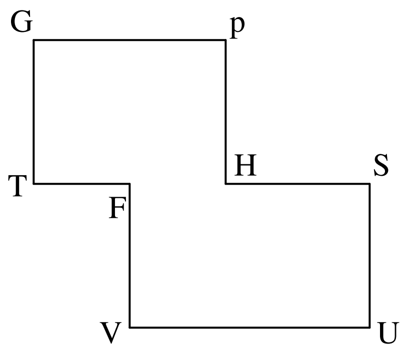
SEGI DELAPAN AJAIB

AHMAD ABU HAMID
Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY

Abstrak

Potensial termodinamis, keempat persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS merupakan materi pokok dalam Termodinamika yang bersifat abstrak. Banyak buku-buku referensi yang menjelaskan materi pokok potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS dengan menggunakan konsep vektor. Konsep vektor ini memang benar dan bagus, namun kurang mudah difahami oleh mahasiswa, karena agak rumit. Oleh sebab itu, perlu adanya jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS yang bersifat abstrak.

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengingat-ingat dan memahami konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS adalah menggunakan segi delapan ajaib. Adapun segi delapan ajaib itu seperti gambar 1 berikut.



Gambar 1: Segi Delapan Ajaib

Huruf pertama dalam segi delapan ajaib adalah huruf G simbol energi bebas Gibbs dan singkatan kata Good, huruf kedua adalah p simbol tekanan dan singkatan kata Physicians (Physicists), huruf ketiga adalah H simbol entalpi dan singkatan kata Have, huruf keempat adalah S simbol entropi dan singkatan kata Studied, huruf kelima adalah U simbol energi dalam dan singkatan kata Under, huruf keenam adalah V simbol volume dan singkatan kata Very, huruf yang ketujuh adalah F simbol energi bebas Helmholtz dan singkatan kata Fine, serta huruf yang kedelapan adalah T simbol temperatur dan singkatan kata Teachers. Jadi dalam segi delapan ajaib ada satu kalimat yang mudah dingat-ingat mahasiswa, yaitu: Good Phisicians (Physicists) Have Studied Under Very Fine Teachers, yang makna bebasnya adalah: Fisikawan-fisikawan yang baik pernah belajar di bawah bimbingan guru-guru yang bijaksana.

Segi delapan ajaib dapat digunakan dengan dasar analisis satuan yang sangat sederhana dan perjanjian berikut:

1. ke atas tanda positif,
2. ke bawah tanda negatif,
3. ke kanan tanda positif, dan
4. ke kiri tanda negatif.

Sebagai contoh, untuk mengingat-ingat potensial termodinamis energi bebas Gibbs, dikerjakan hal-hal berikut. dG = . . . dp - . . . dT. Energi bebas Gibbs (G) hubungannya dengan tetangga dekatnya adalah tekanan (p) yang mengarah kekanan, sehingga dp bertanda positif, dengan tetangga dekat lainnya adalah temperatur (T) dengan arah ke bawah, sehingga dT bertanda negatif. Analisis satuannya dikerjakan dengan mengingat-ingat satuan energi bebas Gibbs, yaitu: joule = N m. Sedangkan satuan tekanan adalah pascal atau N / m^2, agar dapat jadi N m harus dikalikan m^3 yang merupakan satuan volume, sehingga di depan dp harus dituliskan simbol volume (V). Satuan dT adalah Kelvin (K), agar dapat jadi satuan energi harus dikalikan dengan joule / Kelvin (J / K) yang tidak lain merupakan satuan dari entropi (S). Oleh sebab itu, di depan dT harus dituliskan simbol entropi (S). Jadi persamaan di atas dG = . . . dp - . . . dT dapat diubah menjadi:

dG = V dp – S dT . . . . . (1)

Dengan jalan yang sama dapat diketahui dan dapat dingat-ingat dengan mudah ketiga potensial termodinamis yang lain, yaitu:

dH = T dS + V dp, dU = T dS – p dV, dan dF = - p dV – S dT . . . (1.a)

Persamaan-persamaan Maxwell dapat dingat-ingat pula dengan segi delapan ajaib. Sebagai contoh:
dU = TdS – p dV . . . . . (2)
(lihat dengan cermat segi delapan ajaib pada gambar 1 di atas). Ini berarti U merupakan fungsi S dan V, atau U = U (S, V) dengan ini berlaku persamaan:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV \quad .\ .\ .\ .\ (3)$$

Persamaan (2) dan (3) identik, maka berlaku persamaan:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V}\right)_{V,S} = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S \quad .\ .\ .\ (4) \text{ dan persamaan}$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -p \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S}\right)_{S,V} = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V \quad .\ .\ .\ (5)$$

