan pada materi Modul berikutnya, dan Selamat !!, Tetapi jika TP Anda < 80 %, Anda harus mengulang materi KB-2 di atas terutama bagian-bagian yang belum Anda kuasai.

**Kunci Jawaban tes formatif-1**

(Bobot nilai setiap soal adalah 1)

1. d (Karena seharusnya $[J_x, J_y] = i \hbar J_z$.)
2. a (Karena nilai-nilai j yang mungkin diperoleh ditentukan oleh : $j = (\ell + s), (\ell + s)-1, (\ell + s) - 2, \ldots\ldots, |\ell - s|$ ).
3. c ( Karena nilai $m_j$ adalah : $-j \le m_j \le j$ )
4. b. (Karena notasi untuk $\ell = 2$ adalah D)
5. c (lihat persamaan 43. a dan 43.b)

**Kunci Jawaban tes formatif-2**

(Bobot nilai setiap soal adalah 1)

1. a (sudah jelas)
2. b (ini adalah definisi).
3. c (sudah jelas)
4. b (karena simetri relatif terhadap posisi dan spin).
5. d. (sudah jelas)
6. c ( karena kulit M memiliki n = 3 dan nilai *l* dihunbungkan dengan nilai n sebagai berikut: *l* = 0, 1, 2, 3, ……….., (n-1).
7. a (karena banyaknya nilai $m_l$ ditentukan oleh rumus (2*l* + 1) dan kulit M memiliki nilai-nilai *l* = 0, 1, dan 2.
8. a. (karena jumlah fungsi gelombang ditentukan oleh rumus: $2n^2$, dan kulit L memiliki n = 2)
9. c (karena sub kulit p ditandai oleh nilai *l* = 1.
10. b (karena sub kulit s dan p masing-masing ditandai oleh nilai *l* = 0 dan *l* = 1.

## Kepustakaan


1. Richard L Libooff, *Introduction to Quantum Mechanics, 2nd ed.,* Addison Wesley Publishing Co, Reading- Massachusetts, 1992.
2. Claude Cohen- Tannoudji, dkk, *Quantum Mechanics,* Vol. 1, John Wiley & Sons, New York, 1977.
3. Claude Cohen- Tannoudji, dkk, *Quantum Mechanics,* Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1977.
4. Min Chen, *Physics Problems with Solution,* Prentice Hall of India, New Delhi, 1987.
5. W. Greiner, *Relativistic Quantum Mechanics,* Springer-Verlag, New York, 1994.