



## **MODUL : THERMODINAMIKA 1**

**UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN**  
**Fakultas Teknik dan Komputer**  
**2021**

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah diktat mata kuliah Termodinamika 1 ( 21-3-09-3-3-02-4 ) ini berhasil disusun dengan semaksimal mungkin. Modul ini disusun mengacu pada silabus mata kuliah yang diberlakukan untuk program S1 yang disajikan pada tiap semester dengan jumlah SKS 4 (Empat). Modul ini diterbitkan untuk kalangan sendiri pada Program Teknik Mesin FAKULTAS TEKNIK DAN KOMPUTER UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN . Penulis mengucapkan terimakasih atas suport dan masukan yang diberikan teman teman Dosen di Fakultas Teknik dan Komputer Universitas Harapan Medan, selama penyusunan Modul ini.

Modul mata kuliah Termodinamika I ini diharapkan bisa membantu mahasiswa dalam memahami materi yang disampaikan Dosen. Dalam diktat ini menyajikan bermacam-macam contoh soal dan latihan soal dalam setiap BAB, yang mana mahasiswa diharapkan bisa memanfaatkan dengan baik untuk memperkuat pemahaman materi setiap BAB. Namun demikian, mahasiswa sebaiknya juga membaca buku-buku referensi yang lain tentang Proses Pengecoran Logam sehingga diperoleh informasi yang lebih lengkap dalam upaya memahami materi perkuliahan.

Bagaimanapun, diktat ini masih diperlukan perbaikan secara bertahap, oleh karena itu mohon kritik dan saran untuk kesempurnaan diktat ini.

Kami menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang membantu penulisan diktat ini. Semoga bermanfaat bagi pembaca.

Medan, Januari 2021

Penulis

( Ir.Junaidi,M.M.,M.T. )  
NIDN :0103036301

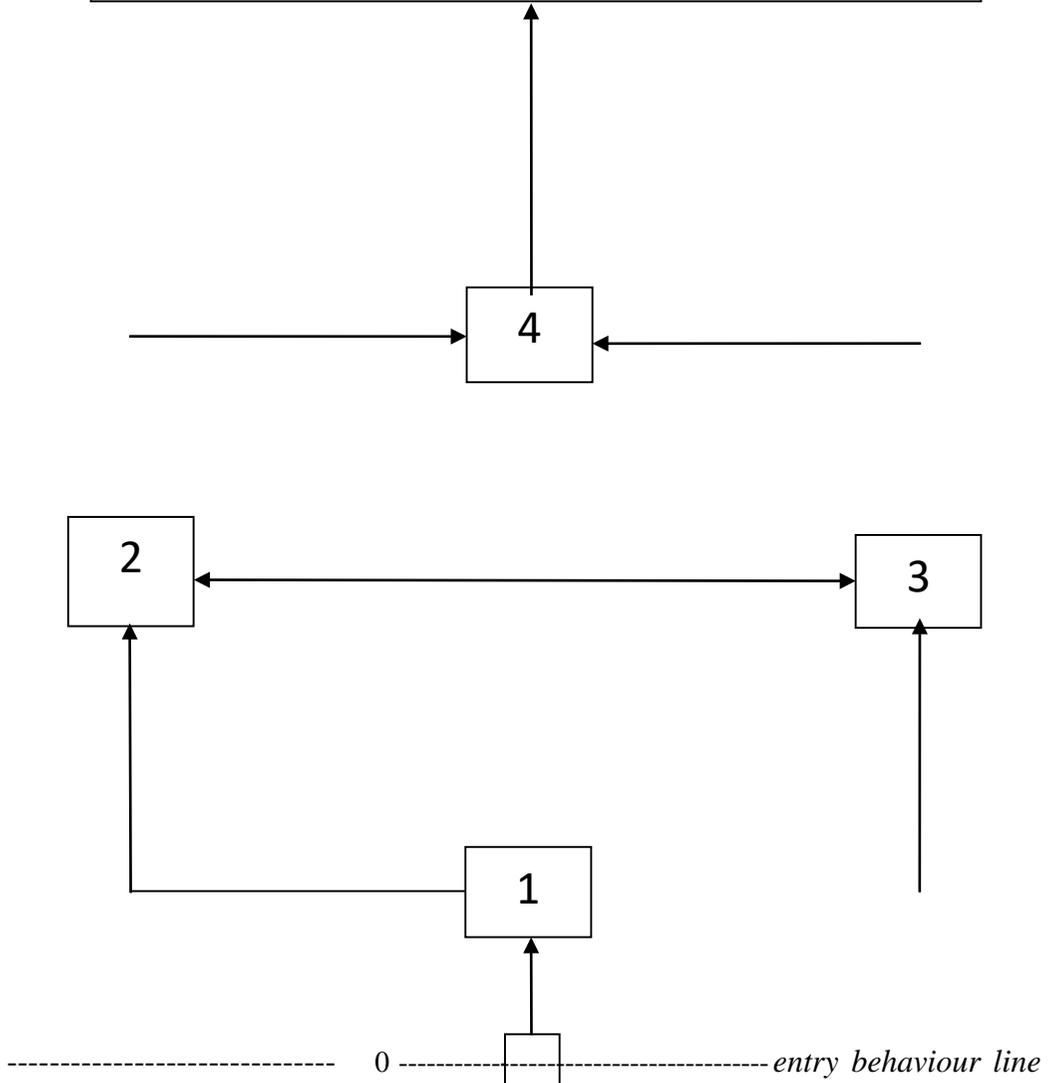
## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	2
KATA PENGANTAR.....	3
DAFTAR ISI.....	5
PETA KOMPETENSI.....	7
TINJAUAN MATA KULIAH.....	8
BAB I.....	9
PENGERTIAN DASAR TERMODINAMIKA.....	9
A. Pendahuluan.....	9
B. Penyajian.....	9
C. Penutup.....	20
BAB II.....	23
PERSAMAAN KEADAAN.....	23
A. Pendahuluan.....	23
B. Penyajian.....	23
C. Penutup.....	37
BAB III.....	45
HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA.....	45
A. Pendahuluan.....	45
B. Penyajian.....	45
C. Penutup.....	53
BAB IV.....	57
PENGUNAAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA.....	57
A. Pendahuluan.....	57
B. Penyajian.....	57
C. Penutup.....	152
DAFTAR PUSTAKA.....	155
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	157
SILABUS DAN SATUAN ACARA PERKULIAHAN.....	158
SENARAI.....	166



## PETA KOMPETENSI

Mahasiswa mampu: mengetahui dan menjelaskan pengertian dasar termodinamika, mengetahui persamaan-persamaan keadaan, mengetahui dan menjelaskan hukum pertama termodinamika, menggunakan hukum pertama termodinamika dan menerapkannya dalam penelitian bidang teknik mesin dan multidisiplin ilmu.



## **TINJAUAN MATA KULIAH**

Mata kuliah Termodinamika Teknik I merupakan salah satu mata kuliah di Jurusan Pendidikan Teknik Mesin yang termasuk dalam kelompok *Basic Science*. Mata kuliah ini mencakup pengertian dasar termodinamika di bidang teknik mesin. Termodinamika merupakan suatu ilmu yang mempelajari energi dan perubahannya. Selain itu juga mempelajari persamaan keadaan yaitu sebuah persamaan konstitutif yang menyediakan hubungan matematik antara dua atau lebih fungsi keadaan yang berhubungan dengan materi seperti temperatur, tekanan, volume dan energi dalam. Inti pelajaran mata kuliah ini pada hukum pertama termodinamika dan penerapannya dalam penelitian teknik mesin dan multidisiplin ilmu. Prinsip dasar dan hukum pertama termodinamika digunakan dalam memahami dan menganalisa unjuk kerja sistem teknik seperti turbin, kompresor, alat penukar kalor, refrigerator dan lain-lain.

# BAB I

## PENGERTIAN DASAR TERMODINAMIKA

### A. Pendahuluan

Penguasaan dasar mata kuliah Termodinamika teknik I perlu mempelajari tentang pengertian dasar termodinamika yang mencakup tentang: pandangan umum tentang termodinamika, sistem termodinamika, koordinat dan keadaan sistem, hukum-hukum dasar termodinamika, tekanan, dan termometer. Semua itu akan disajikan dalam penyajian materi dengan tujuan mahasiswa dapat mengetahui dan menjelaskan pengertian dasar termodinamika. Kemudian dilanjutkan dengan penutup yang berisi tentang rangkuman penyajian dan tes formatif beserta kunci jawabannya.

### B. Penyajian

#### 1. Pandangan umum tentang termodinamika

**Termodinamika** (bahasa Yunani: *thermos* = 'panas' and *dynamic* = 'perubahan') adalah fisika energi, panas, kerja, entropi dan kespontanan proses. Termodinamika berhubungan dekat dengan mekanika statistik dimana banyak hubungan termodinamika berasal. Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari hubungan antara energi serta perubahannya. Ada dua macam bentuk energi yang dipelajari dalam termodinamika yaitu panas dan kerja. Panas merupakan salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan dari suatu benda ke benda lain. Supaya panas dapat mengalir, harus ada suatu gaya dorong. Gaya dorong ini adalah perbedaan temperatur antara tempat, tempat dimana panas diterima dan dimana panas berasal. Sedangkan kerja didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya (*force*) dan jarak pergerakan dari gaya tersebut.

Termodinamika adalah ilmu tentang energi, yang secara spesifik membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja. Seperti telah diketahui bahwa energi di alam dapat terwujud dalam berbagai bentuk, selain energi panas dan kerja, yaitu energi kimia, energi listrik, energi nuklir, energi gelombang elektromagnetik, energi akibat gaya magnetik, dan lain-lain. Energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain, baik secara alami maupun hasil rekayasa teknologi. Selain itu energi di alam semesta bersifat kekal, tidak dapat dibangkitkan atau dihilangkan, yang terjadi adalah perubahan energi dari satu bentuk menjadi bentuk lain tanpa ada pengurangan atau penambahan. Prinsip ini disebut sebagai prinsip konservasi atau kekekalan energi. Prinsip termodinamika tersebut sebenarnya telah terjadi secara alami dalam kehidupan sehari-hari. Bumi setiap hari menerima energi gelombang elektromagnetik dari matahari, dan di bumi energi tersebut berubah menjadi energi panas, energi angin, gelombang laut, proses pertumbuhan

berbagai tumbuh-tumbuhan dan banyak proses alam lainnya. Proses di dalam diri manusia juga merupakan proses konversi energi yang kompleks, dari input energi kimia dalam makanan menjadi energi gerak berupa segala kegiatan fisik manusia, dan energi yang sangat bernilai yaitu energi pikiran kita.

Sejalan dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, maka prinsip alamiah dalam berbagai proses termodinamika direkayasa menjadi berbagai bentuk mekanisme untuk membantu manusia dalam menjalankan kegiatannya. Mesin-mesin transportasi darat, laut, maupun udara merupakan contoh yang sangat kita kenal dari mesin konversi energi, yang merubah energi kimia dalam bahan bakar atau sumber energi lain menjadi energi mekanis dalam bentuk gerak atau perpindahan di atas permukaan bumi, bahkan sampai di luar angkasa.

Pabrik-pabrik dapat memproduksi berbagai jenis barang, digerakkan oleh mesin pembangkit energi listrik yang menggunakan prinsip konversi energi panas dan kerja. Untuk kenyamanan hidup, kita memanfaatkan mesin *air conditioning*, mesin pemanas, dan *refrigerators* yang menggunakan prinsip dasar termodinamika.

Aplikasi termodinamika yang begitu luas dimungkinkan karena perkembangan ilmu termodinamika sejak abad 17 yang dipelopori dengan penemuan mesin uap di Inggris, dan diikuti oleh para ilmuwan termodinamika seperti Willian Rankine, Rudolph Clausius, dan Lord Kelvin pada abad ke 19. Pengembangan ilmu termodinamika dimulai dengan pendekatan makroskopik, yaitu sifat termodinamis didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi, yang disebut pendekatan termodinamika klasik. Pendekatan tentang sifat termodinamis suatu zat berdasarkan perilaku kumpulan partikel-partikel disebut pendekatan mikroskopis yang merupakan perkembangan ilmu termodinamika modern atau disebut termodinamika statistik. Pendekatan termodinamika statistik dimungkinkan karena perkembangan teknologi komputer, yang sangat membantu dalam menganalisis data dalam jumlah yang sangat besar.

Telah disampaikan sebelumnya bahwa energi dapat terwujud dalam berbagai bentuk, yaitu energi kimia, energi panas, energi mekanis, energi listrik, energi nuklir, energi gelombang elektromagnetik, energi gaya magnet, dan lain-lain. Suatu media pembawa energi dapat mengandung berbagai bentuk energi tersebut sekaligus, dan jumlah energinya disebut energi total ( $E$ ). Dalam analisis termodinamika sering digunakan energi total setiap satuan masa media ( $m$ ), yang disebut sebagai energi per-satuan masa ( $e$ ) yaitu,  $e=E/m$ . Berbagai bentuk energi di atas dapat pula dikelompokkan menjadi dua bentuk, yaitu energi makroskopik dan energi mikroskopik. Energi makroskopik adalah keberadaan energi ditandai dari posisinya terhadap lingkungannya atau terhadap suatu referensi yang ditentukan.

Contoh bentuk energi makroskopik adalah energi kinetik (KE) dan energi potensial (PE). Keberadaan energi mikroskopik ditentukan oleh struktur internal dari zat pembawa energi sendiri dan tidak tergantung kepada lingkungannya, yaitu struktur dan gerakan molekul zat tersebut. Energi mikroskopik ini disebut sebagai energi internal (U).

## 2. Sistem termodinamika

Sistem termodinamika secara luas bisa didefinisikan sebagai luas atau ruang tertentu dimana proses termodinamika terjadi. Atau adalah suatu daerah dimana perhatian kita difokuskan dalam mempelajari proses termodinamika. Sedikit observasi akan memperlihatkan bahwa sistem termodinamika mempunyai batas sistem, dan segala sesuatu yang ada di luar batas sistem disebut lingkungan. Batas sistem ini bisa saja berupa batas tetap seperti padatan yang berisi gas yang terkompresi, atau batas bergerak seperti yang dijumpai pada sejumlah volume cairan di dalam saluran pipa.

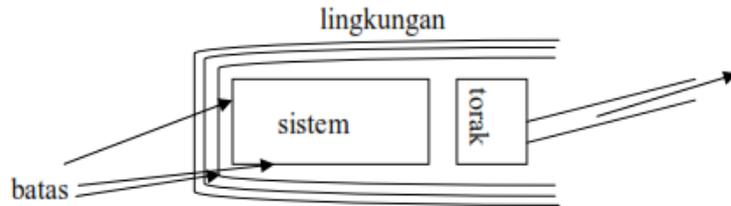
Sistem termodinamika adalah bagian dari alam semesta yang kita tinjau. Biasanya sistem adalah suatu batasan yang dipakai untuk menunjukkan suatu benda (benda kerja) dalam suatu permukaan tertutup. Sistem tersebut dibatasi oleh batas (*boundary*).

Lingkungan adalah bagian daerah yang terdapat di sekitar sistem yang ditentukan. Batas antara sistem dan lingkungan dapat berupa khayalan (*imaginary*) maupun berupa kenyataan sebenarnya (*real*). Misalnya; Udara dikompresi di dalam suatu silinder. Sistem adalah udara yang dikompresi dan permukaannya tertutup adalah permukaan yang dibatasi oleh silinder. Maka permukaan tertutup (batas) dalam hal ini adalah keadaan sebenarnya. Sebuah es terapung di atas air. Sistem yang dimaksud adalah es, dan permukaannya tertutup adalah permukaan khayalan dimana es dianggap dikelilingi oleh suatu permukaan tertutup.