Persamaan (4) dan (5) adalah sama, karena U merupakan fungsi dua koordinat dan dU merupakan diferensial eksak, sehingga berlaku persamaan:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V}\right)_{V,S} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S}\right)_{S,V} = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V \quad .\ .\ .\ (6)$$

Kita ingat, bahwa koefisien muai gas adalah:

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad \text{atau} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = \frac{1}{\beta V} \quad .\ .\ .\ (7)$$

Karena prosesnya isobaris, maka persamaan (7) dapat diubah menjadi:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = \frac{1}{\beta_p V} \quad .\ .\ .\ (8)$$

Pada persamaan (8) indeks diferensial parsial adalah: p, yang berarti ada dalam proses isobaris. Jika prosenya isentropis, maka indeks p boleh diganti dengan indeks S. Dengan demikian, persamaan (6) dan (8) membuktikan bahwa:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = \frac{1}{\beta_S V} \quad .\ .\ .\ (9)$$

dalam hal ini prosesnya adalah proses isentropis, yaitu suatu proses yang entropinya sama. Persamaan (9) ini disebut persamaan I Maxwell.

Dengan contoh-contoh ini, jelas bahwa potensial termodinamis dan persamaan Maxwell dapat diingat-ingat dengan mudah dengan menggunakan segi delapan ajaib. Persamaan Maxwell lainnya seperti persamaan (10), yaitu: persamaan II, III, dan IV Maxwell yang dapat dijabarkan pula dengan segi delapan ajaib.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p = -\frac{k_S}{\beta_S}, \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = -\frac{\beta_V}{k_V}, \text{ dan } \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \beta_p V \ .\ .\ .\ (10)$$

Lihat segi delapan di atas ! Persamaan dU = TdS – pdV atau TdS = dU + pdV atau $dS = c_V \dfrac{dT}{T} + p\dfrac{dV}{T}$ . . . (11). Kita tahu, bahwa TdS = c_V dT + pdV . . . (12).
Ini berarti entropi sistem merupakan fungsi temperatur dan volume sistem, atau dapat dituliskan S = S(T, V) dan diferensial totalnya adalah: $dS = \left(\dfrac{\partial S}{\partial T}\right)_V dT + \left(\dfrac{\partial S}{\partial V}\right)_T dV$ (13).

Jika proses yang mendasari persamaan (12) adalah proses isochoris, maka dV = 0 dan persamaan (12) menjadi:

$$c_V = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \quad \ldots (14).$$

Sedangkan persamaan Maxwell menyatakan: $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_T = \frac{k_V}{\beta_V} \quad \ldots \quad (15).$

Jika persamaan (15) dan (14) disubstitusikan ke persamaan (13) akan diperoleh persamaan:

$$dS = \frac{c_V}{T}dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V dV \text{ atau } TdS = c_V\, dT + \frac{k_V}{\beta_V}TdV \quad \ldots \quad (16).$$

Persamaan (16) inilah yang dikenal sebagai persamaan TdS I. Dengan jalan yang sama, dapat dijabarkan persamaan TdS lainnya, yaitu: $TdS = c_p dT + \beta_p VTdp$ dan $TdS = \frac{c_p}{\beta_p}\frac{dV}{V} + \frac{c_V \beta_V}{k_V}dp \quad \ldots \quad (17).$

Penjabaran lengkap akan disampaikan dalam makalah.

Kata kunci : Segi delapan ajaib, potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS.

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS dalam Termodinamika merupakan materi pokok yang bersifat abstrak. Menurut pengalaman penulis, materi pokok ini sulit untuk dijelaskan kepada para mahasiswa. Untuk itu, diperlukan cara mengingat-ingat dan cara memahami dengan mudah oleh para mahasiswa.

Dalam buku-buku referensi Termodinamika, materi pokok potensial termodinamis dan persamaan Maxwell ada yang membahas dengan teori vektor yang jlimet dan sukar dimengerti. Konsepnya bagus, tetapi sulit untuk dicerna oleh sebagaian besar mahasiswa. Oleh sebab itu, diperlukan jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami materi pokok potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS.

B. Permasalahan

Permasalahan yang hendak dipecahkan dalam kajian ini antara lain:

1. seperti apakah segi delapan ajaib itu ?
2. apakah segi delapan ajaib dapat untuk mengingat-ingat dan menjelaskan konsep potensial termodinamis dengan mudah ?
3. apakah segi delapan ajaib dapat digunakan untuk mengingat-ingat dan menjelaskan konsep persamaan Maxwell dengan mudah ?
4. apakah segi delapan ajaib dapat digunakan untuk mengingat-ingat dan menjelaskan konsep persamaan TdS ?

