

BAB 3

PROSES-PROSES THERMODINAMIKA

3-1. Pengaruh Panas Pada Volume

Ketika kecepatan molekul atau derajat pemisahan molekul meningkat oleh penambahan panas, rata-rata jarak antara molekul yang meningkat dan besar yang mengembang sehingga satuan berat benda mengisi volume yang besar. Efek ini sangat cocok dengan teori kenaikan atau penurunan aktivitas molekul yang digambarkan sebelumnya. Sebab itu, ketika panas ditambahkan ke atau dibuang dari benda yang tidak terbatas pada ke tiga keadaan fisik, berturut-turut benda itu akan mengembang dan mengkerut. Yaitu pada waktu volume meningkat atau menurun dan pada waktu penambahan atau pengurangan panas.

Kecuali ada satu yang tidak sesuai dengan aturan yaitu air. Jika air didinginkan, volumenya akan menurun biasanya temperatur turun sampai pada 39,2 °F. Pada titik ini, air mencapai berat jenis (density) maksimum dan jika didinginkan lebih lanjut, maka volumenya akan meningkat lagi. Selanjutnya, setelah pendinginan mencapai 32 °F, air akan menjadi padat dan kepadatan akan disertai oleh pengembangan lebih lanjut. Sebenarnya, 1 cu ft air akan membeku kira-kira 1,085 cu ft es. Jumlah perluasan gaya yang terjadi sangat besar selama pemadatan yang cukup untuk memecahkan pipa besi atau penahan bejana.

Sifat air yang khas pada waktu memadat kelihatan bertolak belakang dengan hukum aktivitas molekul yang berlaku seperti telah digambarkan sebelumnya. Bagaimanapun, hal ini bukan masalah. Sifat-sifat luar biasa dari air dijelaskan oleh hipotesis berikut: meskipun molekul air cukup rapat pada waktu padat dibandingkan pada waktu cair, molekul tersebut berkelompok untuk membentuk kristal. Padat saat itu relatif besar jarak antara kristal dan padat dibandingkan dengan pada waktu meningkatnya jarak antar molekul yang dihitung pada peningkatan volume terbesar selama pemadatan. Hal ini berlaku juga untuk benda yang berbentuk kristal selain es.

3-2. Pengembangan Benda Padat dan Benda Cair

Ketika sebuah benda pada atau cair dipanaskan sehingga temperaturnya meningkat, maka akan mengembang jumlahnya untuk setiap derajat kenaikan temperatur. Telah dinyatakan sebelumnya, alat untuk mengukur beberapa temperatur menggunakan prinsip ini. Jumlah pengembangan yang dialami oleh benda pada setiap derajat kenaikan temperatur disebut **koefisien pengembangan**. Koefisien pengembangan berbeda untuk setiap benda dan selain itu, akan bervariasi untuk berbagai partikel benda bergantung pada rentang temperatur pada setiap perubahan yang terjadi.

Karena benda padat dan benda cair tidak siap untuk ditekan, jika benda padat atau cair ditahan atau dibatasi sehingga volumenya tidak dapat berubah. Biasanya dengan mengubah temperatur, terjadi tekanan yang besar pada zat tersebut dan menahan benda seperti yang disebabkan penekanan atau pemecahan zat, menahan benda atau keduanya. Untuk menjaga pengembangan normal dan penyusutan terjadi dengan perubahan temperatur, pengembangan terjadi bersama-sama di dalam jalan tol, jembatan saluran pipa dan lain-lain. Demikian juga wadah cairan tidak bias terisi penuh. Ruang harus disediakan untuk pengembangan normal. Sebaliknya pengembangan gaya yang besar umumnya oleh peningkatan temperatur yang akan menyebabkan bejana pecah, kadang-kadang dengan ledakan gaya.

3-3. Volume Spesifik

Volume spesifik benda adalah volume yang diberikan oleh 1 lb massa benda. Setiap benda mempunyai spesifik volume yang berbeda-beda dan disebabkan oleh volume yang disertai perubahan temperatur. Volume spesifik setiap benda berbeda-beda seperti rentang temperatur. Contoh: pada 40 °F, 1 lb air mempunyai volume spesifik 0,01602 cu ft, sedangkan volume yang diberikan oleh 1 lb air pada 80 °F adalah 0,01608 cu ft.

3-4. Berat Jenis (Density)

Berat jenis sebuah benda adalah berat dalam pound 1 cu ft benda. Berat jenis adalah berbanding terbalik dengan volume spesifik, yaitu volume spesifik dibagi ke dalam satu. Berat jenis beberapa benda, seperti volume spesifik, berbeda dalam setiap temperatur tetapi berlawanan arah. Contoh : pada 40 °F berat jenis air adalah 62,434 lb/cu ft (1/0,01602),

sedangkan pada 80 °F mempunyai berat jenis 62,20 lb/cu ft (1/0,01608). Karena berat jenis dan volume spesifik saling berbanding terbalik, yaitu yang satu meningkat dan yang satu menurun. Berat jenis dan atau volume spesifik pada beberapa benda dapat dicari dalam beberapa tabel.

Hubungan antara berat jenis dan volume jenis diberikan pada persamaan berikut :

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (3-1)$$

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (3-2)$$

$$V = M \times v \quad (3-3)$$

$$M = V \times \rho \quad (3-4)$$

Di mana :

v = Volume spesifik (cu ft/lb)

ρ = Berat jenis (lb/cu ft)

V = Volume total (cu ft)

M = Berat total (lb)

Contoh 3-1.

Jika volume spesifik dari uap jenuh kering pada 212 °F adalah 26,80 cu ft/lb, berapakah berat jenis uap itu ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-1

$$\text{Berat jenis } \rho = \frac{1}{26,80} = 0,0373 \text{ lb/cu ft}$$

Contoh 3-2.

Kolam cooling tower diukur 5 x 4 x 1 feet, diisi dengan air. Jika berat jenis air 26,8 lb/cu ft, berapakah berat total air pada kolam ?

Jawab :

$$\text{Total volume } V = 5 \times 4 \times 1 \text{ ft} = 20 \text{ cu ft}$$

Gunakan persamaan 3-4, Total berat air :

$$M = 20 \times 26,8 = 536 \text{ lb}$$

3-5. Hubungan Tekanan-Temperatur-Volume Gas

Karena kehilangan struktur molekul, perubahan dalam volume gas, seperti gas yang dipanaskan atau didinginkan lebih besar dari pada yang terjadi pada kasus benda padat dan cair. Pada bagian ini akan ditunjukkan bahwa suatu gas dapat berubah kondisi melalui banyak cara yang berbeda dan pada beberapa hukum yang telah dirumuskan yang ditentukan oleh hubungan antara tekanan, temperatur dan volume gas selama perubahan. Hal itu telah dicatat sebelumnya yaitu pada penggunaan hukum dasar gas yang selalu diperlukan untuk penggunaan temperatur absolut dan tekanan absolut oleh derajat Rankine. Selanjutnya, yang akan dibahas pada bagian ini, telah diingatkan bahwa gas selalu mengisi penuh setiap wadah.

Hubungan antara tekanan, temperatur dan volume suatu gas adalah lebih mudah dipahami ketika mempelajari beberapa seri proses dimana gas melewati beberapa kondisi awal ke beberapa kondisi akhir dalam satu langkah dan hanya dua cara yang dimiliki selama salah satu proses terjadi, sedangkan ada 3 bentuk sisa yang tidak bisa berubah atau konstan.

3.6. Hubungan Temperatur-Volume pada Tekanan Konstan.

Jika gas dipanaskan dibawah satu kondisi dimana tekanan dijaga agar tetap, maka volume akan meningkat $\frac{1}{492}$ dari volume pada 32°F untuk setiap peningkatan 1°F temperatur. Demikian juga, jika suatu gas didinginkan pada tekanan konstan, maka volume akan menurun $\frac{1}{492}$ dari volume pada 32°F untuk setiap penurunan 1°F temperatur.

Supaya penggambaran perubahan kondisi pada tekanan konstan lebih baik, diasumsikan bahwa gas disimpan dalam silinder dilengkapi dengan alat yang benar-benar pas, frictionless piston (Gambar 3-1a). Tekanan gas adalah tekanan pada gas oleh berat piston dan oleh berat atmosfer pada bagian atas piston. Karena piston bebas bergerak ke atas dan ke bawah dalam silinder, maka gas dapat mengembang atau mengkerut, yaitu mengubah volume dengan cara temperatur gas tetap konstan. Pada waktu gas dipanaskan, temperatur dan volume meningkat dan piston bergerak naik dalam silinder. Pada waktu gas didinginkan, temperatur dan volume menurun dan piston bergerak turun dalam silinder. Pada kasus lain, tekanan gas tetap sama atau berubah selama proses pemanasan atau pendinginan.

3-7. Hukum Charles untuk Proses Tekanan Konstan

Hukum Charles untuk proses tekanan konstan mempunyai pengaruh, yaitu ketika tekanan gas tetap konstan, volume gas langsung berubah dengan temperatur absolut. Kemudian, jika temperatur absolut gas digandakan pada waktu tekanan dijaga tetap konstan, maka volume juga akan digandakan. Demikian juga, jika temperatur absolut gas dikurangi 1,5 kali pada waktu tekanan dijaga tetap konstan, maka volume juga akan dikurangi 1,5 kali. Persamaan ini diilustrasikan dalam gambar 3-1b dan 3-1c.