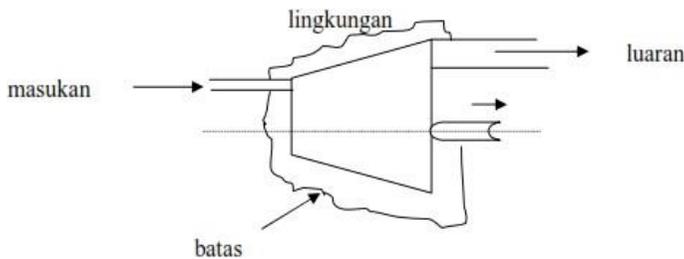
Es dan air masing-masing dengan temperatur 150 F dan 1500 F, dicampur dalam suatu bak, tentukan temperatur akhir dari sistem. Sistem dalam hal ini adalah campuran es dan air. Permukaan tertutup adalah permukaan yang dibatasi oleh bak, disini keadaannya adalah sebenarnya. Sedangkan temperatur akhir dari sistem adalah temperatur dari campuran es dan air. Ditinjau dari perpindahan energi dan massanya, sistem termodinamika dapat dibedakan menjadi 3 macam;

- Sistem tertutup (*closed system*) yaitu suatu sistem dimana hanya terjadi perpindahan energi dari atau ke lingkungan. Sebagai contoh; suatu sistem dibatasi oleh dinding silinder dan dinding torak. Pada sistem ini hanya terjadi perpindahan energi dalam bentuk kerja melalui torak

□



- Sistem terbuka (*open system*) yaitu suatu sistem dimana selain terjadi perpindahan energi juga terjadi perpindahan massa, dari atau ke lingkungannya. Sebagai contoh; suatu turbin dengan fluida tertentu sebagai penggerakannya.



- Sistem terisolasi/diisolasi (*isolated system*) yaitu suatu sistem dimana antara sistem dan lingkungannya tidak terjadi pertukaran/perpindahan energi maupun massa. Sistem ini sama sekali tidak dipengaruhi oleh perubahan-perubahan lingkungannya.

### 3. Koordinat dan keadaan sistem

Keadaan sistem bisa diidentifikasi atau diterangkan dengan besaran yang bisa diobservasi seperti volume, temperatur, tekanan, kerapatan dan sebagainya. Semua besaran yang mengidentifikasi keadaan sistem disebut sifat-sifat sistem. Sifat-sifat termodinamika bisa dibagi atas dua kelompok umum:

#### ➤ Sifat ekstensif

Besaran sifat dari sistem dibagi ke dalam beberapa bagian. Sifat sistem, yang harga untuk keseluruhan sistem merupakan jumlah dari harga komponen-komponen individu sistem tersebut, disebut sifat ekstensif. Contohnya, volume total, massa total, dan energi total sistem adalah sifat-sifat ekstensif.

#### ➤ Sifat intensif

Perhatikan bahwa temperatur sistem bukanlah jumlah dari temperatur-temperatur bagian sistem. Begitu juga dengan tekanan dan kerapatan sistem. Sifat-sifat seperti temperatur, tekanan dan kerapatan ini disebut sifat intensif.

Suatu sistem termodinamika adalah suatu masa atau daerah yang dipilih, untuk dijadikan obyek analisis. Daerah sekitar sistem tersebut disebut sebagai lingkungan. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut batas sistem (*boundary*), seperti terlihat pada Gambar berikut

dan sebagainya. Semua besaran yang mengidentifikasi keadaan sistem disebut sifat-sifat sistem.

Sifat-sifat termodinamika bisa dibagi atas dua kelompok umum:

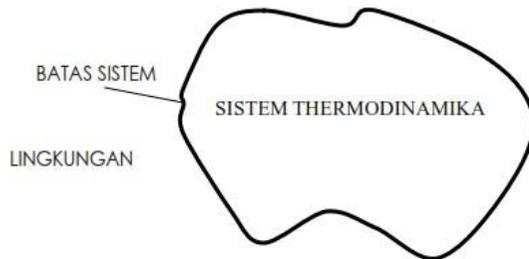
➤ Sifat ekstensif

Besaran sifat dari sistem dibagi ke dalam beberapa bagian. Sifat sistem, yang harga untuk keseluruhan sistem merupakan jumlah dari harga komponen-komponen individu sistem tersebut, disebut sifat ekstensif. Contohnya, volume total, massa total, dan energi total sistem adalah sifat-sifat ekstensif.

➤ Sifat intensif

Perhatikan bahwa temperatur sistem bukanlah jumlah dari temperatur-temperatur bagian sistem. Begitu juga dengan tekanan dan kerapatan sistem. Sifat-sifat seperti temperatur, tekanan dan kerapatan ini disebut sifat intensif.

Suatu sistem termodinamika adalah suatu masa atau daerah yang dipilih, untuk dijadikan obyek analisis. Daerah sekitar sistem tersebut disebut sebagai lingkungan. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut batas sistem (*boundary*), seperti terlihat pada Gambar berikut



Dalam aplikasinya batas sistem merupakan bagian dari sistem maupun lingkungannya, dan dapat tetap atau dapat berubah posisi atau bergerak.

Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut *property* dari sistem, seperti tekanan  $P$ , temperatur  $T$ , volume  $V$ , masa  $m$ , viskositas, konduksi panas, dan lain-lain. Selain itu ada juga *property* yang didefinisikan dari *property* yang lainnya seperti berat jenis, volume spesifik, panas jenis, dan lain-lain.

Suatu sistem dapat berada pada suatu kondisi yang tidak berubah, apabila masing-masing jenis *property* sistem tersebut dapat diukur pada semua bagiannya dan tidak berbeda nilainya. Kondisi tersebut disebut sebagai keadaan (*state*) tertentu dari sistem, dimana sistem mempunyai nilai *property* yang tetap. Apabila *property* nya berubah, maka keadaan sistem tersebut disebut mengalami perubahan keadaan. Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan disebut sistem dalam keadaan seimbang (*equilibrium*).

Perubahan sistem termodinamika dari keadaan seimbang satu menjadi keadaan seimbang lain disebut proses, dan rangkaian keadaan diantara keadaan awal dan akhir disebut lintasan proses seperti terlihat pada gambar berikut:



#### 4. Hukum-hukum Dasar Termodinamika

Terdapat empat Hukum Dasar yang berlaku di dalam sistem termodinamika, yaitu:

- **Hukum Awal (*Zeroth Law*) Termodinamika**

Hukum ini menyatakan bahwa dua sistem dalam keadaan setimbang dengan sistem ketiga, maka ketiganya dalam saling setimbang satu dengan lainnya.

- **Hukum Pertama Termodinamika**

Hukum ini terkait dengan kekekalan energi. Hukum ini menyatakan perubahan energi dalam dari suatu sistem termodinamika tertutup sama dengan total dari jumlah energi kalor yang disuplai ke dalam sistem dan kerja yang dilakukan terhadap sistem.

- **Hukum kedua Termodinamika**

Hukum kedua termodinamika terkait dengan entropi. Hukum ini menyatakan bahwa total entropi dari suatu sistem termodinamika terisolasi cenderung untuk meningkat seiring dengan meningkatnya waktu, mendekati nilai maksimumnya.

- **Hukum ketiga Termodinamika**

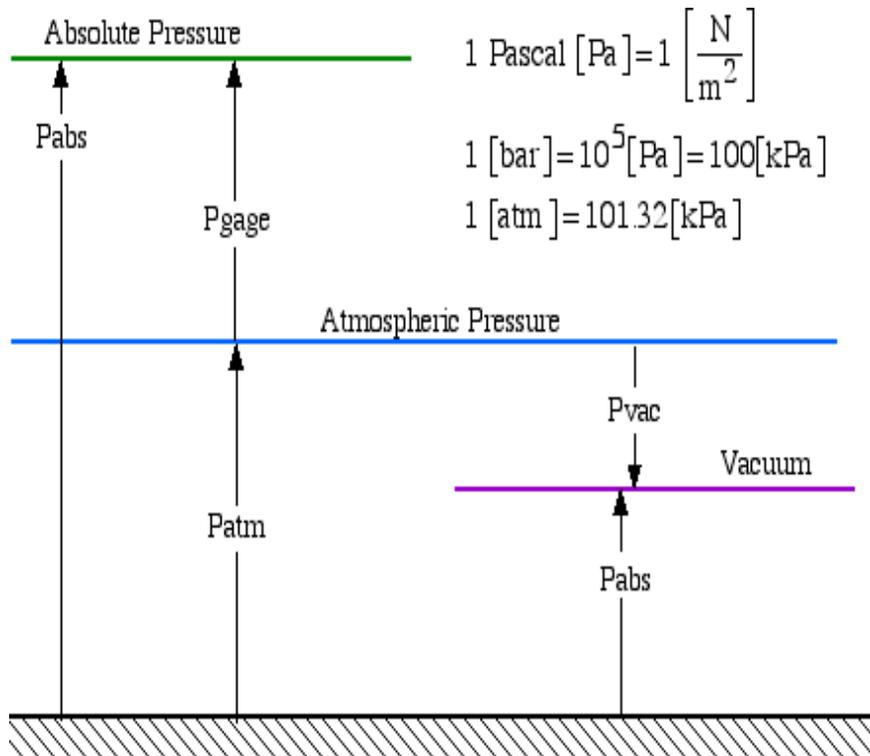
Hukum ketiga termodinamika terkait dengan temperatur nol absolut. Hukum ini menyatakan bahwa pada saat suatu sistem mencapai temperatur nol absolut, semua proses akan berhenti dan entropi sistem akan mendekati nilai minimum. Hukum ini juga menyatakan bahwa entropi benda berstruktur kristal sempurna pada temperatur nol absolut bernilai nol.

#### 5. Tekanan

Tekanan merupakan salah satu *property* yang terpenting dalam termodinamika, dan didefinisikan sebagai gaya tekan suatu fluida (cair atau gas) pada satu satuan unit luas area. juga menyatakan bahwa entropi benda berstruktur kristal sempurna pada temperatur nol absolut bernilai nol.

## 6. Tekanan

Tekanan merupakan salah satu *property* yang terpenting dalam termodinamika, dan didefinisikan sebagai gaya tekan suatu fluida (cair atau gas) pada satu satuan unit luas area.

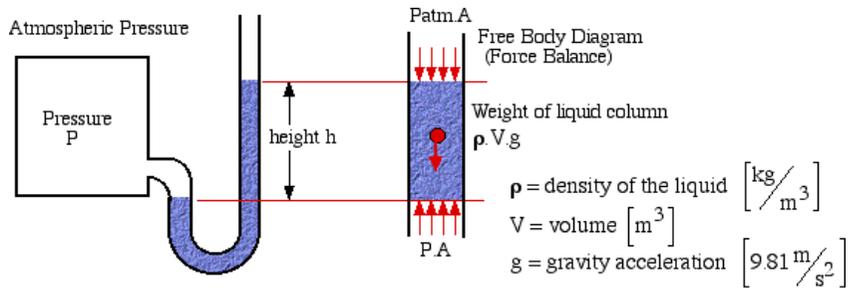


Satuan tekanan adalah Pa (Pascal),  $1 Pa = 1 N/m^2$ . Karena satuan Pascal terlalu kecil, maka dalam analisis termodinamika sering digunakan satuan kilopascal (1 kPa = 1000 Pa), atau megapascal (1 MPa = 1000 kPa). Satuan tekanan yang cukup dikenal adalah satuan bar (*barometric*), atau atm (*standard atmosphere*), sebagai berikut:

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$$

Pengukuran tekanan dengan menggunakan referensi tekanan nol absolut disebut tekanan absolut (ata), sedang tekanan manometer



From a force balance:

$$P.A = P_{atm}.A + \rho.V.g = P_{atm}.A + \rho.h.A.g$$

Thus:  $P = P_{atm} + \rho.g.h$   
 $P_{gage} = \rho.g.h$

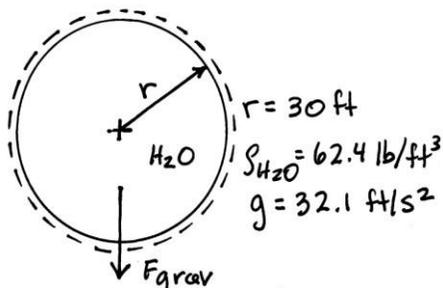
(ato) adalah tekanan relatif terhadap tekanan atmosfer. Tekanan vakum adalah tekanan dibawah 1 atm, yaitu perbedaan antara tekanan atmosfer dengan tekanan absolut, seperti ditunjukkan dalam gambar di atas.

Alat pengukur tekanan di atas atmosfer adalah manometer, alat pengukur tekanan vakum disebut manometer vakum, sedang alat pengukur tekanan atmosfer disebut barometer. Terdapat banyak jenis metode pengukuran tekanan seperti pipa U, manometer pegas, atau transduser elektronik.

Contoh 1:

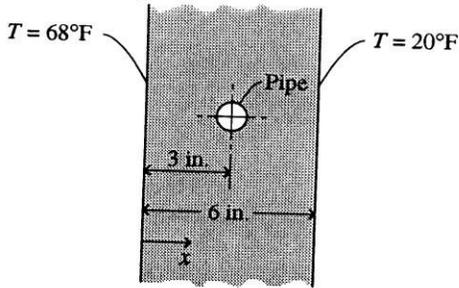
Sebuah menara tangki penampung air mempunyai bentuk mendekati bola dengan jejari 30 ft. Jika kerapatan air 62,4 lb/ft<sup>3</sup> dan tangki berisi penuh,

- Tentukanlah massa air dalam tangki [lb]
- Berapakah berat air [lbf] jika percepatan gravitasi



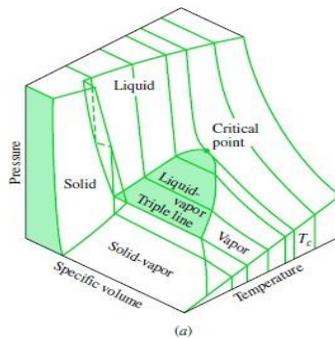
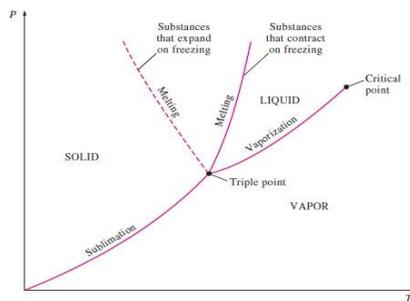
setempat sebesar 32,1 ft/s<sup>2</sup> Contoh 2:

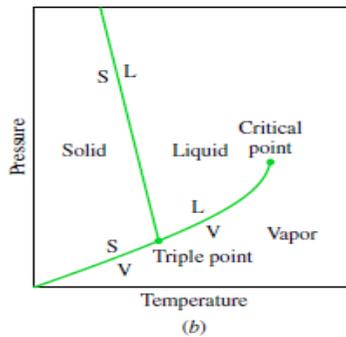
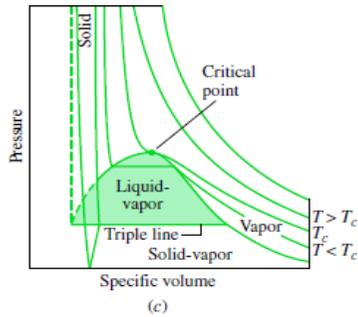
Gambar di bawah menunjukkan sebuah pipa air berukuran kecil menembus dinding dengan tebal 6 in. Diasumsikan bahwa temperatur berubah secara linear terhadap posisi  $x$  dari dinding mulai



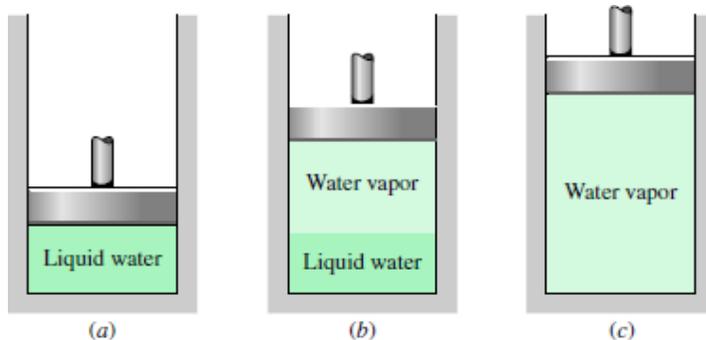
$68^\circ\text{F}$  ke  $20^\circ\text{F}$ . Apakah air dalam pipa akan membeku

1. Dua buah fase dapat muncul secara simultan selama perubahan fase seperti pada penguapan, peleburan dan sublimasi.
2. Pada daerah dua fase tekanan dan temperatur bersifat tidak bebas, dimana salah satunya tidak dapat berubah tanpa perubahan yang lainnya.





3. Keadaan tidak dapat ditentukan hanya dengan tekanan dan temperatur saja namun dapat ditentukan berdasarkan pasangan volume spesifik dengan tekanan atau temperatur.



Ilustrasi perubahan dari cairan menjadi uap air pada tekanan konstan

1. Tiga buah fase dapat muncul dalam kesetimbangan disepanjang garis yang disebut *garis tripel*.
2. Suatu keadaan dimana suatu perubahan fase berawal dan berakhir disebut *keadaan jenuh*
- A. Sistem dipanaskan pada tekanan tetap, temperatur meningkat cepat, sedangkan volume spesifik hanya sedikit meningkat (f) disebut *cair*

jenuh.