C. Urgensi Masalah

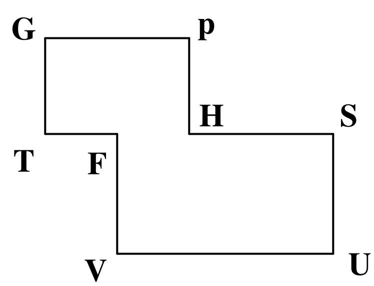
Pentingnya permasalahan ini dipecahkan dengan baik, adalah diperolehnya keuntungan-keuntungan yang mendasar sebagai berikut:

1. diperoleh jembatan keledai yang menguntungkan bagi mahasiswa untuk mengingat-ingat dan memahami konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS dengan segi delapan ajaib,
2. diperoleh cara yang mudah untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan persamaan-persamaan potensial termodinamis, persamaaan-persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS.

PEMBAHASAN

A. Segi Delapan Ajaib

Pada hakikatnya, dalam Termodinamika hanya dibahas 8 (delapan) besaran fisis, yaitu: energi bebas Gibbs (G), tekanan (p), entalpi (H), entropi (S), energi dalam (U), volume (V), energi bebas Helmholtz (F), dan temperatur (T). Kedelapan besaran ini dapat diingat-ingat dengan kalimat: Good (G) Physicians (Physicists) (p) Have (H) Studied (S) Under (U) Very (V) Fine (F) Teachers (T). Makna bebasnya adalah: fisikawan-fisikawan yang baik pernah belajar di bawah "bimbingan" guru-guru yang bijaksana. Kedelapan huruf ini dapat dibentuk menjadi sebuah segi delapan seperti gambar 1 berikut yang disebut kemudian sebagai segi delapan ajaib. Mengapa ajaib ? Karena segi delapan ini dapat digunakan sebagai jembatan keledai untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS yang bersifat abstrak dalam Termodinamika.



Gambar 1: Segi Delapan Ajaib

B. Potensial Termodinamis

Potensial termodinamis ada empat, yaitu: dG (perubahan energi bebas Gibbs), dH (perubahan entalpi), dU (perubahan energi dalam), dan dF (perubahan energi bebas Helmholtz). Untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan keempat potensial termodinamis dapat digunakan segi delapan ajaib pada gambar 1, perjanjian singkat, dan analisis satuan. Adapun perjanjian singkat yang dimaksud adalah:

1. jika kita berjalan dari titik yang kita teliti ke tetangga dekatnya dengan arah ke atas, diberi tanda positif,
2. jika kita berjalan dari titik yang kita teliti ke tetangga dekatnya dengan arah ke bawah, diberi tanda negatif,
3. jika kita berjalan dari titik yang kita teliti ke tetangga dekatnya dengan arah ke kanan, diberi tanda positif, dan
4. jika kita berjalan dari titik yang kita teliti ke tetangga dekatnya dengan arah ke kiri, diberi tanda negatif.

Sebagai contoh. Energi bebas (G), perubahan energi bebasnya dG, tetangga dekatnya adalah tekanan (p) dengan arah ke kanan, sehingga dp bertanda positif. Tetangga dekatnya yang lain adalah temperatur (T) yang arahnya ke bawah, sehingga dT bertanda negatif. Dengan menggunakan perjanjian ini dapat dituliskan persamaan:

$dG = ...dp - ...dT$ . . . (1)

Dengan menggunakan analisis satuan, diperoleh G adalah energi bebas dengan satuan joule = N m, sehingga dp juga harus bersatuan joule. Tekanan (p) sendiri satuannya pascal (N / m^2), sehingga untuk menjadi N m harus dikalikan dengan m^3 yang tidak lain adalah satuan volume (V). Untuk dT satuannya Kelvin (K), sehingga agar menjadi N m harus dikalikan dengan joule / Kelvin (J / K) yang tidak lain adalah satuan entropi (S). Dengan analisis satuan ini, persamaan (1) dapat ditulis menjadi:

dG = V dp – S dT . . . (2)

Persamaan (2) inilah yang mendeskripsikan konsep potensial termodinamis I.

Dengan menggunakan segi delapan di atas, dH tetangga dekatnya dS dengan arah ke kanan, sehingga dS bertanda positif. Tetangga dekatnya yang lain adalah dp dengan arah ke atas, sehingga dp bertanda positif. Dengan ini dapat dituliskan persamaan:
$dH = \ldots dS + \ldots dp$ ... (3)
Dengan analisis satuan, diperoleh bahwa dH dengan satuan N m, maka dS harus dikalikan dengan temperatur (T) dan dp harus dikalikan dengan volume (V). Dengan demikian, persamaan (3) dapat ditulis sebagai persamaan:
$dH = T\,dS + V\,dp$ ... (4)
Persamaan (4) inilah yang mendeskripsikan konsep potensial termodinamis II.