Hukum Charles untuk proses tekanan konstan ditulis pada persamaan seperti di bawah ini; jika tekanan dijaga tetap konstan :

$$T_1 V_2 = T_2 V_1 \quad (3-5)$$

Dimana :

T_1 = Temperatur awal gas ($^{\circ}$ Rankine)

T_2 = Temperatur akhir gas ($^{\circ}$ Rankine)

V_1 = Volume awal gas (cu ft)

V_2 = Volume akhir gas (cu ft)

Jika tiga macam nilai lebih dahulu diketahui, maka yang keempat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3-5.

Contoh 3-3.

Sebuah gas mempunyai temperatur awal 520 $^{\circ}$ R dan volume awal 5 cu ft, melakukan ekspansi pada tekanan konstan sampai volumenya 10 cu ft. Tentukan temperatur akhir gas pada derajat Rankine.

Jawab : Gunakan persamaan 3-5

$$\text{Temperatur akhir gas, } T_2 = \frac{T_1 V_2}{V_1} = \frac{520 \times 10}{5} = 1040 \text{ }^{\circ}\text{R}$$

Contoh 3-4.

Sebuah gas mempunyai temperatur awal 80 $^{\circ}$ F didinginkan pada tekanan konstan sampai temperatur 40 $^{\circ}$ F. Jika volume awal gas 8 cu ft, berapakah volume akhir ?

Jawab :

Ketika temperatur diberikan dalam derajat Fahrenheit, maka harus dikonversi ke derajat Rankine sebelum dimasukkan ke dalam persamaan 3-5.

$$\text{Volume akhir } V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1} = \frac{500 \times 8}{540} = 7,4074 \text{ cu ft}$$

3-8. Hubungan Tekanan-Volume pada Temperatur Konstan

Ketika volume gas meningkat atau menurun di bawah suatu kondisi, maka temperatur gas tidak akan berubah, tekanan absolut akan terbalik dengan volume. Kemudian, ketika gas ditekan (volume menurun), maka temperatur tetap tidak berubah, tekanan absolut akan meningkat yang sebanding dengan penurunan volume. Secara bersamaan, ketika gas mengembang pada temperatur konstan, tekanan absolut akan menurun yang sebanding dengan peningkatan volume. Pernyataan tersebut adalah hukum Boyle untuk proses tekanan konstan dan digambarkan pada Gambar 3-2a, 3-2b, dan 3-2c.

Seperti telah dinyatakan sebelumnya bahwa molekul gas sering bertubrukan dengan yang lainnya dan dengan dinding wadah. Tekanan yang diberikan gas diwujudkan pada tubrukan. Milyaran dan milyaran molekul gas bergerak pada kecepatan tinggi menabrak dinding wadah pada setiap gesekan setiap detik. Hal tersebut tidak berhenti-henti molekul menyerang dengan menghasilkan tekanan gas yang akan menekan pada dinding wadah. Besarnya tekanan yang diberikan bergantung pada gaya dan frekuensi tubrukan molekul pada satu area. Gaya dan frekuensi tubrukan yang besar, besar pula tekanannya. Jumlah molekul yang tertahan dalam satu ruangan dan kecepatannya akan ditentukan oleh gaya dan frekuensi tubrukan. Yaitu, jumlah molekul yang besar (kuantitas yang besar) dan kecepatan molekul tinggi (temperatur gas tinggi), tekanannya tinggi. Gaya tubrukan molekul pada dinding wadah bergantung hanya pada kecepatan molekul. Kecepatan yang tinggi, maka gaya tubrukan akan sangat besar. Jumlah molekul yang mempunyai ruang yang besar dan kecepatan yang tinggi, molekul akan lebih sering menabrak dinding.

Ketika gas ditekan pada temperatur konstan, kecepatan molekul tetap tidak berubah. Peningkatan tekanan terjadi disebabkan oleh volume gas yang berkurang dan mempunyai jumlah molekul gas yang ditahan pada ruang yang kecil sehingga frekuensi tubrukan menjadi besar. Sebaliknya keadaan akan terjadi ketika gas mengembang pada temperatur konstan .

Pada beberapa proses thermodinamika yang terjadi seperti hal di atas yaitu temperatur yang bekerja pada zat tidak berubah selama proses disebut proses isothermal (temperatur konstan).

Hukum Boyle untuk proses temperatur konstan ditunjukkan oleh persamaan berikut; jika temperatur konstan:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (3-6)$$

Di mana :

P_1 = Tekanan absolut awal

P_2 = Tekanan absolut akhir

V_1 = Volume awal (cu ft)

V_2 = Volume akhir (cu ft)

Contoh 3-5.

5 lb udara mengembang pada temperatur konstan dan volume awal 4 cu ft sampai volume akhir 10 cu ft. Jika tekanan awal udara 20 psia, berapa tekanan akhir dalam psia ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-6

$$\text{Tekanan akhir } P_2 = \frac{P_1 \times V_1}{V_2} = \frac{20 \times 4}{10} = 8 \text{ psia}$$

Contoh 3-6.

4 cu ft gas akan dikembangkan pada temperatur konstan dari tekanan awal 1500 psfa sampai tekanan akhir 900 psfa. Hitunglah volume akhir gas ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-6

$$\text{Volume akhir gas } V_2 = \frac{P_1 \times V_1}{P_2} = \frac{1500 \times 4}{900} = 6,67 \text{ cu ft}$$

Contoh 3-7.

Berat suatu gas dari volume awal 10 cu ft ditekan secara isothermal sampai volumenya 4 cu ft. Jika tekanan awal gas 3000 psfa, tentukan tekanan akhir dalam psig ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-6

$$\text{Tekanan akhir } P_2 = \frac{P_1 \times V_1}{V_2} = \frac{3000 \times 10}{4} = 7500 \text{ psfa}$$

$$\text{Dibagi } 144 = \frac{7500}{144} = 52,08 \text{ psia}$$

$$\text{Dikurangi tekanan atmosfer} = 52,08 - 14,7 = 37,38 \text{ psig}$$

3-9. Hubungan Tekanan-Temperatur pada Volume Konstan

Diasumsikan bahwa suatu gas disimpan dalam silinder tertutup sehingga volumenya tidak akan berubah pada waktu dipanaskan atau didinginkan (Gambar 3-3a). Ketika temperatur gas meningkat oleh penambahan panas, tekanan absolut akan naik berbanding lurus dengan kenaikan temperatur absolut (Gambar 3-3b). Jika gas didinginkan, tekanan absolut gas akan menurun berbanding lurus dengan penurunan temperatur absolut (Gambar 3-3c).

Pada waktu temperatur (kecepatan molekul) gas ditingkatkan sedangkan volume gas (ruang pada molekul terbatas) tetap sama, besarnya tekanan (gaya dan frekuensi molekul menubruk dinding silinder) meningkat. Sedangkan, ketika gas didinginkan pada volume konstan, gaya dan frekuensi molekul menimpa dinding wadah berkurang dan tekanan gas akan berkurang dari sebelumnya. Penurunan gaya dan frekuensi tumbukan molekul disebabkan oleh penurunan kecepatan molekul.

3-10. Hukum Charles untuk Proses Volume Konstan

Hukum Charles menguraikan bahwa ketika gas didinginkan atau dipanaskan dibawah satu kondisi dimana volume gas tetap tidak berubah atau konstan, tekanan absolut berbanding lurus dengan temperatur absolut. Hukum Charles dapat ditulis pada persamaan berikut: jika volume yang sama :

$$T_1 P_2 = T_2 P_1 \quad (3-7)$$

Dimana :

T_1 = Temperatur awal ($^{\circ}$ Rankine)

T_2 = Temperatur akhir ($^{\circ}$ Rankine)

P_1 = Tekanan awal (psia)

P_2 = Tekanan akhir (psia)

Contoh 3-8.

Sejumlah berat suatu gas disimpan dalam tangki yang mempunyai temperatur awal 80 °F dan tekanan awal 30 psig. Jika gas dipanaskan sampai akhir tekanan ukur yaitu 50 psi, berapakah temperatur akhir dalam derajat Fahrenheit ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-7.

$$T_2 = \frac{T_1 x P_2}{P_1} = \frac{(80 + 460)x(50 + 14,7)}{30 + 14,7} = 782 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\text{Konversi } ^\circ\text{R ke } ^\circ\text{F} = 782 - 460 = 322 \text{ } ^\circ\text{F}$$

3-11. Hukum Umum Gas

Gabungan Hukum Charles dan Boyle menghasilkan persamaan berikut :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3-8)$$

Persamaan 3-8 adalah pernyataan bahwa untuk beberapa berat suatu gas dihasilkan tekanan psia dan volume dalam cu ft dibagi oleh temperatur absolut dalam derajat Rankine akan selalu konstan. Konstan di sini akan berbeda untuk setiap gas yang berbeda dan untuk gas yang lain akan memberikan berat yang berbeda-beda pada setiap gas. Jika suatu gas digunakan berat pound, kemudian V akan menjadi volume spesifik v , dan persamaan 3-8 dapat ditulis :

$$\frac{Pv}{T} = R \quad (3-9)$$

Di mana : R = konstanta gas

Konstanta gas R adalah berbeda untuk setiap gas. Konstan gas untuk beberapa gas dapat dilihat pada tabel. Sedikit diberikan pada tabel 3-1. Memperbanyak bentuk dari persamaan 3-9 oleh penambahan M :

$$PMv = MRT$$

Tetapi karena : $Mv = V$

$$\text{Maka} \quad PV = MRT \quad (3-10)$$

Di mana :

P = Tekanan (psfa)

V = Volume (cu ft)

M = Massa (lb)

R = Konstanta gas

T = Temperatur ($^{\circ}$ R)

Persamaan 3-10 disebut **Hukum Umum Gas** dan sering digambarkan dalam menyelesaikan beberapa persoalan menyangkut gas. Karena nilai R untuk beberapa gas dapat dicari dalam tabel, jika 3 dari 4 bentuk P, V, M dan T diketahui, maka bentuk ke 4 dapat ditentukan oleh persamaan 3-10. Catatan bahwa tekanan harus dalam *pound per square foot absolut* (psfa).