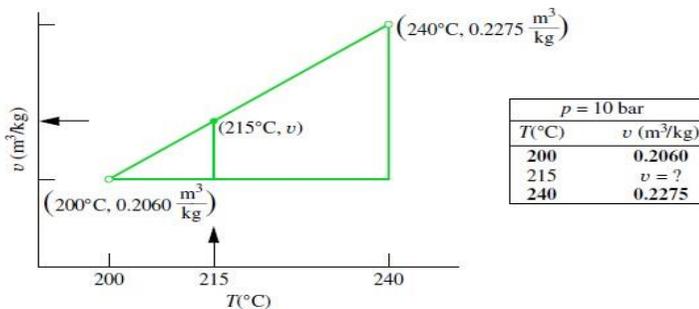
- B. Keadaan cair di sepanjang bagian garis 1-f disebut keadaan cair subdingin (*subcooled liquid*) atau disebut juga *cair tekan*.
- C. Proses dari (f) ke (g) terjadi penambahan kalor pada tekanan tertentu menyebabkan terbentuk uap tanpa perubahan temperatur tetapi peningkatan volume spesifik yang berarti.
- D. Jika sistem terus dipanaskan sampai butir cairan terakhir menguap, maka tercapai titik (g) atau disebut *keadaan (uap jenuh)*.
- E. Pada kondisi (f) ke (g) atau pada campuran dua fase cair-uap dapat

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{liquid}} + m_{\text{vapor}}}$$

dibedakan dengan menggunakan suatu sifat intensif yang dikenal sebagai *kualitas* ( $x$ ).

- F. Jika diberikan panas lanjut pada sistem pada tekanan tetap terjadi peningkatan temperatur dan volume spesifik, keadaan seperti ini di titik (s) disebut *uap panas lanjut (superheated vapour)*.

Contoh: Perhatikan data diatas, berapakah  $v$  (volume spesifik) pada



Temperatur  $215^{\circ}\text{C}$  di tekanan  $P = 10 \text{ bar}$  ?

$$\text{slope} = \frac{(0.2275 - 0.2060) \text{ m}^3/\text{kg}}{(240 - 200)^{\circ}\text{C}} = \frac{(v - 0.2060) \text{ m}^3/\text{kg}}{(215 - 200)^{\circ}\text{C}}$$

$$v = 0.2141 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

## 6. Termometer

Ukuran temperatur berfungsi untuk mengindikasikan adanya energi panas pada suatu benda padat, cair, atau gas. Metodenya biasanya menggunakan perubahan salah satu *property* suatu material karena panas, seperti pemuaian, dan sifat listrik. Prinsip pengukurannya adalah apabila suatu alat ukur ditempelkan pada benda yang akan diukur temperaturnya, maka akan terjadi perpindahan panas ke alat ukur sampai terjadi keadaan seimbang. Dengan demikian temperatur yang tertera pada alat ukur adalah sama dengan temperatur pada benda yang diukur temperaturnya. Prinsip tersebut menghasilkan Hukum Termodinamika Zeroth (*Zeroth Law of Thermodynamics*), yaitu apabila dua benda dalam keadaan seimbang thermal dengan benda ketiga maka dua benda tersebut juga dalam keadaan seimbang thermal walaupun tidak saling bersentuhan. Dalam sistem SI satuan temperatur adalah Kelvin (K) tanpa derajat. Skala dari ukuran temperatur dalam derajat Celsius adalah sama dengan skala ukuran Kelvin, tetapi titik nol C sama dengan 273,15 K. Titik nol C adalah kondisi es mencair pada keadaan standard atmosfer, sedang kondisi 0 K adalah kondisi nol mutlak dimana semua gerakan yang menghasilkan energi pada semua materi berhenti. Dalam analisis termodinamika, apabila yang dimaksudkan adalah ukuran temperatur maka yang digunakan adalah ukuran dalam K, sedang apabila analisis berhubungan dengan perbedaan temperatur maka baik ukuran C maupun K dapat digunakan.

## C. Penutup

### 1. Rangkuman

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari hubungan antara energi serta perubahannya. Ada dua macam bentuk energi yang dipelajari dalam termodinamika yaitu panas dan kerja. Panas merupakan salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan dari suatu benda ke benda lain. Sedangkan kerja didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya (*force*) dan jarak pergerakan dari gaya tersebut.

Sistem termodinamika secara luas bisa didefinisikan sebagai luas atau ruang tertentu dimana proses termodinamika terjadi. Atau adalah suatu daerah dimana perhatian kita difokuskan dalam mempelajari proses termodinamika. Sistem termodinamika dapat dibedakan menjadi 3 macam yaitu: Sistem tertutup (*closed system*); Sistem terbuka (*open system*); dan Sistem terisolasi/diisolasi (*isolated system*). Keadaan sistem bisa diidentifikasi atau diterangkan dengan besaran yang bisa diobservasi seperti volume, temperatur, tekanan, kerapatan dan

sebagainya. Semua besaran yang mengidentifikasi keadaan sistem disebut sifat-sifat sistem. Perubahan sistem termodinamika dari keadaan seimbang satu menjadi keadaan seimbang lain disebut proses, dan rangkaian keadaan diantara keadaan awal dan akhir disebut lintasan proses.

Tekanan merupakan salah satu *property* yang terpenting dalam termodinamika, dan didefinisikan sebagai gaya tekan suatu fluida (cair atau gas) pada satu satuan unit luas area. Alat pengukur tekanan diatas atmosfer adalah manometer, alat pengukur tekanan vakum disebut manometer vakum, sedang alat pengukur tekanan atmosfer disebut barometer. Terdapat banyak jenis metode pengukuran tekanan seperti pipa U, manometer pegas, atau transduser elektronik. Satuan tekanan adalah Pa (Pascal),  $1 Pa = 1 N/m^2$ . Satuan tekanan yang cukup dikenal adalah satuan bar (*barometric*), atau atm (*standard atmosphere*)

Ukuran temperatur berfungsi untuk mengindikasikan adanya energi panas pada suatu benda padat, cair, atau gas. Metodenya biasanya menggunakan perubahan salah satu *property* suatu material karena panas, seperti pemuaian, dan sifat listrik. Prinsip pengukurannya adalah apabila suatu alat ukur ditempelkan pada benda yang akan diukur temperaturnya, maka akan terjadi perpindahan panas ke alat ukur sampai terjadi keadaan seimbang. Hukum Termodinamika Zeroth (*Zeroth Law of Thermodynamics*), yaitu apabila dua benda dalam keadaan seimbang thermal dengan benda ketiga maka dua benda tersebut juga dalam keadaan seimbang thermal walaupun tidak saling bersentuhan. Dalam sistem SI satuan temperatur adalah Kelvin (K) tanpa derajat. Skala dari ukuran temperatur dalam derajat Celcius adalah sama dengan skala ukuran Kelvin, tetapi titik nol C sama dengan 273,15 K. Titik nol C adalah kondisi es mencair pada keadaan standard atmosfer, sedang kondisi 0 K adalah kondisi nol mutlak dimana semua gerakan yang menghasilkan energi pada semua materi berhenti. Dalam analisis termodinamika, apabila yang dimaksudkan adalah ukuran temperatur maka yang digunakan adalah ukuran dalam K, sedang apabila analisis berhubungan dengan perbedaan temperatur maka baik ukuran C maupun K dapat digunakan.

## **2. Tes formatif dan kunci jawaban**

### **a. Tes formatif**

1. Jelaskan perbedaan sistem dan lingkungan
2. Sebutkan macam-macam sistem dalam termodinamika
3. Berdasarkan suhu absolut, mana yang lebih tinggi 1C atau 1F

4. Jika DiBromoPentana (DBP) memiliki masa jenis  $1,57 \text{ kg/m}^3$  nyatakan dalam  $\text{lbm/ft}^3$

**b. Kunci jawaban**

1. Sistem merupakan bagian dari alam semesta yang kita tinjau (Kita pelajari sifat-sifatnya). Lingkungan adalah segala sesuatu yang terdapat di luar sistem
2. Sistem tertutup, terbuka dan terisolasi
3. Dilihat dari suhu absolut maka F lebih tinggi dibandingkan C.
4.  $1,57 \text{ g/cm}^3 \times \text{lb}/454\text{g} \times (30,48 \text{ cm}/1\text{ft})^3 = 97,9 \text{ lb/ft}^3$

## **BAB II PERSAMAAN KEADAAN**

### **A. Pendahuluan**

Agar mahasiswa mengetahui dan mampu menjelaskan tentang persamaan keadaan, sistem dan persamaan keadaannya, sifat-sifat campuran, dan persamaan keadaan dalam termodinamika maka akan disajikan tentang sebuah persamaan konstitutif yang menyediakan hubungan matematik antara dua atau lebih fungsi keadaan yang berhubungan dengan materi seperti temperatur, tekanan, volume dan energi dalam. Kemudian dilanjutkan dengan penutup yang berisi tentang rangkuman penyajian dan tes formatif beserta kunci jawabannya.

### **B. Penyajian**

#### **1. Persamaan Keadaan**

Di dalam fisika dan termodinamika, persamaan keadaan adalah persamaan termodinamika yang menggambarkan keadaan materi di bawah seperangkat kondisi fisika. Persamaan keadaan adalah sebuah persamaan konstitutif yang menyediakan hubungan matematik antara dua atau lebih fungsi keadaan yang berhubungan dengan materi seperti temperatur, tekanan, volume dan energi dalam. Persamaan keadaan berguna dalam menggambarkan sifat-sifat fluida, campuran fluida, padatan, dan bahkan bagian dalamnya.

#### **2. Sistem dan Persamaan Keadaannya**

Keadaan seimbang mekanis : Sistem berada dalam keadaan seimbang mekanis, apabila resultan semua gaya (luar maupun dalam) adalah nol; Keadaan seimbang kimiawi : Sistem berada dalam keadaan seimbang kimiawi, apabila didalamnya tidak terjadi perpindahan zat dari bagian yang satu ke bagian yang lain (difusi) dan tidak terjadi reaksi-reaksi kimiawi yang dapat mengubah jumlah partikel semulanya, tidak terjadi pelarutan atau kondensasi. Sistem itu tetap komposisi maupun konsentrasinya. Keadaan seimbang termal : sistem berada dalam keadaan seimbang termal dengan lingkungannya, apabila koordinat-koordinatnya tidak berubah, meskipun system berkontak dengan lingkungannya melalui dinding diatermik. Besar/nilai koordinat sistem tidak berubah dengan perubahan waktu. Keadaan keseimbangan termodinamika : sistem berada dalam keadaan seimbang termodinamika, apabila ketiga syarat keseimbangan diatas terpenuhi. Dalam keadaan demikian keadaan koordinat sistem maupun

lingkungan cenderung tidak berubah sepanjang massa. Termodinamikanya mempelajari sistem-sistem dalam keadaan demikian. Dalam keadaan seimbang termodinamika setiap sistem tertutup (yang mempunyai massa atau jumlah partikel tetap misalnya  $N$  mole atau mkg) ternyata dapat digambarkan oleh tiga koordinat dan semua eksperimen menunjukkan bahwa dalam keadaan seimbang termodinamika, antara ketiga koordinat itu terdapat hubungan tertentu :  $f(x,y,z)=0$  dengan kata lain dalam keadaan seimbang termodinamis, hanya dua diantara ketiga koordinat system merupakan variabel bebas. Gas ideal didefinisikan sebagai sistem banyak partikel yang partikelnya tidak saling berinteraksi. Dalam realitanya tidak ada sistem semacam ini, tetapi sistem gas real yang kerapatannya sangat rendah akan sangat mendekati sifat-sifat dari gas ideal. Hal ini karena kerapatan partikel yang sangat rendah menyebabkan kemungkinan terjadinya interaksi antar partikelnya sangat kecil, sehingga praktis partikelnya tidak saling berinteraksi. Perumusan persamaan keadaan gas ideal diperoleh dari generalisasi hasil eksperimen terhadap gas real yang berkerapatan rendah. Perumusan pertama diperoleh R. Boyle (1664) dan E. Mariotte (1676) terkait dengan gas yang berada dalam keadaan temperatur konstan.

Suatu gas disebut gas ideal bila memenuhi hukum gas ideal, yaitu hukum Boyle, Gay Lussac, dan Charles dengan persamaan  $P.V=n.R.T$ . Akan tetapi, pada kenyataannya gas yang ada tidak dapat benar-benar mengikuti hukum gas ideal tersebut. Hal ini dikarenakan gas tersebut memiliki deviasi (penyimpangan) yang berbeda dengan gas ideal. Semakin rendah tekanan gas pada temperatur tetap, nilai deviasinya akan semakin kecil dari hasil yang didapat dari eksperimen dan hasilnya akan mendekati kondisi gas ideal. Namun bila tekanan gas tersebut semakin bertambah dalam temperatur tetap, maka nilai deviasi semakin besar sehingga hal ini menandakan bahwa hukum gas ideal kurang sesuai untuk diaplikasikan pada gas secara umum yaitu pada *gas nyata* atau *gas riil*.

Gas ideal memiliki deviasi (penyimpangan) yang lebih besar terhadap hasil eksperimen dibanding gas nyata dikarenakan beberapa perbedaan pada persamaan yang digunakan sebagai berikut:

- Jenis gas
- Tekanan gas. Ketika jarak antar molekul menjadi semakin kecil, terjadi interaksi antar molekul dimana tekanan gas ideal lebih besar dibanding tekanan gas nyata ( $P_{nyata} < P_{ideal}$ )

- Volume gas. Dalam gas ideal, volume gas diasumsikan sama dengan volume wadah karena gas selalu menempati ruang. Namun dalam perhitungan gas nyata, volume molekul gas tersebut juga turut diperhitungkan, yaitu:  $V_{riil} = V_{wadah} - V_{molekul}$

Maka dari itu, perbedaan persamaan pada gas ideal dengan gas nyata dinyatakan dalam faktor daya mampat atau faktor kompresibilitas ( $Z$ ) yang mana menghasilkan persamaan untuk gas nyata yaitu:

$$PV = Z \cdot nRT \text{ atau } Z = \frac{PV}{nRT}$$

Beberapa asumsi dan eksperimen telah dikembangkan untuk membuat persamaan yang menyatakan hubungan yang lebih akurat antara  $P$ ,  $V$ , dan  $T$  dalam gas nyata. Beberapa persamaan gas nyata yang cukup luas digunakan yaitu persamaan van der Waals, persamaan KammerlignOnnes, persamaan Berthelot, dan persamaan Beattie-Bridgeman.

### 3. Sifat-sifat Campuran

#### a. Campuran Dari Gas Ideal Dan Uap

Sifat-sifat campuran dipengaruhi komposisi campuran dan sifat-sifat masing-masing komponennya. Ada dua cara menjelaskan komposisi campuran yaitu dengan

- analisa molar
- analisa gravimetri

Analisa molar menyatakan komposisi campuran berdasarkan jumlahmolekul masing-masing komponen.

Analisa gravimetri menyatakan komposisi campuran berdasarkan massa masing-masing komponen

Jika suatu campuran gas terdiri dari  $k$  komponen maka sifat-sifatnya adalah sebagai berikut

Massa campuran sama dengan jumlah dari massa masing-masing komponen.

$$m_{camp} = \sum_{i=1}^k m_i$$

Jumlah molekul campuran sama dengan jumlah molekul dari masing-masing komponen

$$N_{camp} = \sum_{i=1}^k N_i$$

Perbandingan massa komponen terhadap massa campuran disebut fraksi massa. Jumlah fraksi massa sama dengan 1.

$$m_i \quad m = \frac{m_i}{m} \quad \sum_{i=1}^k m f_i = 1$$

Perbandingan jumlah molekul komponen terhadap jumlah molekul campuran disebut fraksi molekul. Jumlah fraksi molekul sama dengan 1.

$$y_i = \frac{N_i}{N_{camp}} \quad \sum_{i=1}^k y_i = 1$$

Berat molekul ekivalen campuran (rata-rata) merupakan perbandingan massa campuran dengan jumlah molekul campuran

$$M_{camp} = \frac{m_{camp}}{N} = \sum_{i=1}^k y_i M_{i=1}$$

Konstanta gas ekivalen campuran (rata-rata) merupakan perbandingan konstanta gas universal dengan massa molekul campuran

$$R_{camp} = \frac{R_u}{M_{camp}}$$

*Hukum Tekanan Dalton :*

Tekanan campuran gas merupakan jumlah tekanan masing-masing komponen gas jika berada pada temperatur dan volume campuran sebagai gas tunggal.

$$P_{camp} = \sum_{i=1}^k P_i(T_{camp}, V_{camp})$$

*Hukum Volume Amagat :*

Volume campuran gas merupakan jumlah volume masing-masing komponen gas jika berada pada temperatur dan tekanan campuran sebagai gas tunggal.

$$V_{camp} = \sum_{i=1}^k V_i(T_{camp}, P_{camp})$$

Perbandingan antara  $P_i$  dengan  $P_{camp}$  disebut *fraksi tekanan*.

$$Pf = \frac{P_i}{P_{camp}}$$

Perbandingan antara  $V_i$  dengan  $V_{camp}$  disebut *fraksi volume*

$$vf = \frac{V_i}{V_{camp}}$$

Untuk gas ideal berlaku persamaan  $PV = N R_u T$  sehingga fraksitekanan, fraksi volume dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{P_i(T_{camp}, V_{camp})}{P} = \frac{N_i R_u T_{camp} / V_{camp}}{N R_u T} = \frac{N_i}{N} = \frac{y_i P}{P} = y_i$$



$P_i = y_i P_{camp}$ , besaran ini disebut tekanan parsial.  $V_i = y_i V_{camp}$ , besaran ini disebut volume parsial.