Dengan menggunakan segi delapan di atas, dU tetangga dekatnya adalah dS dengan arah ke atas, sehingga dS bertanda positif. Tetangga dekatnya yang lain adalah dV dengan arah ke kiri, sehingga dV bertanda negatif. Dengan ini dapat dituliskan persamaan:
$dU = \ldots dS - \ldots dV$ ... (5)
Dengan analisis satuan, diperoleh bahwa dU dengan satuan N m, maka dS harus dikalikan dengan temperatur (T) dan dV harus dikalikan dengan tekanan (p). Dengan demikian persamaan (5) dapat ditulis sebagai persamaan:
$dU = T\,dS - p\,dV$ ... (6)
Persamaan (6) inilah yang mendeskripsikan konsep potensial termodinamis III.

Dengan menggunakan segi delapan di atas, dF tetangga dekatnya adalah dV dengan arah ke bawah, sehingga dV bertanda negatif. Tetangga dekat lainnya adalah dT dengan arah ke kiri, sehingga dT bertanda negatif. Dengan ini dapat dituliskan persamaan:
$dF = -\ldots dV - \ldots dT$ ... (7)
Dengan analisis satuan, diperoleh bahwa dF dengan satuan N m, maka dV harus dikalikan dengan tekanan (p) dan dT harus dikalikan dengan entropi (S). Dengan demikian persamaan (7) dapat ditulis sebagai persamaan:
$dF = -p\,dV - S\,dT$ ... (8)
Persamaan (8) inilah yang mendeskripsikan konsep potensial termodinamis IV.

Ternyata dengan menggunakan segi delapan di atas, perjanjian singkat, dan analisis satuan ke empat potensial termodinamis dapat diingat-ingat, difahami, dan dijabarkan dengan mudah. Oleh sebab itu, segi delapan di atas memang ajaib, karena dapat digunakan untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan ke empat potensial termodinamis.

C. Definisi Potensial Termodinamis

Lihat segi delapan di atas ! $dG = V\,dp - S\,dT$ ... (9).
Sedangkan $dH = T\,dS + V\,dp$, sehingga $V\,dp = dH - T\,dS$ ... (10).
Jika persamaan (10) disubstitusikan ke persamaan (9) akan diperoleh persamaan: $dG = dH - T\,dS - S\,dT = dH - d(T\,S)$. Ini berarti,
$G = H - T\,S$ ... (11)
Persamaan (11) ini merupakan definisi dari energi bebas Gibbs (G) yang sama dengan entalpi (H) dikurangi dengan perkalian antara temperatur (T) dan entropinya (S).

Lihat segi delapan di atas ! $dH = T\,dS + V\,dp$ ... (12),
sedangkan $T\,dS = dU + p\,dV$ ... (13).
Jika persamaan (13) disubstitusikan ke persamaan (12) akan diperoleh persamaan: $dH = dU + p\,dV + V\,dp$ atau $dH = dU + d(p\,V)$. Dengan ini diperoleh definisi tentang entalpi, yaitu:
$H = U + p\,V$ ... (14)
Entalpi sistem (H) sama dengan energi dalam sistem (U) ditambah dengan perkalian antara tekanan (p) dan volume sistem (V).

Lihat segi delapan di atas ! dU = T dS – p dV . . . (15),
sedangkan T dS = dQ dan – p dV = dW, sehingga persamaan (15) dapat ditulis: dU = dQ + dW, yang berarti:
U = Q + W . . . (16)
Persamaan (16) merupakan definisi energi dalam sistem (U) yang sama dengan kalor yang terlibat pada sistem (Q) ditambah dengan usaha luar sistem (W).

Lihat segi delapan di atas ! dF = - p dV - S dT . . . (17),
sedangkan dQ = dU + p dV atau - p dV = dU – T dS . . . (18).
Jika persamaan (18) disubstitusikan ke persamaan (17) akan diperoleh persamaan: dF = dU - T dS - S dT atau dF = dU – d(T S) yang berarti:
F = U - T S . . . (19)
Persamaan (19) merupakan definisi energi bebas Helmholtz (F) yang sama dengan energi dalam sistem (U) dikurangi dengan temperatur sistem (T) kali entropi sistem (S).