Contoh 3-9.

Tangki udara kompresor mempunyai volume 5 cu ft dan diisi oleh udara pada temperatur 100 $^{\circ}$ F. Jika alat ukur pada tangki terbaca 151,1 psia, berapakah berat udara dalam tangki ?

Jawab :

Dari tabel 3-1, R udara = 53,3

Gunakan persamaan 3-10.

$$\text{Berat udara, } M = \frac{(151,1 + 14,7) \times 144 \times 5}{53,3 \times (100 + 460)} = \frac{165,3 \times 144 \times 5}{53,3 \times 560} = 4 \text{ lb}$$

Contoh 3-10.

2 lb udara mempunyai volume 3 cu ft. Jika tekanan udara 135,3 psig, berapakah temperatur dalam derajat Fahrenheit ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-10

Dari tabel 3-1, R udara = 53,3

$$\text{Temperatur udara dalam } ^{\circ}\text{R}; T = \frac{PV}{MR} = \frac{(135,3 + 14,7) \times 144 \times 3}{2 \times 53,3} = \frac{150 \times 144 \times 3}{2 \times 53,3}$$

$$T = 607,9 \text{ } ^{\circ}\text{R}$$

$$\text{Konversi ke } ^{\circ}\text{F} = 607,9 - 460 = 147,9 \text{ } ^{\circ}\text{F}$$

3-12. Kerja Eksternal

Apabila suatu benda mengalami perubahan volume, maka kerja telah dilakukan. Jika volume benda meningkat, maka kerja telah dilakukan oleh benda tersebut. Jika volume benda menurun, maka kerja telah dilakukan pada benda tersebut. Contoh : dianggap sejumlah berat gas tersimpan dalam silinder yang dilengkapi dengan piston yang dapat bergerak (Gambar3-1a). Pada waktu gas dipanaskan, maka temperatur akan meningkat dan gas akan mengembang, piston bergerak ke atas silinder melawan tekanan atmosfer. Kerja dilakukan melalui berat piston yang bergerak sejauh beberapa jarak (Gambar 3-1b)*. Kerja dilakukan melalui pengembangan gas.

Agar dapat melakukan kerja, maka energi dibutuhkan (Bagian 1-12). Dalam gambar 3-1b, energi dibutuhkan untuk melakukan kerja yang disuplai pada gas pada waktu gas dipanaskan oleh sumber dari luar. Hal tersebut mungkin terjadi untuk gas yang melakukan kerja eksternal tanpa penambahan energi dari sumber luar. Seperti dalam kasus, gas akan bekerja pada waktu menggunakan energinya sendiri. Yaitu pada saat gas mengembang dan melakukan kerja, energi kinetik internal (temperatur) akan turun dalam jumlah yang sama dengan jumlah energi yang dibutuhkan untuk melakukan kerja.

Ketika gas ditekan (penurunan volume), sejumlah bekerja harus dilakukan pada gas tersebut agar dapat ditekan. Dan jumlah energi sama dengan jumlah kerja yang akan diberikan pada molekul-molekul gas selama ditekan. Gerakan energi mekanik piston akan dipindahkan ke dalam energi kinetik internal gas (gesekan molekul) dan kecuali kalau gas didinginkan selama kompresi. Temperatur gas akan meningkat berbanding lurus dengan sejumlah kerja. Meningkatnya temperatur gas pada waktu ditekan merupakan fenomena biasa dan dapat dilakukan oleh daya batang katup yang dilengkapi dengan hand pump atau tuas pada kompresor udara.

* Sejumlah kerja telah dilakukan, juga dalam mengatasi gesekan dan mengatasi tekanan atmosfer.

3-13. Persamaan Umum Energi

Hukum konversi energi telah menunjukkan bahwa energi dipindahkan dari satu benda harus dihitung seluruhnya. Hal tersebut ditunjukkan oleh beberapa bagian (atau semua) energi yang diambil oleh sebuah benda yang diserahkan pada benda pada saat kerja

dilakukan dan hanya beberapa bagian energi sisa yang dipindahkan yang tidak digunakan untuk melakukan kerja pada benda sebagai “energi thermal cadangan”. Jelaslah bahwa ketika semua energi dipindahkan pada suatu benda harus dihitung dalam satu bentuk atau beberapa kombinasi dari 3 cara berikut : (1) pada waktu meningkatnya energi kinetik internal, (2) pada waktu meningkatnya energi potensial internal, dan (3) pada waktu kerja dilakukan. Persamaan umum energi secara matematik pada konsep ini dapat ditulis :

$$\Delta Q = \Delta K + \Delta P + \Delta W \quad (3-11)$$

Di mana :

ΔQ = Energi panas yang dipindahkan pada benda (BTU)

ΔK = Sebagian energi yang dipindahkan pada waktu meningkatnya energi kinetik internal

ΔP = Sebagian energi yang dipindahkan pada waktu meningkatnya energi potensial internal

ΔW = Sebagian energi yang dipindahkan yang digunakan untuk melakukan kerja

Huruf Yunani Δ (delta) yang digunakan di depan huruf pada persamaan itu menunjukkan perubahan kondisi. Contoh : K menunjukkan energi kinetik internal, ΔK menunjukkan perubahan dalam energi kinetik internal.

Menunjuk pada proses khusus atau perubahan kondisi yaitu benda yang mengalami beberapa bentuk dalam persamaan 3-11 dapat mempunyai beberapa nilai positif atau negatif atau dapat sama dengan 0. Hal ini akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

3-14. Kerja Eksternal Benda Padat dan Benda Cair

Ketika panas ditambahkan pada benda pada atau benda cair temperatur benda akan meningkat. Benda sedikit mengembang dan sejumlah kecil kerja telah dilakukan. Meningkatnya volume dan kerja eksternal yang dilakukan sangat sedikit yang berbanding lurus dengan energi yang dipindahkan yang digunakan untuk melakukan kerja eksternal atau energi potensial internal yang meningkat dapat diabaikan. Untuk penggunaan praktis, dapat diasumsikan bahwa semua energi ditambahkan pada benda pada atau cair selama perubahan temperatur akan meningkatkan energi kinetik internal. Tidak ada ada yang

meninggalkan benda pada waktu kerja dilakukan dan tidak ada yang menyebabkan peningkatan energi potensial internal. Pada contoh ini, jika ΔP dan ΔW pada persamaan 3-11 sama dengan 0 dan oleh karena itu, ΔQ sama dengan ΔK .

Ketika benda padat melebur ke dalam phase cair, perubahan volume sangat kecil pada kerja eksternal yang dilakukan dan dapat diabaikan. Selanjutnya, karena temperatur juga tetap konstan selama perubahan phase, tidak ada peningkatan pemindahan energi pada energi kinetik internal. Semua energi diambil oleh peleburan benda padat yang menyebabkan meningkatnya energi potensial internal. Oleh karena itu, ΔK dan ΔW sama dengan 0 dan ΔQ sama dengan ΔP .

Kondisi ini tidak terjadi ketika benda cair berubah ke dalam phase uap. Perubahan volume akan terjadi dan oleh karena itu, kerja eksternal dilakukan pada waktu perubahan benda cair ke dalam uap terjadi. Contoh : ketika 1 lb air pada tekanan atmosfer berubah ke dalam uap, volumenya meningkat dari 0,01671 cu ft menjadi 26,79 cu ft. 970,4 BTU dibutuhkan untuk menguapkan 1 lb air, kira-kira 72 BTU energi yang dibutuhkan untuk melakukan kerja yang mengembang pada tekanan atmosfer. Sisa energi menyebabkan uap akan meningkat energi potensial internalnya. Pada contoh ini, hanya ΔK yang sama dengan 0, sehingga ΔQ sama dengan ΔP ditambah ΔW .

3-15. Gas Ideal atau Gas Sempurna

Berbagai macam hukum yang menentukan hubungan tekanan-volume-temperatur gas yang akan didiskusikan dalam bab ini dengan menggunakan ketelitian absolut pada hipotesis gas ideal atau sempurna. Gas sempurna digambarkan sebagai suatu kondisi dimana tidak ada interaksi antara molekul gas. Molekul gas tersebut seluruhnya bebas dan independen dari gaya tarik molekul lain. Karena itu, tidak ada energi yang dipindahkan ke atau dari suatu gas ideal yang mempunyai pengaruh pada energi potensial internal.