Untuk gas ideal komposisi campuran dapat dijelaskan dengan analisis volumetri. Prosentase volume dari masing-masing komponen ekuivalen dengan prosentase dari fraksi molekul.

Hukum Dalton dan hukum amagat dapat juga digunakan untuk gas riil, tetapi tekanan dan volume masing-masing komponen ditentukan dengan persamaan yang sesuai bukan dengan persamaan gas ideal.

Menggunakan faktor kompresibilitas ( $Z$ )

$$Z_{camp} = \sum_{i=1}^k y_i Z_i$$

*Hukum Dalton* :  $Z_i$  ditentukan pada temperatur dan volume campuran masing-masing komponen gas.

*Hukum Amagat* :  $Z_i$  pada temperatur dan tekanan campuran untuk masing-masing komponen gas.

Cara lain dilakukan dengan menggunakan "Kay's rule". Dengan cara ini faktor kompresibilitas ditentukan dari "pseudocritical pressure  $P'_{cr,camp}$ " dan "pseudocritical temperature  $T'_{cr,camp}$ "

$$P'_{cr,camp} = \sum y_i P'_{cr,i} \quad \text{dan} \quad T'_{cr,camp} = \sum y_i T'_{cr,i}$$

$$\left( \frac{P}{P'} \right)_{cr,camp} = \frac{P}{P'_{cr,camp}} \quad \text{dan} \quad \left( \frac{T}{T'} \right)_{cr,camp} = \frac{T}{T'_{cr,camp}}$$

$$\left( \frac{Z_{camp}}{Z'_{camp}} \right)_{cr,camp} \text{ dibaca pada } \left( \frac{P}{P'} \right)_{cr,camp} \text{ dan } \left( \frac{T}{T'} \right)_{cr,camp}$$

$$P + \left( \frac{a}{v} - b \right) = R T$$

$$\left( \frac{P}{P'} \right)_{cr,camp} + \left( \frac{a}{v} - b \right)_{cr,camp} = R \left( \frac{T}{T'} \right)_{cr,camp}$$

$$a_i = \frac{27 R^2 T_{cr,i}^2}{64 P'_{cr,i}} \quad \text{dan} \quad b_i = \frac{R T_{cr,i}}{8 P'_{cr,i}}$$

$$a_{camp} = \left( \sum_{i=1}^k y_i a_i \right)^2 \quad \text{dan} \quad b_{camp} = \sum_{i=1}^k y_i b_i$$

$$U_{camp} = \sum U_i = \sum m_i u_i = \sum N_i u_i$$

# Energi Dalam

$$\Delta U_{camp} = \sum_{i=1}^k \Delta U_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta u_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta u_i \quad -$$

$$u_{camp} = \sum_{i=1}^k m f_i u_i \quad \text{dan} \quad u_{camp} = \sum_{i=1}^k y_i u_i \quad -$$

*Entalpi*

$$H_{camp} = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i$$

$$\Delta H_{camp} = \sum_{i=1}^k \Delta H_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{h}_i$$

$$h_{camp} = \sum_{i=1}^k m f_i h_i \text{ dan } \bar{h}_{camp} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i$$

*Entropi*

$$S_{camp} = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{s}_i$$

$$\Delta S_{camp} = \sum_{i=1}^k \Delta S_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta s_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{s}_i$$

$$s_{camp} = \sum_{i=1}^k m f_i s_i \text{ dan } \bar{s}_{camp} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{s}_i$$

*Panas jenis*

$$C_{v,camp} = \sum_{i=1}^k m f_i C_{v,i} \text{ dan } \bar{C}_{v,camp} = \sum_{i=1}^k y_i C_{v,i}$$

$$C_{p,camp} = \sum_{i=1}^k m f_i C_{p,i} \text{ dan } \bar{C}_{p,camp} = \sum_{i=1}^k y_i C_{p,i}$$

**b. Campuran udara dan uap air**

- Udara adalah campuran dari nitrogen , oksigen dan sejumlah kecil gas lain. Udara di atmosfer pada umumnya mengandung uap air.
- Udara yang tidak mengandung uap air disebut sebagai udara kering.
- Asumsi yang sering digunakan adalah menganggap udara sebagai campuran antara udara kering dan uap air.

Pada “ *air conditioning* “ temperatur udara berkisar antara -10°C hingga 50°C. Pada keadaan tersebut udara kering dapat dianggap sebagai gas ideal dengan panas jenis konstan ( $C_p=1.005 \text{ kJ/kg}$  atau  $C_p=0.240 \text{ Btu/lbmR}$ ).

$$\Delta h_{\text{udara kering}} = C_p \Delta T$$

Demikian pula uap air dapat dianggap sebagai gas ideal ( $P_{\text{sat air pada } 50^\circ\text{C}} = 12.3 \text{ kPa}$ , pada tekanan rendah uap air mempunyai sifat-sifat gas ideal). Entalpi uap air hanya merupakan fungsi dari temperatur saja. Karena itu entalpi uap air

dapat dinyatakan dengan entalpi uap air jenuh pada temperatur yang sama.

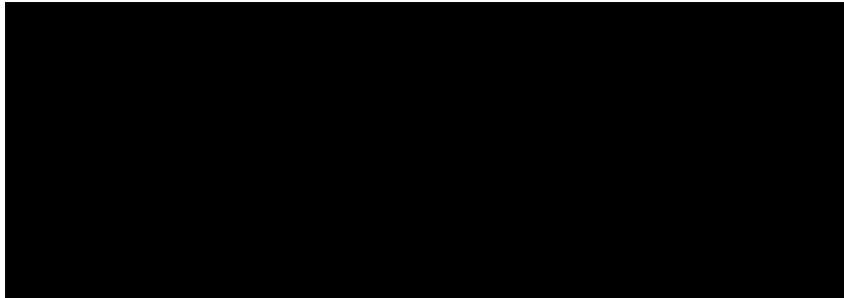
$$h_{\text{uap air}}(T, P_{\text{rendah}}) \cong h_g(T) P_{\text{udara}} = P_{\text{udara}}$$

kering +  $P_{\text{uap air}}$



Untuk menentukan kelembaban udara digunakan suatu alat yang disebut *Wet-bulb psychrometer*. Alat ini terdiri dua buah termometer. Satu disebut bola kering (*dry-bulb*) dan yang satu lagi disebut bola

basah (*wet-bulb*) karena ditutupi oleh kapas basah. Prinsip kerjanya adalah dengan *Adiabatic saturation*.



Sebuah sistem saluran sangat panjang yang diisolasi dan mempunyaikantung air. Udara tidak jenuh dengan kelembaban jenis  $\omega_1$  (tidak diketahui) serta temperatur  $T_1$  (terukur) mengalir ke dalam saluran. Sebagian air akan menguap dan bercampur dengan udara. Karena saluran sangat panjang maka udara akan keluar dalam keadaan jenuh ( $\phi=100\%$ ) dengan temperatur  $T_2$  disebut *adiabatic saturation temperatur*. Sistem di atas dapat dianalisa sebagai sistem aliran tunak.

- Prinsip kekekalan massa

Udara kering :  $\dot{m}_{\text{udara kering}1} = \dot{m}_{\text{udara kering}2} = \dot{m}_{\text{udara kering}}$

$$\begin{aligned} \text{Uap air} \quad \dot{m}_{\text{uap}1} + \dot{m}_{\text{penguapan}} &= \dot{m}_{\text{uap}2} \\ \dot{m}_{\text{udara kering}}\omega_1 + \dot{m}_{\text{penguapan}} &= \dot{m}_{\text{udara kering}}\omega_2 \\ \dot{m}_{\text{penguapan}} &= \dot{m}_{\text{udara kering}}(\omega_2 - \omega_1) \end{aligned}$$

- Prinsip kekekalan energi

$$\sum \dot{m}h_i = \sum \dot{m}h_e$$

$$\dot{m}_{\text{udara kering}1}h_1 + \dot{m}_{\text{penguapan}1}h_{f2} = \dot{m}_{\text{udara kering}2}h_2$$

$$\dot{m}_{\text{udara kering}}h_1 + \dot{m}_{\text{udara kering}}(\omega_2 - \omega_1)h_{f2} = \dot{m}_{\text{udara kering}}h_2$$

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1)h_{f2} = h_2$$

$$(C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + (\omega_2 - \omega_1)h_{f2} = (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2})$$

Maka dihasilkan

$$\omega = \frac{C_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{g1} - h_{f2}} \quad \omega = \frac{0.622 P_{g2}}{P - P_{g2}}$$

Untuk “*wet-bulb psychrometer*”  $T_1$  adalah temperatur bola kering dan  $T_2$  adalah temperatur bola basah.

#### 4. Persamaan Keadaan Dalam Termodinamika

##### a. Persamaan keadaan van der Waals

Gas yang mengikuti hukum Boyle dan hukum Charles, disebut gas ideal. Namun, didapatkan, bahwa gas yang kita jumpai, yakni gas nyata, tidak secara ketat mengikuti hukum gas ideal. Semakin rendah tekanan gas pada temperatur tetap, semakin kecil deviasinya dari perilaku ideal. Semakin tinggi tekanan gas, atau dengan kata lain, semakin kecil jarak intermolekulnya, semakin besar deviasinya. Paling tidak, ada dua alasan yang menjelaskan hal ini. Pertama, definisi temperatur absolut didasarkan asumsi bahwa volume gas real sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Molekul gas pasti memiliki volume nyata walaupun mungkin sangat kecil. Selain itu, ketika jarak antar molekul semakin kecil, beberapa jenis interaksi antarmolekul akan muncul. Fisikawan Belanda Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) mengusulkan persamaan keadaan gas nyata, yang dinyatakan sebagai persamaan keadaan van der Waals atau persamaan van der Waals. Ia memodifikasi persamaan gas ideal dengan cara sebagai berikut: dengan menambahkan koreksi pada  $p$  untuk mengkompensasi interaksi antarmolekul; mengurangi dari suku  $V$  yang menjelaskan volume real molekul gas.

[http://www.scribd.com/doc/36787993/Persamaan-Keadaan-Persamaan van der Waals](http://www.scribd.com/doc/36787993/Persamaan-Keadaan-Persamaan-van-der-Waals) didasarkan pada tiga perbedaan yang telah disebutkan di atas dengan memodifikasi persamaan gas ideal yang sudah berlaku secara umum. Pertama, van der Waals menambahkan koreksi pada  $P$  dengan mengasumsikan bahwa jika terdapat interaksi antara molekul gas dalam suatu wadah, maka tekanan riil akan berkurang dari tekanan ideal ( $P_i$ ) sebesar nilai  $P'$ .

$$P = P_i - P' \qquad \text{①} \qquad P = P_i + P'$$

Nilai  $P'$  merupakan hasil kali tetapan besar daya tarik molekul pada suatu jenis gas ( $a$ ) dan kuadrat jumlah mol gas yang berbanding terbalik terhadap volume gas tersebut, yaitu:

$$P' = \frac{n^2 a}{V^2}$$

Kedua, van der Waals mengurangi volume total suatu gas dengan volume molekul gas tersebut, yang mana volume molekul gas dapat diartikan sebagai perkalian antara jumlah mol

gas dengan tetapan volume molar gas tersebut yang berbeda untuk masing-masing gas ( $V - nb$ ).

Dalam persamaan gas ideal ( $PV = nRT$ ),  $P$  (tekanan) yang tertera dalam persamaan tersebut bermakna tekanan gas ideal ( $P_i$ ), sedangkan  $V$  (volume) merupakan volume gas tersebut sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan van der Waals untuk gas nyata adalah:

$$(P + P')(V - nb) = nRT$$

Dengan mensubstitusikan nilai  $P'$ , maka persamaan total van der Waals akan menjadi:

$$\left(P + \frac{n^2a}{V^2}\right) (V - nb) = nRT$$

Nilai  $a$  dan  $b$  didapat dari eksperimen dan disebut juga dengan *tetapan van der Waals*. Semakin kecil nilai  $a$  dan  $b$  menunjukkan bahwa kondisi gas semakin mendekati kondisi gas ideal. Besarnya nilai tetapan ini juga berhubungan dengan kemampuan gas tersebut untuk dicairkan. Berikut adalah contoh nilai  $a$  dan  $b$  pada beberapa gas.

	$a$ atm mol <sup>-2</sup> )	(L <sup>2</sup>	$b$ (10 <sup>-2</sup> L mol <sup>-1</sup> )
H <sub>2</sub>	0.244		2.661
O <sub>2</sub>	1.36		3.183
NH <sub>3</sub>	4.17		3.707
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	18.24		11.54

Daftar nilai tetapan van der Waals secara lengkap dapat dilihat dalam buku *Fundamentals of Physical Chemistry* oleh Samuel Maron dan Jerome Lando pada tabel 1-2 halaman 20. Pada persamaan van der Waals, nilai  $Z$  (faktor kompresibilitas):

$$P =$$

$$\frac{nRT}{V - nb} - \frac{n^2a}{V^2}$$

$$(V - nb)$$

$$Z = \frac{PV}{nRT} \quad \text{①}$$

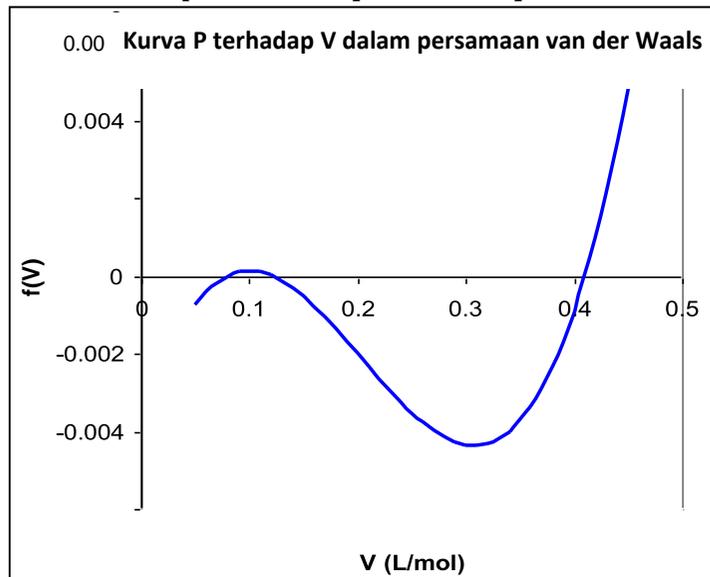
$$Z = \frac{PV}{nRT} = \frac{PV}{nRT} = \frac{PV}{(V - nb)nRT} - \frac{n^2a \cdot V}{V^2 nRT}$$

$$Z = \frac{V}{(V - nb)} - \frac{an}{VRT}$$

Untuk memperoleh hubungan antara P dan V dalam bentukkurva pada persamaan van der Waals terlebih dahulu persamaan ini diubah menjadi persamaan derajat tiga (persamaan kubik) dengan menyamakan penyebut pada ruas kanan dan kalikan

dengan  $V^2(V - nb)$ , kemudian kedua ruas dibagi dengan  $P$ , maka diperoleh:

$$\frac{3}{V} - (nb + \frac{nRT}{P})V + (\frac{n^2a}{P})V - (\frac{n^3ab}{P}) = 0$$



### b. Persamaan keadaan Lain pada Gas Nyata

#### *Persamaan Kamerlingh Onnes*

Pada persamaan ini,  $PV$  didefinisikan sebagai deret geometri penjumlahan koefisien pada temperatur tertentu, yang memiliki rasio "P" (tekanan) dan " $V_m$ " (volume molar), yaitu sebagai berikut:

$$PV_m = A + BP + CP^2 + DP^3 + \dots$$

Nilai A, B, C, dan D disebut juga dengan koefisien virial yang nilai dapat dilihat dalam buku *Fundamentals of Physical Chemistry* oleh Samuel Maron dan Jerome Lando. Pada tekanan rendah, hanya koefisien A saja yang akurat, namun semakin tinggi tekanan suatu gas, maka koefisien B, C, D, dan seterusnya akan lebih akurat sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan Kamerlingh akan memberikan hasil yang semakin akurat bila tekanan semakin bertambah.