Segi delapan di atas memang ajaib, karena dapat dengan mudah untuk mengingat-ingat definisi keempat potensial termodinamis, yaitu: energi bebas Gibbs (G), entalpi (H), energi dalam (U), dan energi bebas Helmholtz (F). Hal-hal inilah yang membuktikan, bahwa segi delapan di atas dapat digunakan sebagai jembatan keledai untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan potensial termodinamis secara utuh dengan mudah.

D. **Persamaan Maxwell**
Lihat segi delapan di atas ! dG = V dp – S dT . . . (20), ini berarti G fungsi dari p dan T atau G = G(p, T) yang berarti: $dG = \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p dT$ . . . (21).
Persamaan (21) sama dengan persamaan (20), sehingga:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = V \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S \quad \ldots \quad (22)$$

Derivatif kedua dari persamaan (22) adalah:

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial p \partial T}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \ \ldots \ (23.a) \ \text{dan} \ \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial p}\right)_{p,T} = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T \quad \ldots \quad (23.b)$$

Persamaan (23.a) sama dengan persamaan (23.b), karena deferensial dG adalah deferensial eksak, sehingga $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T$ . . . (24).

Kita ingat, bahwa $\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ atau $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \beta_p V$ . . . (25)
Jika persamaan (25) disubstitusikan ke persamaan (24) akan diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \beta_p V \quad \ldots \quad (26)$$

Persamaan (26) inilah yang sering disebut sebagai persamaan I Maxwell.

Lihat segi delapan di atas ! dH = T dS + V dp . . . (27), ini berarti entalpi (H) adalah fungsi entropi (S) dan tekanan (p) yang ditulis sebagai H = H(S, p) dan diferensial totalnya ialah:

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p dS + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S dp \quad ... \quad (28)$$

Persamaan (28) sama dengan persamaan (27), sehingga diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p = T \quad ... \ (29.a) \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S = V \quad ... \quad (29.b)$$

Diferensial orde dua dari persamaan (29.a) dan (29.b) adalah:

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial S \partial p}\right)_{p,s} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S ... \ (30.a) \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 H}{\partial p \partial S}\right)_{S,p} = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p ... \quad (30.b)$$

Persamaan (30.a) sama dengan persamaan (30.b), karena diferensial total dH adalah diferensial eksak, sehingga dapat diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p ... \ (31)$$

Kita ingat, bahwa: $\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ atau $\frac{1}{V} = \beta\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p$ . . .(32.a)

dan $k = -\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$ atau $\frac{1}{V} = -k\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T$ . . . (32.b).

Persamaan (32.a) sama dengan persamaan (32.b), sehingga dapat diperoleh persamaan: $\beta\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right) = -k\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)$ atau $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right) = -\frac{k}{\beta}$ dan jika prosesnya isentropis dapat diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = -\frac{k_S}{\beta_S} \quad ... \quad (33)$$

Jika persamaan (33) disubstitusikan ke persamaan (31) diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p = -\frac{k_S}{\beta_S} \quad ... \quad (34).$$

Persamaan (34) inilah yang dikenal sebagai persamaan II Maxwell.

Lihat segi delapan di atas ! dU = T dS – p dV . . . (35).
Ini berarti U merupakan fungsi S dan V yang dapat ditulis: U = U(S, V). Diferensial totalnya ialah:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV \quad ... \quad (36)$$

Persamaan (36) sama dengan persamaan (35), oleh karena itu berlaku persamaan:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T \quad ... \quad (37.a) \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -p \quad ... \ (37.b)$$

Derivatif kedua dari persamaan (37.a) dan (37.b) adalah:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V}\right)_{V,S} = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S ... \quad (38.a) \quad \left(\frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S}\right)_{S,V} = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V ... \quad (38.b)$$

Persamaan (38.a) sama dengan persamaan (38.b), karena diferensial total dU merupakan diferensial eksak, sehingga diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V \quad . . . \quad (39)$$

Kita ingat, bahwa $\beta = \left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ atau $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = \frac{1}{\beta_p V}$ dan jika prosesnya isentropis, maka diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = \frac{1}{\beta_S V} \quad . . . \quad (40)$$

Jika persamaan (40) disubstitusikan ke persamaan (39) akan diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = \frac{1}{\beta_S V} \quad . . . \quad (41)$$

Persamaan (41) inilah yang disebut sebagai persamaan III Maxwell.