Konsep gas ideal atau gas sempurna sangat sederhana dalam menyelesaikan soal perubahan dalam kondisi suatu gas. Beberapa permasalahan yang rumit dalam mekanika elemen dibuat sederhana dengan mengasumsikan tidak ada gesekan yang terjadi, pengaruh gesekan dapat dianggap terpisah. Fungsi dari gas ideal adalah sama dengan kehilangan gesekan permukaan. Suatu gas ideal diasumsikan melewati perubahan kondisi tanpa

gesekan internal, yaitu tanpa performansi kerja internal dalam mengatasi gaya internal molekul.

Pemikiran gesekan internal tidaklah sulit untuk dipahami. Mengingat bahwa cairan, seperti oli tidak akan mengalir dengan mudah pada temperatur rendah. Hal tersebut, karena gesekan internal dihasilkan dari gaya antar molekul yang besar pada cairan. Oleh karena itu, pada waktu cairan dipanaskan dan molekul mendapatkan tambahan energi, gaya antar molekul dapat diatasi, gesekan internal berkurang dan cairan mengalir lebih mudah.

Penguapan cairan disebabkan oleh pemisahan molekul yang besar dan membawa zat yang mereduksi gesekan internal, tetapi beberapa interaksi antara molekul uap tetap terjadi. Dalam keadaan gas, gaya antar molekul sangat besar ketika gas mendekati fasa cair dan berkurang dengan cepat pada waktu gas dipanaskan dan temperatur terus naik dan terus sampai di atas temperatur jenuh. Gas mencapai keadaan ideal ketika kondisinya mencapai interaksi antar molekul, sebab itu, gesekan internal diabaikan.

Meskipun tidak ada gas yang benar-benar ideal atau sempurna terjadi, sejumlah gas seperti: air, nitrogen, hydrogen, helium dan lain-lain dapat mendekati kondisi ideal dengan beberapa kesalahan yang dapat dihasilkan dari keadaan zat tersebut menjadi ideal tanpa memperhatikan penggunaan praktisnya.

Meskipun hal tersebut penting, mempelajari refrigerasi harus mengerti dan mampu menggunakan hukum gas sempurna, hal tersebut akan dipahami bahwa gas pada keadaan normal terjadi dalam teknik refrigerasi siklus tertutup pada kurva jenuh, yaitu keadaan uap dan tidak akan mencapai kondisi gas ideal atau sempurna*. Hukum gas hanya dapat diambil dari cara yang umum dan oleh karena itu, hukum gas digunakan untuk menentukan hubungan tekanan-volume-temperatur uap yang akan dihasilkan sangat tidak akurat. Bekerja pada keadaan uap, biasanya diperlukan nilai untuk dipergunakan yang dapat ditentukan secara eksperimen, dan dapat ditabulasikan dalam tabel uap jenuh dan panas lanjut. Hal tersebut termasuk bagian dari buku ini dan dibahas berikutnya.

* Uap kadang-kadang didefinisikan sebagai gas pada saat kondisinya tertutup cukup untuk mencapai kurva jenuh sehingga uap tidak dapat mendekati hukum gas ideal.

3-16. Proses-proses untuk Gas Ideal

Suatu gas dikatakan mengalami proses ketika melewati beberapa keadaan awal atau kondisi awal sampai beberapa keadaan akhir atau kondisi akhir. Perubahan kondisi gas dapat terjadi dengan cara yang tidak terbatas, tetapi hanya ada 5 cara yang dibahas. Cara tersebut antara lain: 1) tekanan konstan (isobar), 2) volume konstan (isometerik), 3) temperatur konstan (isothermal, 4) adiabatik, dan 5) proses politropik.

Dalam menggambarkan gas ideal dapat dikatakan bahwa molekul gas selalu terpisah dan molekul tersebut tidak mempunyai gaya tarik satu sama lain, dan tidak ada energi yang diserap oleh gas ideal dan tidak mempunyai pengaruh pada energi potensial internal. Jelaslah bahwa, ketika panas diserap oleh gas ideal akan menaikkan energi kinetik internal (temperatur) gas atau akan meninggalkan gas sebagai kerja eksternal atau keduanya. Karena perubahan pada energi potensial internal, ΔP , akan selalu menjadi nol, persamaan umum energi untuk gas ideal dapat ditulis :

$$\Delta Q = \Delta K + \Delta W \quad (3-12)$$

Supaya dapat dimengerti lebih baik, perubahan energi terjadi selama berbagai proses harus selalu diingat bahwa perubahan pada temperatur gas menunjukkan perubahan pada energi kinetik internal gas, sebaliknya, perubahan pada volume gas menunjukkan kerja telah dilakukan oleh atau pada gas.

3-17. Proses Volume Konstan

Ketika gas dipanaskan pada saat itu juga gas ditahan dan volume tidak berubah, tekanan dan temperatur akan merujuk pada hukum Charles (Gambar 3-3). Karena volume gas tidak berubah, maka tidak ada kerja eksternal yang dilakukan dan ΔW sama dengan nol. Karena itu, untuk proses volume konstan ditunjukkan oleh huruf v kecil.

$$\Delta Q_v = \Delta K_v \quad (3-13)$$

Persamaan 3-13 dapat dinyatakan selama proses volume konstan semua energi dipindahkan pada gas sehingga energi kinetik internal gas meningkat. Tidak ada energi yang hilang pada waktu gas sedang bekerja.

Ketika gas didinginkan (panas dibuang) pada waktu volume tetap konstan, semua energi dibuang secara efektif pada pengurangan energi kinetik internal gas. Telah ditulis pada persamaan 3-12, ΔQ menunjukkan panas dipindahkan pada gas, ΔK menunjukkan

meningkatnya energi kinetik internal, dan ΔW menunjukkan kerja yang dilakukan oleh gas. Karena itu, jika panas diberikan oleh gas, maka ΔQ negatif. Sebaliknya, jika energi kinetik internal gas menurun, maka ΔK negatif, dan jika kerja dilakukan pada gas, maka ΔW negatif. Sebab itu, dalam persamaan 3-13, ketika gas didinginkan ΔQ dan ΔK negatif.

3-18. Proses Tekanan Konstan

Jika temperatur gas meningkat oleh penambahan panas pada waktu gas mulai mengembang dan tekanan dijaga tetap konstan, volume gas akan meningkat sesuai dengan hukum Charles (Gambar 3-1). Karena volume gas meningkat selama proses, maka kerja dilakukan oleh gas pada waktu yang sama sehingga energi internal meningkat. Sebab itu, pada waktu satu bagian dipindahkan, energi meningkat dan disimpan sebagai energi kinetik internal. Untuk proses tekanan konstan, ditunjukkan oleh huruf p kecil, persamaan energi dapat ditulis:

$$\Delta Q_p = \Delta K_p + \Delta W_p \quad (3-14)$$

3-19. Panas Spesifik Gas

Jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 lb gas 1 °F pada waktu volume tetap konstan disebut **panas spesifik pada volume konstan** (C_v). Juga sama, jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 lb gas 1 °F pada waktu gas mengembang pada tekanan konstan disebut **panas spesifik pada tekanan konstan** (C_p). Untuk beberapa bagian gas, panas spesifik pada tekanan konstan selalu lebih besar dari panas spesifik pada volume konstan. Alasannya mudah untuk dijelaskan.

Jumlah panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan energi kinetik internal gas lebih besar sehingga temperatur gas meningkat 1 °F yang semuanya sama untuk semua proses. Karena selama proses volume konstan tidak ada kerja yang dilakukan, energi hanya dibutuhkan untuk meningkatkan energi kinetik internal. Bagaimanapun, selama proses tekanan konstan, gas mengembang pada jumlah tertentu untuk setiap derajat kenaikan temperatur dan sejumlah kerja eksternal yang dilakukan. Oleh karena itu, selama proses tekanan konstan, energi digunakan untuk kerja yang harus diberikan untuk menambah peningkatan energi kinetik internal. Contoh : panas spesifik udara pada volume konstan adalah 0,169 BTU/lb, sebaliknya panas spesifik udara pada tekanan konstan adalah 0,2375

BTU/lb. Pada proses lain, peningkatan energi internal udara per derajat kenaikan temperatur adalah 0,169 BTU/lb. Pada proses tekanan konstan, ditambahkan 0,0685 BTU/lb ($0,2375 - 0,169$) sebagai energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan kerja dari meningkatnya volume yang diikuti oleh kenaikan temperatur.

Panas spesifik gas dapat bernilai positif atau negatif, bergantung pada jumlah kerja dari gas yang mengembang.

3-20. Perubahan dalam Energi Kinetik Internal

Selama beberapa proses dimana temperatur gas berubah, akan terjadi perubahan dalam energi kinetik internal gas. Dengan mengabaikan proses, temperatur menimbulkan berat gas meningkat atau menurun, perubahan pada energi kinetik internal dapat ditentukan oleh persamaan:

$$\Delta K = M C_v (t_2 - t_1) \quad (3-15)$$

Dimana :

ΔK = Peningkatan energi kinetik internal (BTU)

M = Berat (lb)

C_v = Panas spesifik pada volume konstan

t_2 = Temperatur akhir

t_1 = Temperatur awal

Catatan : temperatur dapat dalam satuan Fahrenheit atau Rankine, karena perbedaan dalam temperatur akan sama pada beberapa kasus selama satuan tersebut konsisten.

Contoh 3-11.