#### *Persamaan Berhelot*

Persamaan ini berlaku pada gas dengan temperatur rendah ( $\leq 1$  atm), yaitu:

$$PV = nRT \left[ 1 + \frac{9PT_c}{128P_cT} \left( 1 - \frac{6T_c^2}{T^2} \right) \right]$$

$P_c$  = tekanan kritis (tekanan pada titik kritis) dan  $T_c$  = temperatur kritis (temperatur pada titik kritis).  $P$ ,  $V$ ,  $n$ ,  $R$ ,  $T$  adalah besaran yang sama seperti pada hukum gas ideal biasa. Persamaan ini bermanfaat untuk menghitung massa molekul suatu gas.

*Persamaan Beattie-Bridgeman*

Dalam persamaan ini terdapat lima konstanta. Persamaan Beattie-Bridgeman ini terdiri atas dua persamaan, persamaan pertama untuk mencari nilai tekanan ( $P$ ), sedangkan persamaan kedua untuk mencari nilai volume molar ( $V_m$ ).

$$P = \frac{RT}{V_m} + \frac{\beta}{V_m^2} + \frac{\gamma}{V_m^3} + \frac{\delta}{V_m^4}$$

$$V_m = \frac{RT}{P} + \frac{\beta}{RT} + \frac{\gamma}{(RT)^2} + \frac{\delta}{(RT)^3}$$

Dimana:

$$\beta = RT\beta_0 - A_0 \frac{Rc}{T^2}$$

$$\gamma = -RTB_0 + A_0 \frac{RcB_0}{T^2}$$

$$\delta = \frac{RB_0bc}{T^2}$$

Nilai  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  merupakan konstanta gas yang nilainya berbeda pada setiap gas. Daftar nilai  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  dapat dilihat dalam buku *Fundamentals of Physical Chemistry* oleh Samuel Maron dan Jerome Lando pada tabel 1-5 halaman

23. Persamaan ini memberikan hasil perhitungan yang sangat akurat dengan deviasi yang sangat kecil terhadap hasil yang didapat melalui eksperimen sehingga persamaan ini mampu diaplikasikan dalam kisaran suhu dan tekanan yang luas. *Persamaan keadaan Redlich-Kwong*

$$p = \frac{RT}{(v-B)} - \frac{A}{T^{1/2}v(v+B)}$$

Menggunakan faktor kompresibilitas: Persamaan keadaan Vander Waals

$$pv = v \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v}$$

$$Z = \frac{1}{1 - \frac{b}{v}} - \frac{a}{vRT}$$

Persamaan keadaan Redlich-Kwong:

$$\frac{pv}{RT} = \frac{v}{v-B} - \frac{A}{RT^2 v(v+B)}$$

$$Z = \frac{1}{1 - \frac{B}{v}} - \frac{A}{RT^2 v(v+B)}$$

Untuk memperoleh kurva  $p$  terhadap  $v$ , kita harus mengubah persamaan keadaan Van der Waals menjadi:

$$\left( p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

$$pv - pb + \frac{a}{v} - \frac{ab}{v^2} - RT = 0$$

$$pv^3 - (pb + RT)v^2 + av - ab = 0$$

$$v^3 - \left( b + \frac{RT}{p} \right) v^2 + \frac{a}{p} v - \frac{ab}{p} = 0$$

Sifat-sifat gas dapat dipelajari dari segi eksperimen dan dari segi teori. Hukum-hukum berikut diperoleh dari hasil-hasil eksperimen, yaitu:

#### *Hukum Boyle*

Volume dari sejumlah tertentu gas pada temperatur, tetap berbanding terbalik dengan tekanannya. Secara sistematis dapat ditunjukkan :

$$V = K_1 / P$$

$V$  = Volume gas.  $P$  = Tekanan gas.

$K_1$  = Tetapan yang besarnya tergantung temperatur, berat gas, jenis gas dan satuan  $P$  dan  $V$

#### *Hukum Charles*

Dalam termodinamika dan kimia fisik, *hukum Charles* adalah hukum gas ideal pada tekanan tetap yang menyatakan bahwa *pada tekanan tetap, volume gas ideal bermassa tertentu berbanding lurus terhadap temperaturnya (dalam Kelvin)*.

Secara matematis, hukum Charles dapat ditulis sebagai:

$$\frac{V}{T} = k$$

dengan

$V$ : volume gas ( $m^3$ ),

$T$ : temperatur gas (K), dan

$k$ : konstanta.

Hukum ini pertama kali dipublikasikan oleh Joseph Louis Gay-Lussac pada tahun 1802, namun dalam publikasi tersebut Gay-Lussac mengutip karya Jacques Charles dari sekitar tahun 1787 yang tidak dipublikasikan. Hal ini membuat hukum tersebut dinamai hukum Charles. Hukum Boyle, hukum Charles, dan hukum Gay-Lussac merupakan hukum gas gabungan. Ketigahukum gas tersebut bersama dengan hukum Avogadro dapat digeneralisasikan oleh hukum gas ideal.

[http://id.wikipedia.org/wiki/Hukum\\_Charles](http://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_Charles)

Volume suatu gas pada tekanan tetap, bertambah secara linear dengan naiknya suhu. Hubungan volume gas dengan suhunya pada tekanan tetap, secara sistematis dapat ditulis:

$$V = b.T$$

$V$  = suhu dalam Kelvin  $b$  = tetapan

$V$  = volume gas

*Avogadro*

Avogadro mengamati bahwa gas-gas yang mempunyai volume yang sama. Karena jumlah partikel yang sama terdapat dalam jumlah mol yang sama, maka hukum Avogadro sering dinyatakan bahwa “pada suhu dan tekanan yang sama (konstan), gas-gas dengan volume yang sama mempunyai jumlah mol yang sama”.

$$V = a.n$$

$V$  = volume gas pada suhu dan tekanan tertentu  $A$  = tetapan

$n$  = jumlah mol

### c. Persamaan Keadaan Non-Gas

Bila suatu sistem bukan sistem gas (cairan ataupun padatan), dan bila besaran keadaannya hanya berupa tekanan, volume dan temperatur, maka secara umum dapat diperoleh persamaan keadaan berdasarkan pendekatan orde pertama deret Taylor. Volume sistem secara umum akan merupakan fungsi dari tekanan dan temperatur.

### d. Perubahan Keadaan

Suatu sistem termodinamika bila mengalami perubahan nilai-nilai besaran fisis makroskopiknya maka dikatakan sedang mengalami suatu proses. Karena terjadi perubahan pada besaran fisis makroskopiknya maka secara umum sistem tidak berada dalam kesetimbangan termodinamik dan besaran keadaan tidak

dapat didefinisikan. Proses semacam ini secara umum tidak akan dapat kembali ke kondisi semula, sehingga disebut sebagai proses yang tak dapat balik (proses irreversibel). Tetapi bila perubahan dilakukan secara perlahan-lahan sekali, sehingga setiap saat dapat dianggap mendekati keadaan kesetimbangan termodinamika, maka besaran termodinamika dapat didefinisikan dan kondisi sistem dapat dikembalikan ke kondisi semula. Proses semacam ini disebut sebagai proses dapat balik (proses reversibel). Dalam realitanya proses dapat balik tidak pernah ada, tetapi proses semacam ini dapat didekati yaitu bila prosesnya dilakukan secara perlahan dan dijaga agar mendekati kondisi kesetimbangan termodinamik. Proses terakhir ini disebut sebagai proses agak dapat balik (proses quasi reversibel).

Untuk sistem gas, terdapat beberapa jenis proses termodinamika diantaranya:

1. Proses isobarik adalah proses dengan tekanan konstan.
2. Proses isothermal adalah proses dengan temperatur konstan.
3. Proses isovolumetrik atau isokhorik adalah proses dengan volume konstan.
4. Proses adiabatik adalah proses tanpa adanya panas yang keluar ataupun masuk ke dalam sistem.

Dalam semua jenis proses, dapat balik maupun tak dapat balik, perubahan besaran keadaan hanya bergantung pada nilai akhir dan awal besaran keadaan tersebut dan tidak bergantung pada proses yang terjadi. Misalnya perubahan volume, tekanan ataupun temperatur hanya bergantung pada nilai akhir dan nilai awal besaran-besaran tersebut. Sebaliknya bila ada perubahan nilai suatu besaran  $_s$  yang bergantung pada proses dan tidak hanya bergantung pada keadaan akhir dan awal maka besaran fisis ini bukanlah besaran keadaan.

## **C. Penutup**

### **1. Rangkuman**

Persamaan keadaan adalah sebuah persamaan konstitutif yang menyediakan hubungan matematik antara dua atau lebih fungsi keadaan yang berhubungan dengan materi, seperti temperatur, tekanan, volume dan energi dalam.

Sistem berada dalam keadaan seimbang mekanis, apabila resultan semua gaya (luar maupun dalam) adalah nol. Sistem berada dalam keadaan seimbang kimiawi, apabila didalamnya tidak terjadi perpindahan zat dari bagian yang satu ke bagian yang lain (difusi)

dan tidak terjadi reaksi-reaksi kimiawi yang dapat mengubah jumlah partikel semulanya dan tidak terjadi pelarutan atau kondensasi. sistem berada dalam keadaan seimbang termal dengan lingkungannya, apabila koordinat-koordinatnya tidak berubah, meskipun system berkontak dengan lingkungan melalui dinding diatermik. sistem berada dalam keadaan seimbang termodinamika, apabila ketiga syarat keseimbangan diatas terpenuhi. Suatu gas disebut gas ideal bila memenuhi hukum gas ideal, yaitu hukum Boyle, Gay Lussac, dan Charles dengan persamaan  $P.V = n.R.T$ . Gas yang mengikuti hukum Boyle dan hukum Charles, disebut gas ideal. persamaan van der Waals untuk gas nyata adalah:  $(P + P')(V - nb) = nRT$ . Persamaan Beattie- Bridgeman ini terdiri atas dua persamaan, persamaan pertama untuk mencari nilai tekanan (P), sedangkan persamaan kedua untuk mencari nilai volume molar ( $V_m$ ).

$$P = \frac{RT}{V_m} + \frac{\beta}{V_m^2} + \frac{\gamma}{V_m^3} + \frac{\delta}{V_m^4}$$

$$V_m = \frac{RT}{P} + \frac{\beta}{RT} + \frac{\gamma}{(RT)^2} + \frac{\delta}{(RT)^3}$$

Dimana:

$$\beta = RT\beta_0 - A_0 \quad \frac{Rc}{T^2}$$

$$\gamma = -RTB_0 + A \quad \frac{u - RCB_0}{T^2}$$

$$\delta = \frac{RB_0bc}{T^2}$$

Nilai  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  merupakan konstanta gas yang nilainya berbeda pada setiap gas. Daftar nilai  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $a$ ,  $b$ , dan  $c$ .

*Hukum Boyle* adalah Volume dari sejumlah tertentu gas pada temperatur, tetap berbanding terbalik dengan tekanannya.

*Hukum Charles* adalah hukum gas ideal pada tekanan tetap yang menyatakan bahwa pada tekanan tetap, volume gas ideal bermassa tertentu berbanding lurus terhadap temperaturnya (dalam Kelvin). *Avogadro* sering dinyatakan bahwa "pada suhu dan tekanan yang sama (konstan), gas-gas dengan volume yang sama mempunyai jumlah mol yang sama".

Bila suatu sistem bukan sistem gas (cairan ataupun padatan), dan bila besaran keadaannya hanya berupa tekanan, volume dan temperatur, maka secara umum dapat diperoleh persamaan keadaan berdasarkan pendekatan orde pertama deret Taylor.

Suatu sistem termodinamika bila mengalami perubahan nilai-nilai besaran fisis makroskopiknya maka dikatakan sedang mengalami suatu proses. Karena terjadi perubahan pada besaran fisis makroskopiknya maka secara umum sistem tidak berada dalam kesetimbangan termodinamik dan besaran keadaan tidak dapat didefinisikan. Proses semacam ini secara umum tidak akan dapat kembali ke kondisi semula, sehingga disebut sebagai proses yang tak dapat balik (proses irreversibel). Tetapi bila perubahan dilakukan secara perlahan-lahan sekali, sehingga setiap saat dapat dianggap mendekati keadaan kesetimbangan termodinamika, maka besaran termodinamika dapat didefinisikan dan kondisi sistem dapat dikembalikan ke kondisi semula. Proses semacam ini disebut sebagai proses dapat balik (proses reversibel). Untuk sistem gas, terdapat beberapa jenis proses termodinamika, diantaranya:

1. Proses isobarik adalah proses dengan tekanan konstan.
2. Proses isothermal adalah proses dengan temperatur konstan.
3. Proses isovolumetrik atau isokhorik adalah proses dengan volume konstan.
4. Proses adiabatik adalah proses tanpa adanya panas yang keluar ataupun masuk ke dalam sistem.

## **2. Tes formatif dan kunci jawaban**

### **a. Tes formatif**

1. Massa jenis nitrogen  $1,25 \text{ kg/m}^3$  pada tekanan normal. Tentukan massa jenis nitrogen pada suhu  $42^\circ \text{C}$  dan tekanan  $0,97 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$ !
2. Di dalam sebuah tangki yang volumenya  $50 \text{ dm}^3$  terdapat gas oksigen pada suhu  $27^\circ \text{C}$  dan tekanan  $135 \text{ atm}$ . Berapakah massa gas tersebut?
3. Sebuah tangki berisi  $8 \text{ kg}$  gas oksigen pada tekanan  $5 \text{ atm}$ . Bila oksigen dipompa keluar lalu diganti dengan  $5,5 \text{ kg}$  gas karbondioksida pada suhu yang sama, berapakah tekanannya?
4. Massa  $1 \text{ mol}$  air  $10 \text{ kg}$ . berapa jumlah molekul  $\text{H}_2\text{O}$  dalam  $1 \text{ gr}$  berat air. Berapakah jarak rata-rata antara molekul pada tekanan  $1,01 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$  dan pada suhu  $500^\circ \text{K}$ ?
5. Sebuah tangki yang volumenya  $100 \text{ lt}$  berisi  $3 \text{ kg}$  udara pada tekanan  $20 \text{ atm}$ . Berapa banyaknya udara yang harus dimasukkan dalam tangki itu supaya tekanannya menjadi  $25 \text{ atm}$ ?

6. Analisis volumetri dari suatu campuran gas ideal memberikan data sebagai berikut :

Komponen	% volume
N <sub>2</sub>	60
CO <sub>2</sub>	40

Campuran berada pada tekanan 1,5 Mpa dan temperatur 30°C.

Hitunglah :

- Komposisi berdasarkan analisa gravimetri
- Tentukan massa campuran jika volumenya 1 m<sup>3</sup>
- Campuran gas dilewatkan suatu alat penukar kalor sehingga temperaturnya bertambah 120°C. Tentukan kalor yang diserap campuran.