Lihat segi delapan di atas ! dF = - p dV – S dT . . . (42).
Ini berarti energi bebas Helmholtz merupakan fungsi volume sistem (V) dan temperatur sistem (T) yang dapat ditulis sebagai: F = F(V, T). Diferensial total dari energi bebas Helmholtz adalah:

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT \quad . . . \quad (43)$$

Persamaan (43) sama dengan persamaan (42), sehingga diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T = -p \quad . . . \quad (44.a) \qquad \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V = -S \quad . . . \quad (44.b)$$

Derivatif kedua dari persamaan (44.a) dan (44.b) adalah:

$$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial V \partial T}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \quad . . . \quad (45.a) \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 F}{\partial T \partial V}\right)_{V,T} = -\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \quad . . . \quad (45.b)$$

Persamaan (45.a) sama dengan persamaan (45.b), karena diferensial total dF merupakan diferensial eksak. Dengan ini dapat diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \quad . . . \quad (46)$$

Kita ingat, bahwa: $\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ atau $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \beta_p V$ . . . (47.a)

dan $k = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$ atau $\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T = -k_T V$ . . . (47.b).

Dari persamaan (47.a) dan persamaan (47.b) dapat diperoleh persamaan: $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right) = -\frac{\beta V}{kV}$ atau

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = -\frac{\beta_V}{k_V} \quad . . . \quad (48).$$

Jika persamaan (48) disubstitusikan ke persamaan (46) akan diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = -\frac{\beta_V}{k_V} \quad . . . \quad (49)$$

Persamaan (49) inilah yang dikenal sebagai persamaan IV Maxwell.

E. Ketiga Persamaan T dS

Jika dapat diketahui ketiga persamaan T dS dapat diketahui pula hubungan antara kalor yang terlibat dalam suatu sistem dengan karakter benda kerja, misalnya: c_p, c_V, k, dan β, serta dengan besaran-besaran fisis lainnya. Dengan demikian, ketiga persamaan T dS ini sangat penting artinya.

Lihat segi delapan di atas ! dU = T dS – p dV , atau T dS = dU + p dV = c_V dT + p dV atau $TdS = c_V dT + pdV$ . . . (50)

Jika proses yang ditempuh oleh persamaan (50) adalah proses isochoris, maka dV = 0 dan dapat diperoleh persamaan: $c_V = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V$ . . . (51).

Persamaan Maxwell menunjukkan, bahwa: $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \frac{k_V}{\beta_V}$ . . . (52).

Jika persamaan (51) dan (52) disubstitusikan ke persamaan (50) akan diperoleh persamaan: $TdS = c_V dT + \frac{k_V}{\beta_V} TdV$ . . . (53).

Persamaan (53) inilah yang dikenal sebagai persamaan T dS yang pertama atau T dS I.

Lihat segi delapan di atas ! dU = T dS – p dV atau T dS = dU + p dV . . . (54).
T dS juga dapat diubah menjadi persamaan: T dS = c_p dT – V dp . . . (55).
Jika proses yang mendasari persamaan (55) adalah proses isobaris, maka persamaan (55) dapat diubah menjadi persamaan: $c_p = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p$ . . . (56).

Persamaan Maxwell menunjukkan, bahwa: $\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \beta_p V$ . . . (57).

Jika persamaan (56) dan (57) disubstitusikan ke persamaan (55) akan diperoleh persamaan:
$TdS = c_p dT + \beta_p VTdp$ . . . (58)

Persamaan (58) inilah yang dikenal sebagai persamaan T dS II.
Lihat segi delapan di atas ! dU = T dS – p dV atau T dS = dU + p dV . . . (59)
Dapat pula ditulis: entropi sama dengan fungsi volume dan tekanan atau dapat ditulis sebagai: S = S(V, p). Jika persamaan ini dididiferensialkan, maka diperoleh diferensial totalnya adalah:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_p dV + \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_V dp = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p dV + \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_V dp \quad (60)$$

Jika persamaan (60) dikalikan dengan temperaturnya (T), maka diperoleh persamaan:

$$TdS = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p dV + T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_V dp = \frac{c_p}{\beta_p}\frac{dV}{V} + \frac{c_V \beta_V}{k_V} dp \quad . . . \ (61)$$

Persamaan (61) inilah yang dikenal sebagai persamaan T dS III. Dengan penjabaran ini dapat disimpulkan, bahwa segi delapan ajaib di atas dapat digunakan untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan ketiga persamaan T dS.