Temperatur 5 lb udara meningkat oleh penambahan panas dari temperatur awal 75 °F ke temperatur akhir 140 °F. Jika C_v udara 0,169 BTU/lb, berapakah peningkatan pada energi kinetik internal ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-15

$$\begin{aligned} \text{Peningkatan energi kinetik internal, } \Delta K &= 5 \times 0,169 \times (140 - 75) \\ &= 5 \times 0,169 \times 65 \\ &= 54,9 \text{ BTU} \end{aligned}$$

Contoh 3-12.

12 lb udara didinginkan dari temperatur awal 95 °F ke temperatur akhir 72 °F. Hitunglah peningkatan energi kinetik internal ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-15

$$\begin{aligned}\text{Peningkatan energi kinetik internal, } \Delta K &= 5 \times 0,169 \times (72 - 95) \\ &= 5 \times 0,169 \times -23 \\ &= -46,64 \text{ BTU}\end{aligned}$$

Pada contoh 3-12, ΔK negatif, menunjukkan bahwa gas didinginkan dan energi kinetik internal menurun bukannya meningkat.

3-21. Perpindahan Panas selama Proses Volume Konstan

Pada proses volume konstan, karena :

$$\Delta Q_v = \Delta K_v$$

Sehingga: $\Delta Q_v = M C_v (t_2 - t_1)$ (3-16)

Contoh 3-13.

Jika pada contoh 3-11, gas dipanaskan pada volume dijaga tetap konstan, berapa jumlah panas yang dipindahkan pada gas selama proses ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-16

$$\begin{aligned}\text{Panas yang dipindahkan pada gas, } \Delta Q_v &= 5 \times 0,169 \times (140 - 75) \\ &= 5 \times 0,169 \times 65 \\ &= 54,9 \text{ BTU}\end{aligned}$$

Jawaban lain;

Dari contoh 3-12 $\Delta K_v = 54,9 \text{ BTU}$

Karena $\Delta Q_v = \Delta K_v$ $\Delta Q_v = 54,9 \text{ BTU}$

Contoh 3-14.

Jika pada contoh 3-12, udara didinginkan pada volume tetap konstan, berapa jumlah panas yang dipindahkan pada udara selama proses ?

Jawab :

Dari persamaan 3-12, karena $\Delta Q_v = \Delta K_v$

$$\Delta K_v = -46,67 \text{ BTU}$$

$$\Delta Q_v = -46,67 \text{ BTU}$$

Pada contoh 3-14, ΔK_v negatif menunjukkan penurunan pada energi kinetik internal, ΔQ_v juga harus negatif, menunjukkan bahwa panas dipindahkan dari gas bukan dimasukkan.

3-22. Kerja Eksternal selama Proses Tekanan Konstan

Disini akan ditunjukkan bahwa kerja dilakukan selama proses tekanan konstan dapat dihitung oleh persamaan:

$$W = P (V_2 - V_1) \quad (3-17)$$

Dimana :

W = Kerja yang dilakukan (ft-lb)

P = Tekanan (psfa)

V_2 = Volume akhir (cu ft)

V_1 = Volume awal (cu ft)

Diasumsikan bahwa piston pada gambar 3-1c sebagai luas A sq ft dan tekanan gas dalam silinder adalah P lb/sq ft. Kemudian, total gaya yang bekerja pada atas piston akan menjadi PA lb, atau :

$$F = P \times A$$

Sekarang diasumsikan bahwa gas dalam silinder mempunyai volume awal V_1 , dipanaskan dan dapat mengembang menjadi volume V_2 pada tekanan dijaga tetap konstan. Sehingga, gaya PA yang bekerja mempunyai jarak 1 dan kerja dilakukan. Sebab itu,

$$W = P \times A \times 1$$

Tetapi karena :

$$A \times 1 = (V_2 - V_1)$$

Sehingga

$$W = P (V_2 - V_1)$$

Contoh 3-15.

1 lb udara mempunyai volume awal 13,34 cu ft dan temperatur awal 70 °F dipanaskan dan dapat mengembang pada tekanan konstan 2117 psfa sampai volume akhir 15 cu ft. Tentukan jumlah kerja eksternal dalam ft-lb ?

Jawab : Gunakan persamaan 3-17

$$\begin{aligned}\text{Kerja dalam ft-lb, } W &= 2117 (15 - 13,34) = 2117 \times 1,66 \\ W &= 3514 \text{ ft-lb}\end{aligned}$$

Pada persamaan 3-12, ΔW selalu diberikan dalam satuan energi panas. Dengan menggunakan energi mekanik ekivalen (Bagian 3-16), W dalam ft-lb dapat dinyatakan sebagai ΔW dalam BTU. Hubungan tersebut :

$$\Delta W = \frac{W}{J} \quad (3-18)$$

$$W = \Delta W \times J \quad (3-19)$$

Contoh 3-16.

Nyatakan kerja yang dilakukan pada contoh 3-15 dalam satuan energi panas.

Jawab : Gunakan persamaan 3-18

$$\text{Kerja dalam BTU, } W = \frac{3514}{778} = 4,52 \text{ BTU}$$

3-23. Perpindahan Panas selama Proses Tekanan Konstan

Menurut persamaan 3-14, ΔQ_v , total panas yang dipindahkan pada gas selama proses tekanan konstan sama dengan jumlah ΔK_v , peningkatan energi kinetik internal, dan ΔW_v energi panas ekivalen dengan pengembangan kerja.

Contoh 3-17.

Hitunglah total energi panas yang dipindahkan pada udara selama proses tekanan konstan seperti digambarkan pada contoh 3-15.

Jawab :

$$\text{Konversikan } 70 \text{ }^\circ\text{F ke } ^\circ\text{R, } R = 70 + 460 = 530 \text{ }^\circ\text{R}$$

Gunakan hukum Charles, $T_2 = \frac{T_1 \times V_2}{V_1}$

Persamaan 3-5, untuk menentukan temperatur akhir.

$$T_2 = \frac{530 \times 15}{13,34} = 596 \text{ }^\circ\text{R}$$

Gunakan persamaan 3-15, peningkatan energi kinetik internal,

$$\begin{aligned}\Delta K &= 1 \times 0,169 \times (596 - 530) \\ &= 1 \times 0,169 \times 66 \\ &= 11,154 \text{ BTU}\end{aligned}$$

Dari contoh 3-15 dan 3-16; $\Delta W_v = 4,52 \text{ BTU}$;

Gunakan persamaan 3-14;

$$\begin{aligned}\Delta Q_v &= 11,15 + 4,52 \\ &= 15,67 \text{ BTU}\end{aligned}$$

Karena panas spesifik pada tekanan konstan C_p , memberikan nilai yang tidak hanya meningkatkan energi internal per pound tetapi juga kerja yang dilakukan per pound per derajat kenaikan temperatur selama pengembangan pada tekanan konstan, hanya pada proses tekanan konstan, ΔQ_v dapat ditentukan oleh persamaan:

$$\Delta Q_v = M C_p (t_2 - t_1) \quad (3-20)$$

Sebab itu, jawaban dari contoh 3-17; Gunakan persamaan 3-20;

$$\begin{aligned}\Delta Q_v &= 1 \times 0,2375 \times (596 - 530) \\ &= 1 \times 0,2375 \times 66 \\ &= 15,67 \text{ BTU}\end{aligned}$$

3-24. Diagram Tekanan-Volume (Diagram PV)

Persamaan 3-8 suatu pernyataan bahwa sifat-sifat thermodinamika dari suatu gas digambarkan secara jelas oleh dua keadaan gas. Sebab itu, penggunaan dua keadaan gas secara matematika sebagai koordinat, sifat-sifat thermodinamika suatu gas secara cepat dapat ditunjukkan sebagai satu titik pada grafik. Selanjutnya, ketika suatu gas di bawah satu kondisi dimana melewati dari suatu keadaan awal ke suatu keadaan akhir dapat diketahui melalui suatu proses yang dibuat kelihatan sebagai garis pada grafik.

Secara grafik digambarkan suatu proses atau siklus yang disebut diagram proses atau siklus diagram dan digunakan sebagai alat untuk menganalisis dan penyelesaian soal-soal siklus.

Karena kerja sebagai fungsi dari tekanan dan volume, ketika tekanan dan volume bekerja pada proses atau siklus yang harus diperhatikan, sifat-sifat yang digunakan sebagai koordinat biasanya tekanan dan volume. Jika tekanan dan volume digunakan sebagai koordinat pada diagram proses atau siklus disebut diagram Tekanan-Volume (PV).

Untuk menggambarkan menggunakan diagram PV, proses pada diagram tekanan-volume digambarkan pada contoh 3-15 yang ditunjukkan dalam Gambar 3-4. Catatan : tekanan dalam psfa digunakan pada koordinat vertical, sebaliknya volume dalam cu ft digunakan sebagai koordinat horizontal.

Pada contoh 3-15, kondisi awal gas mempunyai tekanan 2117 psfa dan volume 13,34 cu ft. Untuk menentukan keadaan awal gas pada grafik PV, dimulai dari awal dan maju ke atas sepanjang garis sumbu tekanan vertical yang menunjukkan tekanan 2117 psfa. Gambar garis putus-putus parallel dari garis awal melewati titik ini dan memotong grafik. Selanjutnya, dari titik awal maju ke kanan sepanjang garis horizontal sumbu volume yang menunjukkan volume 13,34 cu ft. Gambar melewati garis ini dengan garis putus-putus vertical dan melewati grafik. Titik potong garis putus-putus pada titik 1 menunjukkan awal sifat-sifat termodinamika gas.