**b. Kunci jawaban**

$$\begin{aligned}
 1. \rho_1 &= 1,25 \text{ kg/m}^3 \\
 p_1 &= 76 \text{ cm Hg} \\
 T_1 &= 273 \text{ K} \\
 T_2 &= 315 \text{ K} \\
 p_2 &= 0,97 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} \\
 p_1 &= 76 \text{ cm Hg} \\
 &= 76 \cdot 13,6 \cdot 980 \text{ dyne/cm}^3 \\
 &= 76 \cdot 13,6 \cdot 980 \cdot 10^{-5} \\
 &= \frac{\quad}{10^{-4}}
 \end{aligned}$$

$$= 101292,8 \text{ N m}^{-2}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 V_1 T_1 &= p_2 V_2 T_2 \\
 p_1 \frac{m_1}{\rho} &= p_2 \frac{m_2}{\rho} \\
 \frac{1}{T_1} &= \frac{2}{T_2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 T_1 \rho_1 &= \frac{p_2}{T_2 \rho_2} \\
 \frac{101292,8}{273 \cdot 1,25} &= \frac{0,97 \cdot 10^5}{315 \cdot \rho_2}
 \end{aligned}$$

$$\rho_2 = 0,9638 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 2. R &= 0,821 \text{ lt atm/mol}^\circ \\
 k_p &= 135 \text{ atm} \\
 V &= 50 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

T

= 300° K

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{135 \cdot 50}{0,0821 \cdot 300} = 274 \text{ mol}$$

$$M_{O_2} = 16 + 16 = 32$$

$$m_{O_2} = 32 \cdot 274 = 8768 \text{ gr}$$

$$3. \quad M_{O_2} = 32 \quad \rightarrow n(8 \text{ kg } O_2) = \frac{8000}{32} = 250 \text{ mol}$$

$$M_{CO_2} = 44 \quad \rightarrow n(5,5 \text{ kg } CO_2) = \frac{5500}{44} = 125 \text{ mol}$$

$$p_1 = 5 \text{ atm}$$

$$p_1 V_1 = n_1 R T_1 \quad T_1 = T_2$$

$$p_2 V_2 = n_2 R T_2 \quad V_1 = V_2$$

$$\rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1 n_2}{n_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$p_2 = p_1 \frac{n_2}{n_1} = 5 \cdot \frac{125}{250} = 2,5 \text{ atm}$$

$$4. \quad pV = nRT$$

$$V = \frac{nRT}{p} = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 10^3 \cdot 500}{18000} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$p = 1,01 \cdot 10^5$$

$$4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 18000 = \frac{1,01 \cdot 10^5}{-26} \quad 3$$

$$\diamond \text{ Volume tiap molekul} = \frac{1,01 \cdot 10^5}{6,025 \cdot 10^{26}} = 134,4 \cdot 10^{-26} \text{ m}^3$$

❖ Jarak partikel- partikel dianggap seperti bola, sehingga:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$134,4 \cdot 10^{-26} = \frac{4}{3} \cdot 3,14 r^3 \Rightarrow r^3 = 32,09 \cdot 10^{-26} \rightarrow r = \sqrt[3]{32,09 \cdot 10^{-26}}$$

$r =$

5.  $T_1$

$V_1$

$\frac{p_1 V_1}{n R}$

$= T_2$

$= V_2$

$= \frac{p_2 V_2}{n R}$

$$\frac{p_1 V_1}{n} = \frac{p_2 V_2}{n}$$

$$\frac{20 \cdot 100}{3} = \frac{25 \cdot 100}{m_2}$$

$$m_2 = \frac{2500 \cdot 3}{2000} = 3,75 \text{ kg}$$

6. a. Analisa gravimetri

$$y_i = v f_i$$

Comp.	$y_i$	$M_i$ kg/kmol	$y_i M_i$ kg/kmol	$m f_i = y_i M_i / M_m$ kg/kg <sub>m</sub>
N <sub>2</sub>	0.60	28	16.8	0.488
CO <sub>2</sub>	0.40	44	17.6	0.512
			$M_m = \sum y_i M_i = 34.4$	

b. Masa campuran

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})$$

$$= \frac{8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}}{34.4 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.242 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_m = \frac{P_m V_m}{R_m T_m}$$

$$= \frac{1.5 \text{ MPa} (1 \text{ m}^3)}{(0.242 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})) (30 + 273) \text{ K}} \frac{10^3 \text{ kJ}}{\text{m}^3 \text{ MPa}}$$

$$= 20.45 \text{ kg}$$

dengan menggunakan tabel propertis A-2 (Cengel and Bole, 2004) maka didapat:  $C_p$   
 $N_2 = 1,039 \text{ kJ/kg.K}$  dan  $C_p \text{ CO}_2 = 0,846 \text{ kJ/kg.K}$  maka;

$$C_{p,m} = \sum_1^2 mf_i C_{p,i} = (0.488)(1.039) + (0.512)(0.846)$$

$$= 0.940 \frac{kJ}{kg_m \cdot K}$$

$$C_{v,m} = C_{p,m} - R_m = (0.940 - 0.242) \frac{kJ}{kg_m \cdot K}$$

c. Perpindahan

$$= 0.698 \frac{kJ}{kg_m \cdot K}$$

...

$$= 0.940 \frac{kJ}{kg_m \cdot K} (120 K)$$

$$= 112.8 \frac{kJ}{kg_m}$$



## **BAB III**

### **HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA**

#### **A. Pendahuluan**

Materi utama mata kuliah Termodinamika teknik I sangat perlu mempelajari dan memahami tentang hukum pertama termodinamika yang mencakup tentang: pengertiannya, kalor dan kerja, energi dalam dan perubahannya, kapasitas kalor, kalor jenis gas, dan usaha yang dilakukan gas. Semua itu akan disajikan dalam penyajian materi dengantujuan mahasiswa dapat mengetahui dan mengerti tentang hukum pertama termodinamika dengan menggunakan proses-proses dan persamaan-persamaan matematika. Kemudian dilanjutkan dengan penutup yang berisi tentang rangkuman penyajian dan tes formatif beserta kunci jawabannya.

#### **B. Penyajian**

##### **1. Pengertian Hukum Pertama Termodinamika**

Hukum pertama termodinamika adalah suatu pernyataan bahwa energi adalah kekal, energi tidak dapat diciptakan/dimusnahkan. Hukum ini menyatakan, jika kalor  $\Delta Q$  masuk ke dalam sistem, energi ini haruslah muncul sebagai penambahan energi dalam sistem  $\Delta U$  dan/atau usaha yang dilakukan sistem pada lingkungannya.

Energi dapat berganti bentuk yang lain, misalnya: menjadi kalor.

1 joule = 0,24 kalori ; 1 kalori = 4,2 joule  
Persamaannya dapat ditulis:

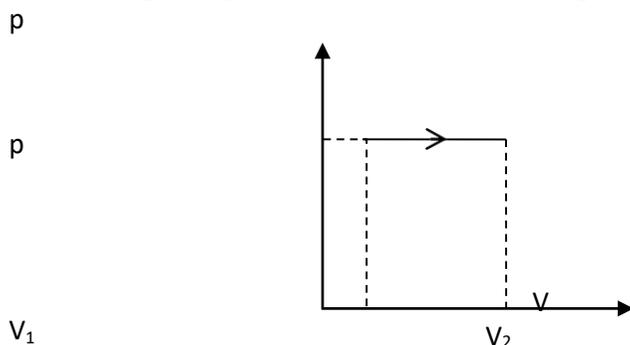
$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

Kesimpulan : Bahwa tidak mungkin suatu mesin akan bekerja terus menerus tanpa penambahan energi dari luar (*perpetum mobbille I*).

$\Delta Q$ ,  $\Delta U$  dan  $\Delta W$  harus dinyatakan dalam satuan yang sama: joule, atau ft lb atau kalori, atau Btu.

### a. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah suatu proses dimana pada proses tersebut tekanannya adalah tetap. Diagram antara tekanan terhadap waktu seperti gambar di bawah ini.



Gambar: Diagram tekanan terhadap volume pada proses isobarik

Berdasarkan diagram tersebut di atas Usaha yang dilakukan gas adalah :  $W = p(V_2 - V_1)$

$W$  = usaha yang dilakukan gas (J)  
 $p$  = tekanan gas (Pa)

$V_1$  = Volume gas pada keadaan awal ( $m^3$ )

$V_2$  = Volume gas pada keadaan akhir ( $m^3$ )

Jika pada proses ekspansi, volume gas membesar maka dikatakan gas melakukan usaha, tetapi jika pada proses pemampatan, volume gas mengecil maka dikatakan gas dikenai kerja.

$$V_1 = \frac{V_2 T_1}{T_2}$$

Proses isobarik adalah proses di mana tekanan sistem tidak berubah.

$$\Delta Q_p = m c_p \Delta T$$

atau :  $\Delta Q_p = n c_p \Delta T$

$$\Delta W = P \Delta V = n R \Delta T$$

$$\Delta U = \Delta Q_v$$

Untuk gas monoatomik:  $\Delta U = 3/2 N k \Delta T = 3/2 n R \Delta T = n c_v \Delta T$

$$c_v = 3/2 R \text{ joule/mol K}$$

$$\Delta Q_p = \Delta U + \Delta W$$

$$n c_p \Delta T = n c_v \Delta T + n R \Delta T$$

$$c_p = c_v + R$$

$$\text{sehingga } c_p = 3/2 R + R = 5/2 R \text{ joule/mol K}$$

**Untuk gas diatomik:**

Suhu Rendah	: $c_v = 3/2 R$	:	$c_p = 5/2 R$
Suhu Sedang	: $c_v = 5/2 R$	:	$c_p = 5/2 R$
Suhu Tinggi	: $c_v = 7/2 R$	:	$c_p = 7/2 R$

$$1 \text{ J/mol K} = \frac{1}{M} \text{ J/kg K}$$

**Gas Monoatomik** :  $c_v = 3/2 R/M$   
 joule / kg K  
 $c_p = 5/2 R/M$

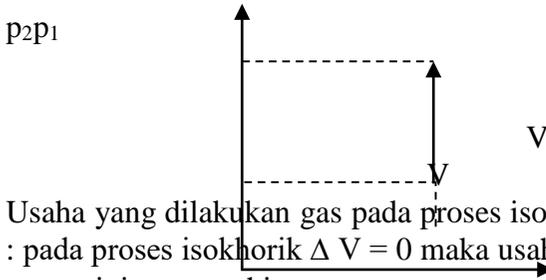
**b. Proses Isokhorik**

Proses isokhorik adalah suatu proses dengan volume tetap di manavolume sistem tidak berubah, yakni kalor yang masuk sistem menjelma sebagai penambahan energi dalam sistem.

Pada proses volume tetap berlaku hukum Gay-Lussac yang menyatakan

$$p = \frac{nR}{V} = \text{tetap}$$

diagram hubungan antara tekanan dan volume adalah sebagai berikut:p



Usaha yang dilakukan gas pada proses isokhorik adalah sebagai berikut

: pada proses isokhorik  $\Delta V = 0$  maka usaha yang dilakukan gas yang mengalami proses ini memenuhi :  $\Delta W = p \Delta V = 0$  sehingga

hukum pertama termodinamika menjadi :  $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$

$\Delta W = 0$  ( tidak terjadi perubahan volume)

Maka;  $\Delta Q_v = \Delta U$

$\Delta Q_v = n c_v \Delta T$  atau  $\Delta Q_v = m c_v \Delta T$

$U \Delta = 3/2 n R \Delta T$  (gas monoatomik=gas diatomik suhu rendah)

$U \Delta = 5/2 n R \Delta T$  (gas diatomatik suhu sedang )

$U \Delta = 7/2 n R \Delta T$  (gas diatomatik suhu tinggi)

$$W = \Delta Q_p - \Delta Q_v$$

$$W = n (c_p - c_v) \Delta T, \text{ atau}$$

$$W = m(c_p - c_v) \Delta T$$

### Gas diatomik

Suhu Rendah	: $c_v = 3/2 R/M$	} ;	$c_v = 3/2 nR$	} J/K	
: $c_p = 5/2 R/M$			$c_p = 5/2 nR$		
Suhu Sedang	: $c_v = 5/2 R/M$		J/kg.K		$c_v = 5/2 nR$
: $c_p = 7/2 R/M$			$c_p = 7/2 nR$		
Suhu Tinggi	: $c_v = 7/2 R/M$		$c_v = 7/2 nR$		
: $c_p = 9/2 R/M$			$c_p = 9/2 nR$		

### Gas monoatomik :

$$\Delta Q_v = \Delta U \qquad \Delta Q_p = \Delta Q_v + \Delta W$$

$$C_v \Delta T = 3/2 n R \quad \Delta T \quad C_v = 3/2 n R$$

$$R \qquad \Delta W = \Delta Q_p - \Delta Q_v$$

$$n R \Delta T = (C_p - C_v) \Delta T (C_p - C_v) =$$

$$n R \text{ joule/ K}$$

### c. Proses Isotermik

Proses isotermik adalah proses di mana suhu tidak berubah. Untuk gas ideal yang mengalami proses isotermik  $\Delta U = 0$ . Tetapi hal ini tidaklah berlaku untuk sistem-sistem lain. Sebagai contoh kalau es mencair pada  $0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta U \neq 0$  meskipun proses pencairan berlangsung pada suhu tetap.

Proses Isotermik gas ideal:  $\Delta U = 0$

$$\Delta Q = \Delta W$$

$$W = n RT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$W = n RT \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$W = P \Delta V = n R \Delta T$$

Apabila gas ideal mengalami proses di mana  $(p_1, V_1)$  berubah menjadi  $(p_2, V_2)$ , di mana  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ , berlaku bahwa:

$$\Delta Q = \Delta W = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \qquad \frac{W}{p_1 V_1} = 2,30 \log \frac{V_2}{V_1}$$

Disini  $\ln$  dan  $\log$  adalah logaritma dengan bilangan dasar  $e$  dan  $10$ .

#### d. Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah proses di mana tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem. Maka  $\Delta Q = 0$ , hingga untuk proses demikian, hukum pertama menjadi :

$$0 = \Delta U + \Delta W$$

artinya  $\Delta U = - \Delta W$

Apabila sistem melakukan kerja, energi dalamnya harus turun. Apabila kerja dilakukan pada sistem, energi dalamnya akan naik. Apabila gas ideal mengalami proses, di mana keadaannya  $(p_1, V_1, T_1)$  berubah

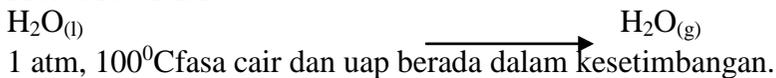
secara adiabatik menjadi  $(p_2, V_2, T_2)$ , berlakulah :  $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$  dan  $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$

dengan  $\gamma = c_p/c_v$ .

Pelaksanaan hukum pertama Termodinamika pada proses-proses di atas mengikuti hukum kekekalan energi.

#### e. Proses reversible dan tidak reversible

Proses reversible:



#### 2. Kalor dan Kerja

**Kalor (q):** energi yang dipindahkan melalui batas-batas sistem sebagai akibat langsung dari perbedaan suhu antara sistem dan lingkungannya.

- q: positif jika kalor masuk sistem
- q: negatif jika kalor keluar dari sistem.

**Kerja (W):** energi dan bukan kalor yang dipertukarkan antara sistem dengan lingkungannya pada suatu perubahan keadaan.

- W positif bila lingkungan melakukan kerja terhadap sistem, misalnya proses pemampatan gas.
- W negatif bila sistem melakukan kerja terhadap lingkungan, misalnya proses pemuaian gas terhadap atmosfer.

Luas penampang penghisap : A Tekanan

luar :  $P_l$

Jarak : dx

Kerja = gaya \* jarak  $dW = -$

$$P_l * A * dx \quad dW = - P_l * dV$$

$dV$  = perubahan volum yang terjadi pada proses tanda (-) karena kerja dilakukan oleh gas.

$$V_2$$

$$W = - \int P_l dV$$

$V_1$

- $P_l = 0$  : gas memuai terhadap vakum  
 $W = 0 \rightarrow$  proses ekspansi bebas
- $P_l$  tetap  $\rightarrow$  gas memuai pada tekanan atmosfer yang tetap.