F. Analisis Buku Referensi

1. Dalam buku Thermodynamics The Kinetics Theory of Gasess and Statistical Mechanics, karangan F.W. Sears potensial termodinamis hanya dibahas dalam sub pokok bahasan fungsi Helmholtz dan fungsi Gibbs berikut. F = U – TS, G = U – TS + pV = H – TS, dH = T dS + V dp, dan dU = T dS – p

dV. Sedangkan persamaan Maxwell dibahas tersendiri dengan menuliskan langsung persamaan-persamaan berikut.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_V = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_V, \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V, \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p, dan \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_p = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

Ketiga persamaan T dS dibahas dalam sub pokok bahasan: Kombinasi hukum Pertama dan Kedua Termodinamika, dan hanya dituliskan persamaannnya saja, yaitu:

$TdS = c_V dT + \frac{\beta T}{k} dV, TdS = c_V dT - \beta VTdp, dan TdS = \frac{kc_V}{\beta} dp + \frac{c_p}{\beta V} dV$ (F.W.Sears,1953:147-163). Dengan kajian ini jelas, bahwa dalam buku ini tidak ada jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami konsep-konsep potensial termodinamis, keempat persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan T dS.

2. Dalam buku Thermodynamics, Kinetics Theory, and Statistical Thermodynamics, karangan F.W. Sears dan G.L. Salinger, potensial Termodinamis dan persamaan Maxwell dibahas sendiri-sendiri, namun ketiga persamaan TdS sangat kurang pembahasannya. Potensial termodinamis hanya diberikan rumusnya saja, yaitu: dF = dU – TdS – SdT, dG = dU – TdS – SdT + pdV = Vdp, dU = TdS – pdV, dan dH= TdS + Vdp. Sedanghkan persamaan Maxwell antara lain dituliskan: $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V dan \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_V$ (F.W. Sears dan G.L. Salinger, 1975: 181-186). Dengan demikian, dalam buku ini juga tidak ada jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS.

3. Dalam buku Thermodinamika karangan W.S. Nainggolan, ketiga persamaan TdS dibahas dalam pokok bahasan Kombinasi Hukum Termodinamika Pertama dan Kedua dan langsung ditulis persamaannya, tanpa dijabarkan atau dijelaskan dengan rinci. Persamaannya ialah:

$$TdS = c_V dT + \frac{\beta T}{k} dV, TdS = c_p dT - \beta TVdp, dan TdS = \frac{kc_V}{\beta} dp + \frac{c_p}{\beta V} dV .$$

Potensial termodinamis dibahas dalam sub pokok bahasan Fungsi-Fungsi Karakteristik dan hanya dituliskan persamaannya saja, yaitu: F = U – TS, H = U + pV, G = F + pV, dan dU = TdS – pdV (W.S. Nainggolan, 1978: 215-218). Sedangkan persamaan Maxwell hanya disajikan persamaannya saja, itupun kurang begitu jelas. Dengan demikian dalam buku ini juga belum ada jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan ketiga persamaan TdS.

4. Dalam buku Heat and Thermodynamics karangan M.W. Zemansky dan R.H. Dittman Potensial Termodinamis dibahas dalam pokok bahasan Zat Murni sub pokok bahasan Entalpi, Fungsi Helmholtz dan Gibbs, serta dua teorema matematis, yang menonjolkan rumusnya dan penjabarannya saja, seperti: dU = TdS – pdV, dH = TdS + Vdp, dF = -SdT – pdV, dan dG = - Sdt + Vdp (M.W. Zemansky dan R.H. Dittman, 1986: 249). Ketiga persamaan TdS dibahas tersendiri dalam sub pokok bahasan Persamaan TdS dengan menonjolkan penjabarannya, seperti: $TdS = c_V dT + T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V dV dan TdS = c_p dT - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dp$. (M.W. Zemansky dan R.H. Dittman, 1986: 250-251). Sedangkan persamaan Maxwell tidak dibahas secara khusus. Dengan demikian buku ini juga tidak menggunakan jembatan keledai untuk mengingat-ingat dan memahami konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS.

5. Dalam buku Thermodynamics karangan J.P. Holman hanya dituliskan secara singkat fungsi Helmholtz dan fungsi Gibbs sebagai berikut: a = H – TS dan g = h – TS. Sedangkan potensial termodinamis dituliskan sebagai: da = - sdT – pdv, dg = - sdT + vdp, dh = Tds + vdp, dan du = Tds – pdv. Persamaan Maxwell hanya dituliskan, tidak dijabarkan. Persamaan Maxwell dituliskan menjadi empat set persamaan deferensial orde satu, antara lain: $\left(\frac{\partial a}{\partial T}\right)_v = -s$, $\left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v = T$, $\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T = v$, dan $\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = -\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v$. (J.P. Holman, 1988: 250-251). Ketiga persamaan TdS dibahas dalam sub pokok bahasan entalpi, energi dalam, dan entropi yang tersebar dalam tiga (3) halaman yang tertulis tidak jelas. Persamaannya itu menyatakan bahwa: $dS = c_V \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv$, $dS = c_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp$ (J.P. Holman, 1988: 252-254). Dengan demikian Holman juga tidak membahas konsep-konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS dengan menggunakan jembatan keledai yang dapat memudahkan mahasiswa untuk mengingat-ingat dan memahami konsep itu.