Menurut contoh 3-15, gas dipanaskan dan mengembang pada tekanan konstan sampai volumenya 15 cu ft. Karena tekanan tetap sama selama proses, maka keadaan titik tersebut menunjukkan keadaan akhir gas yang ditarik sepanjang garis tekanan konstan yang telah ada. Titik yang ada pada garis tekanan menunjukkan akhir keadaan 2 yang ditentukan oleh titik potong garis yang ditarik sampai titik pada sumbu volume yang diidentifikasi sebagai volume akhir.

Dalam pada itu, dari keadaan awal 1 sampai keadaan akhir 2 udara melewati angka sifat-sifat termodinamika lajut, semuanya dapat ditunjukkan oleh titik yang akan ditarik dari sepanjang garis 1 sampai 2. Garis 1 sampai 2 menunjukkan adanya proses yang akan diikuti oleh sifat-sifat termodinamika gas yang erubah dari 1 ke 2, dan proses diagram PV seperti pada gambar.

Luas segiempat adalah hasil dari dua luas. Pada Gambar 3-4, luas segiempat, $1-2-V_2-V_1$ (yang diarsir) adalah hasil dari tinggi P dan alas (V_2-V_1) . Tetapi menunjuk pada persamaan 3-17, hasil $P (V_2-V_1)$ adalah kerja eksternal yang dilakukan selama proses tekanan konstan. Hal tersebut jelas, bahwa luas antara diagram proses dan sumbu volume adalah mengukur kerja eksternal yang dilakukan selama proses dalam ft-lb. Luas ini sering disebut sebagai “luas di bawah kurva”.

Gambar 3-5 adalah diagram PV pada proses volume konstan. Diasumsikan bahwa kondisi awal gas pada saat mulai proses yaitu pada tekanan 2000 psfa dan volume 4 cu ft. Gas dipanaskan pada waktu volume dijaga konstan sampai tekanan meningkat 4000 psfa. Proses diambil sepanjang garis volume konstan dari kondisi awal 1 ke kondisi akhir 2.

Hal tersebut dinytakan bahwa tidak ada kerja yang dilakukan selama proses kecuali volume gas berubah. Pengujian diagram PV pada Gambar 3-5 akan menunjukkan bahwa tidakada kerja yang ditunjukkan untuk proses volume konstan, karena garis hanya mempunyai satuan panjang, maka tidak ada luas antara diagram proses dan alas atau sumbu volume. Sebab itu tidak ada kerja yang dilakukan.

3-25. Proses Temperatur Konstan

Menurut hukum Boyle, ketika gas ditekan atau mengembang pada temperatur konstan, tekanan akan berbanding terbalik dengan volume. Tekanan meningkat pada waktu gas ditekan dan tekanan akan menurun pada waktu gas mengembang. Karena gas akan melakukan kerja pada waktu mengembang, jika temperatur tetap konstan, energi akan melakukan kerja yang harus diserap dari sumber luar (Gambar 3-2b). karena temperatur gas tetap konstan, semua energi diserap oleh gas, selama proses gas ke luar sebagai kerja, tidak ada yang disimpan oleh gas yang akan meningkatkan energi internal.

Ketika gas ditekan, kerja dilakukan pada gas, dan jika gas tidak didinginkan selama kompresi, energi internal gas akan meningkat oleh sejumlah yang sama dengan kerja kompresi. Oleh karena itu, jika temperatur gas tetap konstan selama kompresi, gas harus membuang panas ke beberapa benda luar sejumlah panas yang sama dengan jumlah kerja yang dilakukan pada gas selama kompresi (Gambar 3-2c).

Tidak ada perubahan pada energi kinetik internal selama proses temperatur konstan. Oleh karena itu, dalam persamaan 3-12, ΔK sama dengan nol dan persamaan umum energi untuk proses temperatur konstan dapat ditulis:

$$\Delta Q_t = \Delta W_t \quad (3-21)$$

3-26. Kerja pada Proses Isothermal

Diagram PV pada ekspansi isothermal ditunjukkan pada Gambar 3-6. Pada proses temperatur konstan tekanan dan volume berubah sesuai dengan hukum Boyle. Hal tersebut dapat diikuti oleh ekspansi isothermal yang ditunjukkan oleh garis 1 ke 2 dan kerja dari proses dalam ft-lb yang ditunjukkan oleh luas 1-2-V₂-V₁. Luas 1-2-V₂-V₁, dan oleh karena itu, kerja dari proses dapat dihitung oleh persamaan :

$$W = P_1 V_1 \times \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3-22)$$

Di mana : ln = logaritma natural (log berbasis e)

Contoh 3-18.

Berat suatu gas mempunyai tekanan awal 2500 psfa dan volume awal 2 cu ft, mengembang secara isothermal sampai volume 4 cu ft. Tentukan :

- Tekanan akhir gas (psfa)
- Kerja yang dilakukan oleh gas dalam satuan energi panas.

Jawab : Gunakan hukum Boyle dan persamaan 3-6

- Tekanan akhir gas, $P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{2500 \times 2}{4} = 1250$ psfa

- Gunakan persamaan 3-22, kerja eksternal pada proses dalam ft-lb :

$$W = 2500 \times 2 \times \ln \frac{4}{2} = 2500 \times 2 \times \ln 2 = 2500 \times 2 \times 0,693$$

$$W = 3465 \text{ ft-lb}$$

Menggunakan persamaan 3-18 kerja dalam satuan energi panas :

$$\Delta W = \frac{3465}{778}$$

$$\Delta W = 4,45 \text{ BTU}$$

Contoh 3-19.

Berat suatu gas mempunyai tekanan awal 1250 psfa dan volume awal 4 cu ft, ditekan secara isothermal sampai volume 2 cu ft. Tentukan :

- c. Tekanan akhir gas (psfa)
- d. Kerja yang dilakukan oleh gas dalam BTU

Jawab : Gunakan hukum Boyle dan persamaan 3-6

c. Tekanan akhir gas, $P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{1250 \times 4}{2} = 2500$ psfa

- d. Gunakan persamaan 3-22, kerja eksternal pada proses dalam ft-lb :

$$W = 2500 \times 2 \times \ln \frac{2}{4} = 2500 \times 2 \times \ln 0,5 = 2500 \times 2 \times -0,693$$

$$W = -3465 \text{ ft-lb}$$

Menggunakan persamaan 3-18, kerja dalam satuan energi panas :

$$\Delta W = \frac{-3465}{778}$$

$$\Delta W = -4,45 \text{ BTU}$$

Catatan : proses pada contoh 3-19 adalah kebalikan dari contoh 3-18. Di mana proses pada contoh 3-18 adalah ekspansi dan proses pada contoh 3-19 adalah kompresi. Kedua proses terjadi antara dua kondisi yang sama, kecuali pada awal dan akhir kondisi yang menunjukkan kebalikan. Catat juga bahwa mengingat kerja yang dilakukan oleh gas selama ekspansi, maka kerja dilakukan pada gas selama proses kompresi. Tetapi karena perubahan kondisi yang terjadi antara kedua kasus mempunyai batas yang sama, jumlah kerja yang dilakukan pada setiap kasus adalah sama.

3-27. Perpindahan Panas selama Proses Temperatur Konstan

Karena tidak ada perubahan temperatur selama proses isothermal, maka tidak ada perubahan pada energi kinetik internal dan ΔK sama dengan nol. Menurut persamaan 3-21, energi panas dipindahkan selama proses temperatur konstan sama persis dengan kerja yang dilakukan dalam BTU. Selama ekspansi isothermal panas dipindahkan pada gas yang menyuplai energi untuk melakukan kerja yang dilakukan oleh gas. Sebaliknya, selama

kompresi isothermal panas dipindahkan dari gas menjadi energi internal gas sehingga energi internal gas tidak dapat meningkatkan oleh performansi kerja pada gas.

Contoh 3-20.

Tentukan jumlah panas yang dipindahkan pada gas selama ekspansi temperatur konstan yang digambarkan pada contoh 3-18.

Jawab :

Dari contoh 3-18 : $\Delta W = 4,45 \text{ BTU}$

Karena pada proses isothermal ΔW_t sama dengan ΔQ_t ;

$$\Delta Q_t = 4,45 \text{ BTU}$$

Contoh 3-21.

Berapa jumlah panas yang pindahkan pada gas selama proses temperatur konstan yang digambarkan pada contoh 3-19.

Jawab :

Dari contoh 3-18 : $\Delta W = - 4,45 \text{ BTU}$

Karena pada proses isothermal ΔW_t sama dengan ΔQ_t ;

$$\Delta Q_t = - 4,45 \text{ BTU}$$

Catatan : jumlah negatif panas yang pindahkan pada gas menunjukkan bahwa panas sejumlah ini sebenarnya diberikan oleh gas selama proses.

3-28. Proses Adiabatik

Proses adiabatik digambarkan sebagai satu perubahan gas pada kondisi di mana tidak ada penyerapan atau pembuangan panas, seperti dari atau ke luar benda selama proses. Selanjutnya, tekanan, volume dan temperatur gas semuanya selama proses adiabatic tidak ada yang konstan.