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P_l dV = - P_l (V_2 - V_1) = - P_l \Delta V$$

$V_1$

- Proses pemuaian reversibel :  $P_l = P - dP$

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} (P - dP) dV = - \int_{V_1}^{V_2} P dV + \int_{V_1}^{V_2} dP dV$$

$$W_{rev} = - \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad P = \text{tekanan gas.}$$

Untuk gas ideal :  $PV = nRT$

$$W_{rev} = - \int_{V_1}^{V_2} nRT (dV/V) = -nRT \ln (V_2/V_1)$$

### 3. Energi dalam dan perubahan energi dalam.

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

**Hukum Pertama Termodinamika.**  $dU = dq + dW$

$$\int dU = \int dq + \int dW \quad (dW = -P_1 dV)$$

$$U_2 - U_1 = \Delta U = q + W.$$

Untuk proses yang berjalan pada Volume tetap, maka harga  $\Delta U =$

$q_v$

### Entalpi dan Perubahan Entalpi

Reaksi kimia berjalan pada tekanan sistem yang tetap dan samadengan tekanan luar.

$$dU = dq - P dV$$

$$U_2 - U_1 = q_p - P (V_2 - V_1) \quad U_2 - U_1 = q_p -$$

$$PV_2 + PV_1 \quad U_2 - U_1 = q_p - P_2 V_2 + P_1 V_1$$

$$(U_2 + P_2 V_2) = (U_1 + P_1 V_1) + q_p$$

$$\mathbf{H = U + PV}$$

$$H_2 - H_1 = q_p$$

**H** : fungsi keadaan.

$$\rightarrow \Delta H = q_p$$

#### 4. Kapasitas kalor.

$$C = \frac{dq}{dT}$$

$$U = f(T, V)$$

$$dU = (\partial U / \partial V)_T dV + (\partial U / \partial T)_V dT \quad dU = dq - P dV$$

$$dq = dU + P dV$$

$$dq = (\partial U / \partial V)_T dV + (\partial U / \partial T)_V dT + P dV$$

Proses pada volum tetap :

$$dq_v = (\partial U / \partial T)_V dT$$

$$C_V = (dq_v / dT) = (\partial U / \partial T)_V$$

$C_V$  : kapasitas panas pada volum tetap.

$$\Delta Q = m c \Delta T$$

**Proses pada volume tetap:**

$$T_2$$

$$\Delta U = \int C_V dT$$

$$H = f(P, T)$$

$$dH = (\partial H / \partial P)_T dP + (\partial H / \partial T)_P dT$$

Proses pada tekanan tetap :

$$dq_p = (\partial H / \partial T)_P dT$$

$$C_P =$$

$$\frac{dq}{dT} = (\partial H / \partial T)_P$$

$$\Delta H = \int C_P dT$$

#### 5. Kalor Jenis Gas

Suhu suatu gas dapat dinaikkan dalam kondisi yang bermacam-macam. Volumennya dikonstantakan, tekanannya dikonstantakan atau kedua-duanya dapat dirubah-rubah menurut kehendak. Pada tiap-tiap kondisi ini panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu sebesar satu satuan suhu untuk tiap satuan massa adalah berlainan. Dengan kata lain suatu gas mempunyai bermacam-macam kapasitas panas, tetapi hanya dua macam yang mempunyai arti praktis yaitu :

- Kapasitas panas pada volume konstan.
- Kapasitas panas pada tekanan konstan.

Kapasitas panas gas ideal pada tekanan konstan selalu lebih besar dari pada kapasitas panas gas ideal pada volume konstan, dan selisihnya sebesar konstanta gas umum (*universal*) yaitu :  $R = 8,317\text{J/mol } ^\circ\text{K}$ .

$$c_p - c_v = R$$

$c_p$  = kapasitas panas jenis (kalor jenis) gas ideal pada tekanan konstan.

$c_v$  = kapasitas panas jenis (kalor jenis) gas ideal pada volume konstan.

Berdasarkan teori kinetik gas kita dapat menghitung panas jenis gas ideal sebagai berikut:

a. Untuk gas beratom tunggal (monoatomik) diperoleh bahwa :

$$c_p = \frac{5}{2} R \quad c_v = \frac{3}{2} R \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,67$$

b. Untuk gas beratom dua (diatomik) diperoleh bahwa :

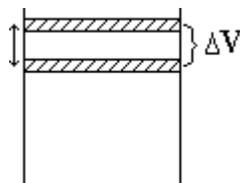
$$c_p = \frac{7}{2} R \quad c_v = \frac{5}{2} R \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$$

$$\gamma = \text{konstanta Laplace.}$$

## 6. Usaha Yang Dilakukan Gas

Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang mempelajari mengenai pengaliran panas, perubahan-perubahan energi yang diakibatkan dan usaha yang dilakukan oleh panas.

a. Usaha luar ( $W$ ) yaitu : Usaha yang dilakukan oleh sistem terhadap sekelilingnya terhadap sistem. Misalkan gas dalam ruangan yang berpenghisap bebas tanpa gesekan dipanaskan (pada tekanan tetap) ; maka volume akan bertambah dengan  $\Delta V$ .



Usaha yang dilakukan oleh gas terhadap udara luar :

$$W = p \Delta V$$

b. Usaha dalam ( $U$ ) adalah : Usaha yang dilakukan oleh bagian dari suatu sistem pada bagian lain dari sistem itu pula. Pada pemanasan gas seperti di atas, usaha dalam adalah berupa

gerakan-gerakan antara molekul-molekul gas yang dipanaskan menjadi lebih cepat.

Energi dalam suatu gas Ideal adalah : 
$$U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T$$

### C. Penutup

#### 1. Rangkuman

Hukum pertama termodinamika adalah suatu pernyataan bahwa energi adalah kekal, energi tidak dapat diciptakan/dimusnahkan.

Proses isobarik adalah suatu proses dimana pada proses tersebut tekanannya adalah tetap.

Proses isokhorik adalah suatu proses dengan volume tetap di mana volume sistem tidak berubah, yakni kalor yang masuk sistem menjelma sebagai penambahan energi dalam sistem.

Proses isotermik adalah proses di mana suhu tidak berubah. Untuk gas ideal yang mengalami proses isotermik  $\Delta U = 0$ .

Proses Isotermik gas ideal:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta W \\ W &= n RT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \\ W &= n RT \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \\ W &= P \Delta V = n R \Delta T \end{aligned}$$

Proses adiabatik adalah proses di mana tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem;  $\Delta U = - \Delta W$ .

*Proses reversible*: fasa cair dan uap berada dalam kesetimbangan. *Kalor (q)*: energi yang dipindahkan melalui batas-batas sistem sebagai akibat langsung dari perbedaan suhu antara sistem dan lingkungannya.

*Kerja (W)*: energi dan bukan kalor yang dipertukarkan antar sistem dengan lingkungannya pada suatu perubahan keadaan.

*Energi dalam dan perubahan energi dalam:* 
$$\Delta U = U_2 - U_1$$

*Kapasitas kalor: C =* 
$$\frac{dq}{dT}$$

Suatu gas mempunyai bermacam-macam kapasitas panas, tetapi hanya dua macam yang mempunyai arti praktis yaitu :

- Kapasitas panas pada volume konstan.
- Kapasitas panas pada tekanan konstan.

Kapasitas panas gas ideal pada tekanan konstan selalu lebih besar dari pada kapasitas panas gas ideal pada volume konstan, dan selisihnya sebesar konstanta gas umum (universil) yaitu :  $R = 8,317\text{J/mol}^{\circ}\text{K}$ .

Energi dalam suatu gas Ideal adalah : 
$$U = \frac{3}{2} n . R . T$$

## 2. Tes formatif dan kunci jawaban

### a. Tes formatif

1. Satu mol gas ideal diekspansikan dari 5 sampai 1 bar pada  $298^{\circ}\text{K}$ . Berapa harga  $q$  dan  $W$  jika a) ekspansi berjalan secara reversibel dan b) melawan tekanan luar yang tetap sebesar 1 bar ?. Berapa harga c)  $\Delta U$  dan d)  $\Delta H$ ?
2. Satu mol gas ideal monoatom pada 1 bar dan  $273,15^{\circ}\text{K}$  diekspansikan secara adibatis melawan tekanan luar yang tetap sebesar 0,315 bar sampai volum 2 kali volum semula. Berapa besarnya kerja yang dilakukan pada gas, suhu akhir dan perubahan energi dalam dari gas tersebut. Harga  $C_v = \frac{3}{2} R$ .
3. Selama proses isokhorik ( $v = 1 \text{ m}^3$ ), gas menerima kalor 1000 kalori sehingga tekanan berubah sebesar  $814 \text{ N/m}^2$ . Hitunglah perubahan energi dalam gas selama proses tersebut ?
4. Gas diatomik pada suhu sedang  $200 \text{ C}$  dan tekanan  $105 \text{ N/m}^2$  bervolume 4 lt. Gas mengalami proses isobarik sehingga volumenya 6 liter kemudian proses isokhorik sehingga tekanannya  $1.2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Berapakah besar perubahan energi dalam gas selama proses tersebut ?

### b. Kunci jawaban

$$1. \ a). \quad W_{\text{rev}} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$= (8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}) (298 \text{ K}) \ln \frac{1 \text{ bar}}{5 \text{ bar}}$$

$$= - 3988 \text{ J mol}^{-1}$$

$$q_{\text{rev}} = \Delta U - W_{\text{rev}}$$

$$= 0 - (- 3988 \text{ J mol}^{-1})$$

$$= 3988 \text{ J mol}^{-1}$$

$$b). W = -P_l (V_2 - V_1) = -P_l \left( \frac{RT}{P_2} - \frac{RT}{P_1} \right)$$

$$= -(1 \text{ bar})(8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1})(298 \text{ K}) \left( \frac{1}{1 \text{ bar}} - \frac{1}{5 \text{ bar}} \right)$$

$$= -1982 \text{ J mol}^{-1}$$

$$q = \Delta U - W$$

$$= 1982 \text{ J mol}^{-1}$$

c)  $\Delta U = q + W = 0$   
d)  $\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) = 0.$

2.  $V_1 = RT/P_1 = (0,08314 \text{ L bar K}^{-1} \text{ mol}^{-1})(273,15 \text{ K})/(1 \text{ bar})$   
 $V_1 = 22,71 \text{ L mol}^{-1}$   
 $W = -P_l dV = -P_l (2V_1 - V_1) = -P_l V_1$   
 $W = - (0,315 \text{ bar} * (1 \text{ atm}/1,01325 \text{ bar})) * 22,71 \text{ L mol}^{-1} W = - 7,06 \text{ L atm mol}^{-1} = - 715,4 \text{ J mol}^{-1}$

Adiabatis  $q = 0 \rightarrow \Delta U = W = C_v \Delta T$   
 $\Delta T = (- 715,4 \text{ J mol}^{-1}) / (3/2 * 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}) T_2 - T_1 = - 57,4 \text{ } ^\circ\text{K}$   
 $T_2 = 273,15 - 57,4 = 215,75 \text{ } ^\circ\text{K}.$   
 $\Delta U = - 715,4 \text{ J mol}^{-1}.$

Proses isokhorik:  $\Delta V = 0$  sehingga  $\Delta W = P \cdot \Delta V = 0 \Delta Q = \Delta U + \Delta W$   
 $\rightarrow 1000 = \Delta U + 0$   
Jadi perubahan energi dalam gas = 1000 kalori = 1000 x 4,186 J = 4186J

3.  $PV = n R T \rightarrow P \Delta V + V \Delta P = n R \Delta T$   
Proses A - B ( $\Delta P = 0$ ):  
 $P \Delta V = n R \Delta T = 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 200 \text{ J}$   
 $\Delta U_{BC} = 5/2 n R \Delta T = 500 \text{ J (diatomik 200 C)}$   
Proses :B - C ( $DV = 0$ ):  
 $V \Delta P = n R \Delta T = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^5 = 1120 \text{ J}$   
 $\Delta U_{BC} = 5/2 n R \Delta T = 300 \text{ J (diatomik 200 C)}$   
Jadi  $\Delta U$  total =  $\Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} = 800 \text{ J}$

4. Gas dimampatkan berarti volume gas bertambah kecil ( $\Delta V < 0$ )  
0) Proses gas secara isotermik berarti  $\Delta T = 0$   
Jadi:  $PV = C \rightarrow P = C/V$   
Karena volume gas bertambah kecil maka tekanan gas akan bertambah besar. Kenaikan tekanan gas ini disebabkan oleh makin seringnya molekul-molekul gas menumbuk dinding

tempatya (jarak tempuh molekul gas makin pendek) bukan karena kecepatannya yang bertambah.

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T$$

Karena proses isotermik ( $\Delta T = 0$ ), maka perubahan energi dalam sama dengan nol

( $\Delta U = 0$ ). Berarti energi dalam gas tidak berubah.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad \Delta W = P \Delta V \quad \rightarrow$$

Karena  $\Delta U = 0$  maka  $\Delta Q = \Delta W$ , berarti kalor yang diserap gas seluruhnya diubah menjadi usaha gas.

Karena volume gas bertambah kecil ( $\Delta V < 0$ ) maka usaha yang dilakukan gas negatif ( $\Delta W < 0$ ), berarti gas menerima kerja dari luar.

## BAB IV PENGUNAAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

### A. Pendahuluan

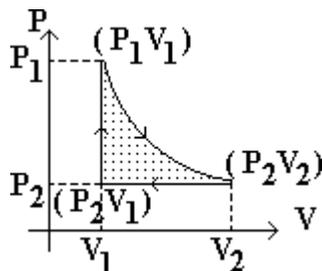
Secara teori tentang hukum pertama termodinamika telah dijelaskan dan dibahas dalam bab 1 sampai 3, namun untuk lebih memberikan manfaat bagi mahasiswa maka akan dibahas tentang penggunaan hukum pertama termodinamika, kemudian dilanjutkan dengan pembahasan tentang penerapannya dalam penelitian. Tujuan bab ini adalah mahasiswa mampu mengaplikasikan persoalan hukum pertama termodinamika dalam penggunaannya dan mampu menganalisisnya dalam bentuk penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan penutup yang berisi tentang rangkuman penyajian dan tes formatif beserta kunci jawabannya.

### B. Penyajian

#### 1. Pengertian Siklus

Suatu pesawat yang dapat mengubah seluruh kalor yang diserapnya menjadi usaha secara terus-menerus belum pernah kita jumpai. Yang adahanya perubahan kalor menjadi usaha melalui satu tahap saja. Misalnya : proses isothermis.

Agar sistem ini dapat bekerja terus-menerus dan hasilnya ada kalor yang diubah menjadi usaha, maka harus ditempuh cara-cara tertentu. Perhatikan gambar di bawah ini.



- Mulai dari  $(P_1, V_1)$  gas mengalami proses isothermis sampai  $(P_2, V_2)$ .
- Kemudian proses isobarik mengubah sistem dari  $(P_2, V_2)$  sampai  $(P_2, V_1)$ .
- Akhirnya proses isobarik membuat sistem kembali ke  $(P_1, V_1)$ . Usaha yang dilakukan sama dengan luas bagian gambar yang diarsir proses seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas disebut *Siklus*. Pada

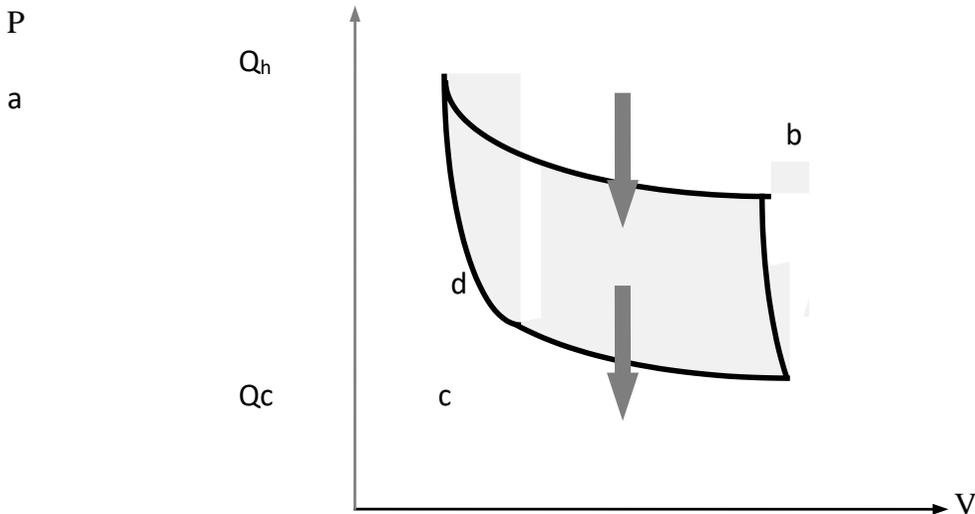
akhir proses sistem kembali ke keadaan semula. Ini berarti pada akhir siklus energi dalam sistem sama dengan energi dalam semula. Jadi untuk melakukan usaha secara terus menerus, suatu siklus harus melakukan usaha secara terus menerus, suatu siklus harus bekerja dalam suatu siklus.

### Siklus Carnot

Tahun 1824 Sadi Carnot menunjukkan bahwa mesin kalor terbalikkan dengan siklus antara dua reservoir panas adalah mesin yang paling efisien.

Siklus Carnot terdiri dari proses isotermis dan adiabatik.

- γ Proses a-b : ekspansi isotermal pada temperatur  $T_h$  (temperatur tinggi). Gas dalam keadaan kontak dengan reservoir temperatur tinggi. Dalam proses ini gas menyerap kalor  $Q_h$  dari reservoir dan melakukan usaha  $W_{ab}$  menggerakkan piston.