6. Dalam diktat kuliah Termodinamika karangan B. Darmawan sudah menggunakan jembatan keledai segi delapan yang pada tiap seginya ada huruf G, p, H, S, U, V, F, dan T yang merupakan singkatan dari Good Physicists Have Studied Under Very Fine Teachers. Sudah membahas mengenai potensial termodinamis sebagai berikut: H = U + pV, F = U – TS, dan G = H – TS. Diferensial total dari persamaan ini adalah: dU = TdS – pdV, dH = TdS + vdp, dF = - SdT – pdV, dan dG = - SdT + Vdp. Keempat persamaan Maxwell juga dituliskan, misalnya: $\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = \frac{1}{\beta_S V}$, dan $\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\beta_p V$ (B. Darmawan, 1990: 125). Ketiga persamaan TdS juga dituliskan dan diberi penjelasan secara rinci, misalnya: $TdS = c_V dT + \frac{T\beta}{k_T} dV$, $TdS = c_p dT - T\beta_p V dp$, dan $TdS = \frac{c_p}{\beta V} dV + \frac{c_V k}{\beta} dp$ (B. Darmawan, 1990: 126-129).

Dengan demikian dari enam buku referensi yang telah saya baca, hanya ada satu diktat kuliah yang membahas konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS yang menggunakan jembatan keledai segi delapan. Oleh karena itu diktat kuliah ini dapat digunakan sebagai referensi pembanding dalam membahas konsep potensial termodinamis, persamaan Maxwell, dan persamaan TdS. Penulis juga mengikuti pola-pola yang ada dalam diktat kuliah dari B. Darmawan yang merupakan seorang dosen di jurusan Fisika Institut Teknologi Bandung (ITB).

PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. segi delapan ajaib merupakan segi delapan yang pada tiap-tiap seginya tertera huruf G, p, H, S, U, V, F, dan T yang merupakan simbol dari energi bebas Gibbs, tekanan, entalpi, entropi, energi dalam, volume, energi bebas Helmholtz, dan temperatur dan singkatan dari kalimat: Good Physicists Have Studied Under Very Fine Teachers,
2. segi delapan ajaib dapat digunakan sebagai jembatan keledai untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan konsep-konsep potensial termodinamis dan definisi-definisinya,

3. segi delapan ajaib dapat digunakan sebagai jembatan keledai untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan keempat persamaan Maxwell,
4. segi delapan ajaib dapat digunakan sebagai jembatan keledai untuk mengingat-ingat, memahami, dan menjabarkan ketiga persamaan TdS.

B. Saran

Dari pembahasan dan kesimpulan kajian ini, dapat disarankan hal-hal berikut: agar supaya para mahasiswa dapat mengingat-ingat, memahami, dan mampu menjabarkan konsep-konsep keempat potensial termodinamis dan definisinya, keempat persamaan Maxwell, serta ketiga persamaan TdS dengan mudah, maka dosen mata kuliah Termodinamika sebaiknya menggunakan jembatan keledai segi delapan ajaib untuk menjelaskannya.

C. Rekomendasi

Untuk para dosen mata kuliah Termodinamika direkomendasikan, agar menggunakan segi delapan ajaib dalam menjelaskan konsep-konsep potensial termodinamis dan definisinya, keempat persamaan Maxwell, serta ketiga persamaan T dS, karena ketiga materi pokok ini merupakan materi pokok yang abstrak dan sulit dimengerti oleh para mahasiswa pada umumnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmad Abu Hamid, 2007, Kalor dan Termodinamika, Diktat Kuliah, Yogyakarta: Jurusan Pendidikan Fisika.
2. B. Darmawan, 1990, Termodinamika, Diktat Kuliah, Bandung: Jurusan Fisika Institut Teknologi Bandung (ITB).
3. E. Budikase dan Sidharta M.D., 1996, Termodinamika Fisika, Cetakan Kedua, Jakarta: Universitas Terbuka.
4. Holman J.P., 1988, Thermodynamics, 4 th edition, New York: McGraw-Hill Book Company.
5. W.S. Nainggolan, Thermodinamika, 1978, Bandung: Armico.
6. Sears F.W., 1953, An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases and Statistical Mechanics, Second Edition, Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
7. Sears F.W.,and G.L. Salinger, 1975, Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics, Third Edition, Reading: Addison-Wesly Publishing Company.
8. Zemansky M.W., and R.H. Dittman, 1982, Heat and Thermodynamics, Sixth Edition, New York: McGraw Hill, Inc.