Ketika mengembang secara adiabatic, ekspansi pada yang lain, gas melakukan kerja eksternal dan energi dibutuhkan untuk melakukan kerja. Pada proses sebelumnya digambarkan, gas menyerap energi untuk melakukan kerja dari sumber luar. Karena selama proses adiabatik tidak ada panas yang diserap dari sumber luar, maka gas harus melakukan kerja eksternal pada energinya sendiri. Ekspansi adiabatik selalu disertai oleh penurunan

temperatur gas pada waktu gas memberikan energi internalnya untuk melakukan kerja (Gambar 3-7).

Ketika gas ditekan secara adiabatik, kerja dilakukan pada gas oleh benda luar. Energi gas meningkat yang jumlahnya sama dengan yang diberikan oleh gas pada benda luar selama kompresi, energi panas ekuivalen dengan kerja yang dilakukan pada gas sehingga meningkatkan energi internal dan temperatur gas meningkat.

Karena tidak ada panas, seperti yang dipindahkan ke atau dari gas selama proses adiabatik, ΔQ_a selalu nol dan persamaan energi untuk proses adiabatik dapat ditulis:

$$\Delta K_a + \Delta W_a = 0 \quad (3-23)$$

Oleh karena itu,

$$\Delta W_a = -\Delta K_a \quad \text{dan} \quad \Delta K_a = \Delta W_a$$

3-29. Kerja pada Proses Adiabatik

Kerja pada proses adiabatik dapat dihitung oleh persamaan berikut :

$$W_a = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{k - 1} \quad (3-24)$$

Di mana k = perbandingan panas spesifik gas dengan persamaan C_p/C_r

Contoh 3-22.

Suatu gas mempunyai tekanan awal 2500 psfa dan volume 2 cu ft mengembang secara adiabatik menjadi volume 4 cu ft. Jika tekanan akhir gas 945 psfa, tentukan kerja eksternal yang dilakukan dalam satuan energi panas.

Jawab :

C_v untuk udara = 0,2375 BTU/lb

C_r untuk udara = 0,169 BTU/lb

Perbandingan panas spesifik, $k = C_p/C_r = \frac{0,2375}{0,169} = 1,406$

Gunakan persamaan 3-24, kerja ekspansi adiabatik dalam ft-lb:

$$W_a = \frac{(2500 \times 2) - (945 \times 4)}{1,406 - 1} = \frac{1220}{0,406} = 3005 \text{ ft-lb}$$

Gunakan persamaan 3-18, kerja dalam satuan energi panas :

$$\Delta W_a = \frac{3005}{778} = 3,86 \text{ BTU}$$

Contoh 3-23

Suatu gas mempunyai tekanan awal 945 psfa dan volume 4 cu ft ditekan secara adiabatik sampai volumenya 2 cu ft. Jika tekanan akhir udara 2500 psfa, berapa banyak kerja yang dilakukan dalam satuan energi panas ?

Jawab :

Dari soal 3-22 perbandingan panas spesifik udara , $k = C_p/C_r = \frac{0,2375}{0,169} = 1,406$

Gunakan persamaan 3-24, kerja yang dilakukan dalam ft-lb:

$$W_a = \frac{(945 \times 4) - (2500 \times 2)}{1,406 - 1} = \frac{3780 - 5000}{0,406} = \frac{-1220}{0,406} = -3005 \text{ ft-lb}$$

Gunakan persamaan 3-18, kerja dalam satuan energi panas :

$$\Delta W_a = \frac{-3005}{778} = -3,86 \text{ BTU}$$

3-30. Perbandingan Proses Isothermal dan Proses Adiabatik

Perbandingan proses isothermal dan adiabatik adalah penting. Bilamana gas mengembang, kerja dilakukan oleh gas dan energi dari beberapa sumber dibutuhkan untuk melakukan kerja. Pada ekspansi isothermal, semua energi digunakan untuk kerja yang disuplai oleh gas dalam bentuk panas dari sumber luar. Karena energi disuplai pada gas dari sumber luar pada saat yang sama jumlah gas melakukan kerja, energi internal gas baik yang meningkat maupun yang menurun dan temperatur gas tetap konstan selama proses. Di lain pihak, pada ekspansi adiabatik tidak ada pemindahan panas pada gas selama proses dan semua kerja ekspansi dilakukan menggunakan energi internal gas. Oleh karena itu, energi internal gas selalu dikurangi oleh jumlah yang sama dengan jumlah kerja yang dilakukan dan temperatur gas jadi menurun.

Sekarang membahas proses isothermal dan proses kompresi adiabatik. Pada proses kompresi, kerja dilakukan pada gas oleh bagian yang ditekan, biasanya piston, dan jumlah energi sama dengan jumlah kerja yang dilakukan pada gas yang dipindahkan kepada gas

sebagai kerja. Selama proses kompresi isothermal, energi dipindahkan sebagai panas dari gas ke kotal bagian eksternal pada waktu yang sama sejumlah kerja sedang bekerja pada gas. Oleh karena itu, energi internal gas baik yang turun atau yang naik selama proses dan temperatur gas tetap konstan. Sebaliknya, selama kompresi adiabatik, tidak ada pemindahan energi panas dari gas ke bagian luar. Oleh karena itu, jumlah energi sama dengan jumlah kerja yang dilakukan pada gas sehingga menyebabkan naiknya energi internal dan temperatur gas jadi meningkat.

3-31. Proses Politropik

Barang kali ada cara sederhana untuk mendefinisikan proses politropik oleh perbandingan proses adiabatik dengan isothermal. Ekspansi isothermal, merupakan energi untuk melakukan kerja ekspansi yang disuplai seluruhnya dari sumber luar, dan ekspansi adiabatik merupakan energi untuk melakukan kerja ekspansi yang disuplai seluruhnya dari gas itu sendiri, dapat dijadikan sebagai batas ekstrim antara semua proses ekspansi yang terjadi. Kemudian, proses ekspansi lain merupakan energi untuk melakukan kerja ekspansi yang disuplai sebagian dari sumber luar dan sebagian dari gas itu sendiri yang dapat masuk melalui garis antara proses adiabatik dan isothermal (Gambar 3-8). Proses tersebut sebagai proses politropik. Jika selama ekspansi politropik lebih banyak energi untuk melakukan kerja yang diambil dari sumber luar, proses politropik akan lebih mendekati isothermal. Sebaliknya, jika sebagian besar energi yang digunakan untuk melakukan kerja eksternal yang diambil dari gas itu sendiri, proses lebih mendekati adiabatik.

Hal tersebut adalah benar, juga untuk proses kompresi. Ketika gas kehilangan panas selama proses kompresi, maka tidak pada waktu nilainya cukup untuk mempertahankan temperatur konstan, kompresi merupakan politropik. Kehilangan panas yang besar, proses politropik akan mendekati isothermal. Pada waktu kehilangan sedikit panas, proses politropik akan mendekati adiabatik. Jelas, ketika tidak ada kehilangan panas, proses menjadi adiabatik.

Penekanan gas yang sebenarnya pada kompresor biasanya akan mendekati kompresi adiabatik. Hal tersebut disebabkan waktu kompresi biasanya sangat pendek dan tidak mempunyai waktu cukup untuk memindahkan jumlah panas yang banyak dari gas melewati

dinding silinder ke sekelilingnya. Pemberian *water jacket* pada silinder biasanya akan meningkatkan jumlah panas yang dibuang keluar dari kompresi mendekati isothermal.

3-32. Hubungan PVT selama Proses Adiabatik

Karena temperatur, tekanan dan volume semuanya berubah selama proses adiabatik, semuanya tidak akan sesuai dengan hukum Charles dan hukum Boyle. Hubungan antara tekanan, temperatur dan volume selama proses adiabatik dapat dihitung oleh persamaan berikut:

$$T_2 = T_1 \times \frac{V_1^{(k-1)}}{V_2^{(k-1)}} \quad (3-25)$$

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \quad (3-26)$$

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \quad (3-27)$$

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/(k-1)} \quad (3-28)$$

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{1/(k-1)} \quad (3-29)$$

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/k} \quad (3-30)$$

Contoh 3-24.

Udara mengembang secara adiabatik dari volume 2 cu ft sampai 4 cu ft. Jika tekanan awal udara 24.000 psfa, berapa tekanan akhir dalam psfa ?

Jawab :

Dari tabel 3-1, k untuk udara = 1,406

Gunakan persamaan 3-27, tekanan akhir, P_2 ;

$$P_2 = 24.000 \times (2/4)^{1,406} = 24.000 \times 0,5^{1,406} = 24.000 \times 0,378$$

$$P_2 = 9072 \text{ psfa}$$

Contoh 3-25.

Udara mengembang secara adiabatik dari volume 2 cu ft sampai 4 cu ft. Jika temperatur awal udara 600 °R, berapa temperatur akhir dalam derajat Rankine ?

Jawab :

Dari tabel 3-1, k untuk udara = 1,406

Gunakan persamaan 3-25, temperatur akhir, T_2 ;

$$T_2 = 600 \times \frac{(2)^{(1,406-1)}}{(4)^{(1,406-1)}} = 600 \times \frac{(2)^{(0,406)}}{(4)^{(0,406)}} = 600 \times \frac{1,325}{1,756} = 600 \times 0,755$$

$$T_2 = 453 \text{ } ^\circ\text{R}$$

Contoh 3-26.

Udara mengembang secara adiabatik dari tekanan awal 24.000 psfa sampai tekanan akhir 9072 psfa. Jika temperatur awal udara 600 °R, berapa temperatur akhir dalam derajat Rankine ?

Jawab :

Dari tabel 3-1, k untuk udara = 1,406

Gunakan persamaan 3-26, temperatur akhir, T_2 ;

$$T_2 = 600 \times \left(\frac{9.072}{24.000} \right)^{(1,406-1)/1,406} = 600 \times (0,378)^{0,289} = 600 \times 0,755$$

$$T_2 = 453 \text{ } ^\circ\text{R}$$

3-33. Eksponen Kompresi dan Ekspansi Politropik

Hubungan tekanan-temperatur-volume untuk proses politropik dapat dihitung oleh persamaan 3-25 sampai 3-30, kecuali eksponen ekspansi dan kompresi politropik k diganti dengan n. Juga, kerja proses politropik dapat ditentukan oleh persamaan 3-24, jika k diganti dengan n.

Eksponen n akan selalu mempunyai nilai antara 1 dan k untuk gas yang mengalami proses *. Biasanya, nilai n harus ditentukan oleh mesin pengetes ekspansi dan kompresi yang terjadi. Pada beberapa contoh rata-rata nilai n untuk beberapa gas yang mengalami perubahan lebih besar atau kurang dari standar kondisi yang ditentukan pada tabel. Jika

nilai dua keadaan diketahui yaitu kondisi awal dan kondisi akhir, nilai n dapat dihitung. Contoh persamaan ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$n = \frac{\log(P_1/P_2)}{\log(V_1/V_2)} \quad (3-31)$$

* Nilai n bergantung pada panas spesifik gas selama proses. Karena panas spesifik dapat diambil beberapa nilai, maka secara teori n dapat mempunyai beberapa nilai. Pada mesin yang baik, n akan selalu mempunyai nilai yang mendekati antara 1 dan k.

Secara umum ditentukan, proses politropik pada beberapa proses selama panas spesifik tetap konstan. Pada penentuan di sini, lima proses telah didiskusikan pada bab ini sebagai proses politropik. Secara umum yang digunakan sekarang untuk membatasi bagian politropik yang diartikan hanya pada proses yang menggunakan garis antara proses isothermal dan adiabatik. Eksponen ekspansi dan kompresi isothermal dan adiabatik yaitu masing-masing 1 dan k. sebab itu, nilai n untuk proses politropik harus antara 1 dan k, proses politropik pendek mendekati adiabatik, n akan mendekati k.

Contoh 3-27.

Udara mempunyai tekanan awal 24.000 psfa sampai temperatur awal 600 °R mengembang secara politropik dari volume awal 2 cu ft menjadi 4 cu ft. Jika eksponen ekspansi politropik 1,2. Tentukanlah ?

- | | |
|-------------------------|--|
| a. Berat udara (lb) | d. Kerja yang dilakukan oleh gas (BTU) |
| b. Tekanan akhir (psfa) | e. Kenaikan energi internal |
| c. Temperatur (°R) | f. Panas yang dipindahkan pada gas |

Jawab :

- a. Dari tabel 3-1, R untuk udara = 53,3

$$\text{Dari persamaan 3-10, berat udara, } M = \frac{PV}{RT} = \frac{24.000 \times 2}{53,3 \times 600} = 1,5 \text{ lb}$$

- b. Gunakan persamaan 3-27, tekanan akhir, P_2 :

$$P_2 = 24.000 \times (2/4)^{1,2} = 24.000 \times 0,5^{1,2} = 24.000 \times 0,435$$

$$P_2 = 10.440 \text{ psfa}$$

- c. Gunakan persamaan 3-25, temperatur akhir, T_2 ;

$$T_2 = 600 \times \frac{(2)^{(1,2-1)}}{(4)^{(1,2-1)}} = 600 \times \frac{(2)^{0,2}}{(4)^{0,2}} = 600 \times \frac{1,149}{1,32}$$

$$T_2 = 522 \text{ °R}$$

d. Gunakan persamaan 3-24, kerja yang dilakukan :

$$W = \frac{(24.000 \times 2) - (4 \times 10.440)}{1,2 - 1} = \frac{48.000 - 41.700}{0,2} = \frac{6240}{0,2}$$

$$W = 31.200 \text{ ft-lb}$$

Gunakan persamaan 3-18, kerja dalam BTU,

$$\Delta W = \frac{31.200}{778} = 40,10 \text{ BTU}$$

e. Dari tabel 3-1, C_v untuk udara = 0,169 BTU/lb

Gunakan persamaan 3-15, kenaikan energi internal,

$$\begin{aligned} \Delta W &= 1,5 \times 0,169 \times (522 - 600) = 1,5 \times 0,169 \times (-78) \\ &= -19,77 \text{ BTU} \end{aligned}$$

f. Gunakan persamaan 3-9, pemindahan panas pada gas,

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta K + \Delta W = -19,77 + 40,10 \\ &= 20,33 \text{ BTU} \end{aligned}$$

Catatan, pada contoh 3-27, kerja yang dilakukan oleh udara pada eksponen politropik sama dengan 40,10 BTU. Jumlah tersebut, 20,33 BTU disuplai dari sumber luar, sisanya 19,77 BTU disuplai oleh gas itu sendiri, dengan demikian pengurangan energi kinetik internal oleh jumlah tersebut.

Soal Latihan

1. Tiga pound udara menempati volume 24 cu ft, tentukan :

a. Kekentalan (berat jenis) udara (Jawab : 0,125 lb/cu ft)

b. Volume spesifik (Jawab : 8 cu ft/lb)

2. Volume dan berat udara dijaga tetap konstan, pada waktu temperatur udara meningkat dari 35 °F ke 100 °F. Jika tekanan awal 25 psig, berapakah tekanan akhir udara dalam psig ? (Jawab : 28,47 psig).

3. Sejumlah berat udara disikan pada wadah yang didinginkan 150 °F menjadi 70 °F. Jika tekanan awal udara 36,3 psig, berapakah tekanan akhir udara dalam psig ? (Jawab : 29,6 psig)

4. Satu pound udara pada tekanan atmosfer mempunyai volume 13,34 cu ft pada temperatur 70 °F. Jika udara melewati heat exchanger dan dipanaskan sampai temperatur 150 °F dengan tekanan dijaga tetap konstan, berapa volume akhir udara ? (Jawab : 15,35 cu ft.)

5. Tabung oksigen mempunyai volume 5 cu ft. Alat ukur tekanan pada tabung dibaca 220 psi. Jika temperatur oksigen 85 °F, berapakah berat oksigen dalam tabung ? (Jawab : 60,6 lb)

6. Pada soal no.4, tentukan :
 - a. Kerja yang dilakukan oleh udara selama pemanasan. (Jawab : 425,8 ft-lb atau 5,47 BTU)
 - b. Kenaikan energi kinetik internal. (Jawab : 13,52 BTU)
 - c. Jumlah panas yang dipindahkan kepada gas. (Jawab : 19 BTU)

7. Sejumlah berat udara mempunyai volume awal 0,1334 cu ft dan temperatur awal 70 °F diisap ke dalam sisi suction kompresor udara. Jika udara masuk silinder pada tekanan atmosfer standard dan ditekan secara isothermal sampai tekanan akhir 150 psia, tentukan:
 - a. Berat udara dalam silindeer pada awal penekanan. (Jawab : 0,01 lb)
 - b. Temperatur akhir udara °R. (Jawab : 530 °R)
 - c. Volume udara pada akhir penekanan. (jawab : 0,0131 cu ft)
 - d. Kerja kompresi. (Jawab : 0,843 BTU).
 - e. Kenaikan atau penurunan energi internal. (Jawab : tidak ada)
 - f. Energi yang dipindahkan kepada gas selama kompresi. (Jawab : - 0,843 BTU).

8. Diasumsikan bahwa udara pada soal no.7 ditekan secara adiabatik, kemudian secara isothermal. Hitunglah ?

- a. Temperatur akhir udara $^{\circ}\text{R}$. (Jawab : 1038 $^{\circ}\text{R}$)
 - b. Volume udara pada akhir langkah kompresi (Jawab : 0,0256 cu ft)
 - c. Kerja kompresi. (Jawab : 0,86 BTU).
 - d. Kenaikan energi kinetik internal. (Jawab : 0,86 BTU)
 - e. Energi panas yang dipindahkan kepada atau dari gas selama kompresi. (Jawab : tidak ada).
9. Diasumsikan bahwa udara pada soal no.7 ditekan secara politropik, kemudian secara isothermal. Jika n sama dengan 1,2, hitunglah ?
- a. Temperatur akhir udara $^{\circ}\text{R}$. (Jawab : 779,4 $^{\circ}\text{R}$)
 - b. Volume udara pada akhir langkah kompresi (Jawab : 0,0192 cu ft)
 - c. Kerja kompresi. (Jawab : 0,85 BTU).
 - d. Penurunan energi kinetik internal. (Jawab : 0,45 BTU)
 - e. Energi panas yang dipindahkan dari gas selama kompresi. (Jawab : 0,40 BTU).
10. Bandingkan hasil soal no. 7, 8 dan 9.