- γ Proses b-c : ekspansi adiabatik. Tidak ada kalor yang diserap maupun keluar sistem. Selama proses temperatur gas turun dari  $T_h$  ke  $T_c$  (temperatur rendah) dan melakukan usaha  $W_{bc}$ .
- γ Proses c-d : kompresi isotermal pada temperatur  $T_c$  (temperatur rendah). Gas dalam keadaan kontak dengan reservoir temperatur rendah. Dalam proses ini gas melepas kalor  $Q_c$  dari reservoir dan mendapat usaha dari luar  $W_{cd}$ .
- γ Proses d-a : kompresi adiabatik. Tidak ada kalor yang diserap maupun keluar sistem. Selama proses temperatur gas naik dari  $T_c$  ke  $T_h$  dan mendapat usaha  $W_{da}$ .

Efisiensi dari mesin kalor siklus Carnot :

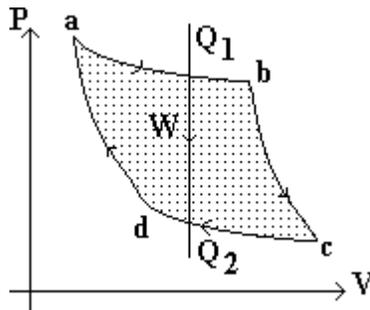
$$\eta = W/Q_h = 1 - Q_c/Q_h \text{ karena } Q_c/Q_h = T_c/T_h$$

(buktikan)

maka;

$$\eta = 1 - T_c/T_h$$

Siklus carnot yang disebut siklus ideal ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



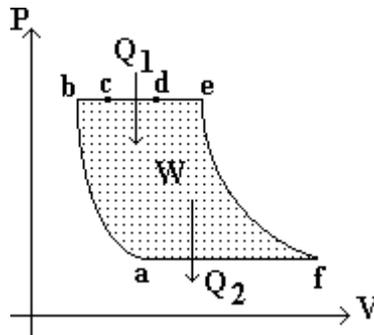
Siklus Carnot dibatasi oleh garis lengkung isotherm dan dua garis lengkung adiabatik. Hal ini memungkinkan seluruh panas yang diserap (panas input) diberikan pada satu suhu panas yang tinggi dan seluruh panas yang dibuang (panas output) dikeluarkan pada satu suhu rendah.

- Kurva ab dan cd masing-masing adalah kurva pengembangan dan pemampatan isoteremis.
- Kurva bc dan da masing-masing adalah kurva pengembangan dan pemampatan adiabatik.

Untuk bahan perbandingan, ditunjukkan beberapa siklus untuk berbagai jenis mesin.

## Siklus Mesin Uap

Siklus mesin uap yang juga disebut siklus Rankine ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Siklus ini dibatasi oleh dua garis lengkung adiabatik dan dua garis lurus isokhorik. Hanya saja pada mesin uap ini terdapat proses penguapan dan pengembunan.



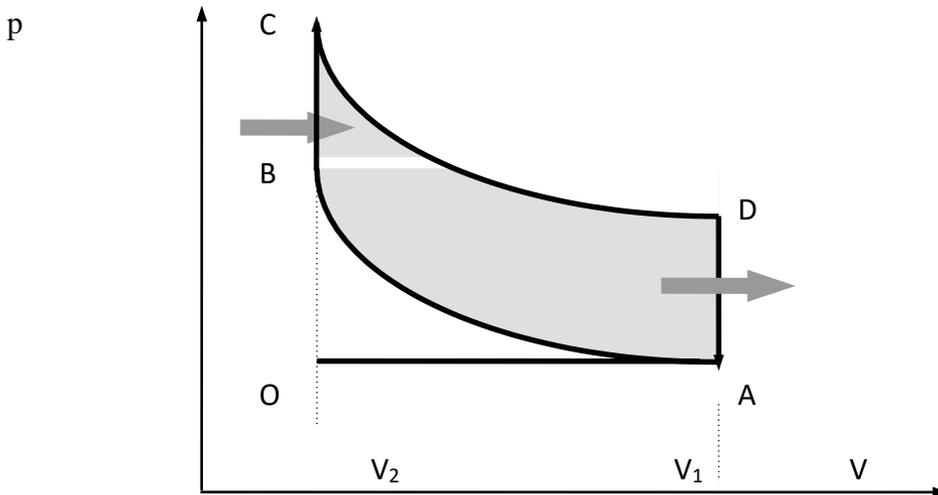
Mula-mula air dalam keadaan cair dengan suhu dan tekanan rendah dititik a.

- kurva ab adalah kurva pemampatan secara adiabatik dengan tekanan yang sama dengan tekanan di dalam periuk pendingin.
- garis cd adalah proses perubahan air menjadi uap.
- garis de adalah prosers pemanasan sehingga suhu uap sangat tinggi.
- kurva ef adalah proses pengembangan secara adiabatik.
- garis fa adalah proses pengembunan sehingga kembali ke keadaan awalnya.

## Siklus Mesin Bensin

Proses dari mesin bensin ini dapat didekati dengan siklus Otto.

- γ Proses O-A : Udara ditekan masuk ke dalam silinder pada tekanan atmosfer dan volume naik dari  $V_2$  menjadi  $V_1$ .
- γ Proses A-B : gas ditekan secara adiabatik dari  $V_1$  menjadi  $V_2$  dan temperturnya naik dari  $T_A$  ke  $T_B$ .



- γ Proses B-C : terjadi proses pembakaran gas (dari percikan api busi), kalor diserap oleh gas  $Q_h$ . Pada proses ini volume dijaga konstan sehingga tekanan dan temperturnya naik menjadi  $p_C$  dan  $T_C$ .
- γ Proses C-D : Gas berekspansi secara adiabatik, melakukan kerja  $W_{CD}$ .
- γ Proses D-A : kalor  $Q_c$  dilepas dan tekanan gas turun pada volume konstan.
- γ Proses A-O : dan pada akhir proses, gas sisa dibuang pada tekanan atmosfer dan volume gas turun dari  $V_1$  menjadi  $V_2$ .

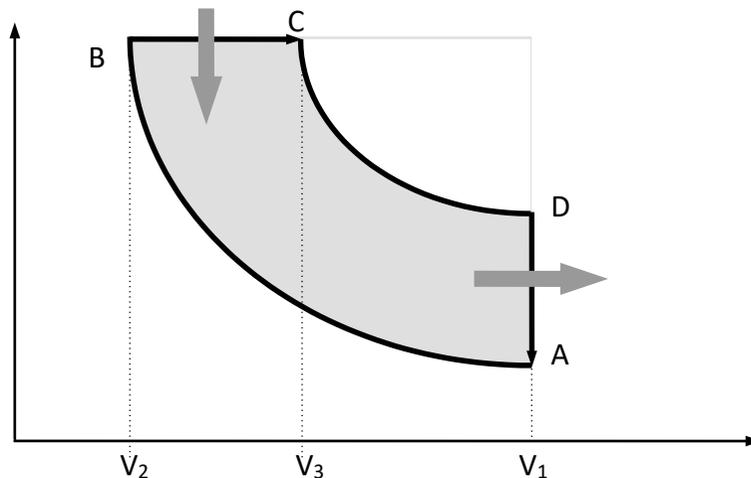
Bila campuran udara-bahan bakar dianggap gas ideal, efisiensi dari siklus Otto adalah :

$$\eta = 1 - 1/(V_1/V_2)^{\gamma-1}.$$

$V_1/V_2$ . disebut rasio kompresi.

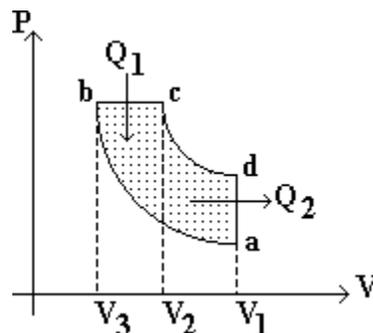
## Siklus Mesin Diesel.

Mesin diesel diidealkan bekerja dengan siklus Diesel.



Berbeda dengan mesin bensin, pembakaran gas dilakukan dengan memberikan kompresi hingga tekanannya tinggi. Pada proses BC terjadi pembakaran gas berekspansi sampai  $V_3$  dan dilanjutkan ekspansi adiabatik sampai  $V_1$ . Rasio kompresi siklus Diesel lebih besar daripada siklus Otto sehingga lebih efisien.

Siklus untuk mesin diesel ditunjukkan pada gambar di atas ini. Siklus pada mesin diesel dibatasi oleh dua garis lengkung adiabatik dan satu garis lurus isobarik serta satu garis lurus isokhorik.

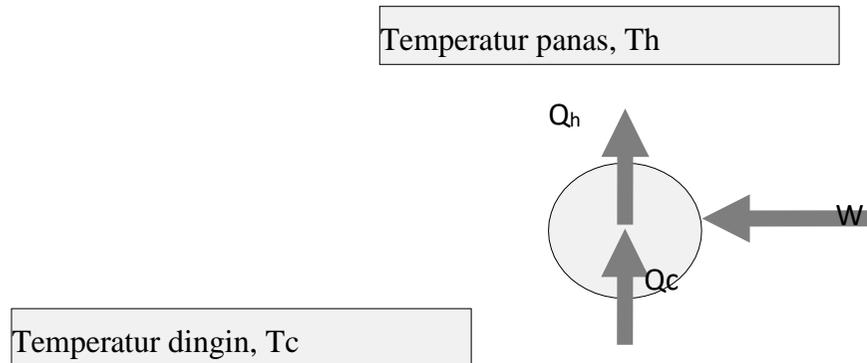


Dimulai dari titik a, maka :

- Kurva ab dan cd masing-masing adalah kurva pemampatan dan pengembangan adiabatik.
- Garis lurus bc adalah garis lurus pemanasan isobarik.
- Garis lurus cd adalah garis lurus pendinginan isokhorik..

### Heat Pumps dan Refrigerators.

Heat pump adalah peralatan mekanis untuk memanaskan atau mendinginkan ruang dalam rumah/gedung. Bila berfungsi sebagai pemanas gas yang bersirkulasi menyerap panas dari luar (*eksterior*) dan melepaskannya di dalam ruang (*interior*). Bila difungsikan sebagai AC, siklus dibalik.



Efektifitas dari heat pump dinyatakan dalam Coefisien of Performansi (COP),

$$\text{COP} = Q_h/W$$

Refrigerator, seperti dalam heat pump, memompa kalor  $Q_c$  dari ruangan di dalam ruang ke luar ruangan.

$$\text{COP} = Q_c/W$$

## 2. Penggunaan Hukum Pertama Termodinamika:

**a. Ekspansi reversibel isothermal gas ideal**

$$dV \quad W_{\text{rev}} = - \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = - RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{per mol gas})$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$W = RT \ln \frac{P_1}{P_2} \rightarrow n \text{ mol} : W = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$\Delta H$  dan  $\Delta U = 0$  pada proses isothermal

$$W = -q$$

### b. Ekspansi reversibel adiabatik gas ideal

Adiabatik  $q = 0$   $dU = dW =$

$$- P dV dU = C_V dT$$

$$C_V dT = - P dV = - RT \left( \frac{dV}{V} \right) C_V$$

$$\left( \frac{dT}{T} \right) = - R \left( \frac{dV}{V} \right)$$

$$C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = - R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \frac{C_V}{R} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma}$$

$$\Delta \left[ \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma} \right]$$

### 3. Penerapan Hukum Pertama Termodinamika dalam Penelitian

#### ANALISIS PENGARUH PENURUNAN DAYA MOTOR AKIBAT PENAMBAHAN AKSESORIS AIR CONDITION PADA MOBIL JENIS TOYOTA AVANZA (VISI (2008) 16 (3) 612 -631; ISSN 0853 – 0203)

##### *Parulian Siagian*

##### ABSTRACT

*The car type of Toyota Avanza suffers from decline in power when AC is functioned with condition of flat and up-hill fields, and the similar case is true of fuel consumption. Addition of power in speed and gear variation will just occur in certain speed to drive the car Air Conditioning. In condition of flat field, the mean speed is 20 km/h, i.e., in gear of II and III. In 40 km/h of speed, the addition of power will occur in gears II, III and IV, while in 80 km/h of speed it will occur in gear V. In up-hill field on 20 km/h of speed, the addition of power is 1,44 horse power in gear II, and increased to 100 rpm.*

**Key Words :** *Motor, air conditioning, power*

#### I. PENDAHULUAN

##### 1. Latar Belakang

Transportasi darat atau mobil keluarga di daerah perkotaan saat ini terus bertambah seiring dengan waktu dan kegiatan khususnya kendaraan roda empat sehingga menimbulkan kemacetan berakibat terhadap efisiensi waktu dan pemakaian bahan bakar.. Salah satu parameter kendaraan agar para konsumen nyaman di dalam mobil yaitu tersedianya penyejuk kabin mobil yang kita kenal dengan Air Conditioning (AC) dan kecepatan mobil. Kelengkapan asesoris lainnya akan bisa melepaskan kelelahan dan bosan penumpang yang berada pada situasi lalu lintas macet maka diperlukan juga daya yang cukup untuk dapat mengoperasikan fasilitas tersebut khusus air conditioning yang juga digerakkan oleh motor mobil.

Pemasangan air conditioning pada mobil avanza Type 1.3 E tidak dilakukan dipabrikasi mobil tersebut tetapi dipasang setelah mobil disalurkan ke dealer, ini akan mempengaruhi langsung kinerja mobil pada saat beroperasi. Dengan daya sebesar 86 Hp pada jenis mobil Toyota Avanza sebagian daya itu di fungsikan untuk menggerakkan mobil dan air conditioning yang berimplikasi terjadi penurunan daya, karena torsi yang diberikan oleh motor pada roda penggerak guna menggerakkan mobil dengan berat total tertentu menjadi berkurang sehingga mobil akan mengalami penurunan laju kecepatan pada saat di daerah jalan rata maupun menanjak. Sebaliknya tanpa menggunakan Air Conditioning mobil akan beroperasi secara normal kembali.

##### 2. Tujuan Penulisan

- Untuk mengetahui besar daya motor terhadap pemakaian air conditioning dan kecepatan kendaraan pada jalan rata dan menanjak.

##### 3. Pembatasan Masalah

Mengingat luasnya cakupan penelitian ini maka dibatasi hanya pada:

1. Mobil yang dipakai adalah mobil Toyota Avanza Type 1.3 E

2. Perhitungan termodinamika motor, kecepatan mobil pada jalan rata dan menanjak
3. Kehilangan daya pada pulley dan kompressor
4. Performasi motor jenis Toyota Avanza Type 1.3E pada jalan rata dan menanjak.

#### 4. Hipotesa

Dengan menggunakan asesoris air conditioning pada mobil Toyota Avanza akan terjadi penurunan daya motor dan kecepatan kendaraan pada jalan rata dan menanjak.

### 5. Tinjauan Pustaka

#### 5.1. Cara Kerja Motor Bensin

Bahan bakar bensin dibakar di dalam silinder untuk menghasilkan tenaga. Campuran udara dan bahan bakar dari karburator dimasukkan kedalam silinder kemudian dikompresikan hingga mencapai tekanan tertentu. Selanjutnya dengan bantuan percikan api dari elektroda busi campuran kimia udara dan bahan bakar tersebut akan terbakar. Pembakaran ini menghasilkan panas yang akan menaikkantekanan didalam silinder secara serentak. Tekanan gas inilah yang kemudian menekan torak sehingga torak dapat bergerak secara translasi, gerak translasi ini kemudian diubah menjadi gerak rotasi melalui mekanisme poros engkol (Raharjo Tirtoatmodjo, 2000).

Cara kerja motor bensin 4 tak:

- A. Langkah Isap:** Campuran udara dan bahan bakar diisap kedalam silinder, hal ini tekanan dalam silinder lebih rendah dari tekanan udara luar dimana torak bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB) yang menyebabkan vacuum didalam silinder sehingga campuran udara dan bahan bakar kedalam silinder dengan posisi katup hisap terbuka dan katup buang tertutup.
- B. Langkah Kompresi:** Campuran udara dan bahan bakar dimampatkan oleh torak bergerak dari TMB ke TMA. Katup isap dan buang akan tertutup sehingga tekanan dan tempratur campuran udara dan bahan bakar naik, dan pada akhir langkah ini busi busi akan mengeluarkan percikan bunga api sehingga terjadipembakaran dan menghasilkan tekanan yang besar yang mampu mendorong torak.
- C. Langkah Ekspansi:** Campuran udara dan bahan bakar telah terbakar dan menghasilkan tenaga yang mendorong torak menuju TMB dan proses ini katup hisap dan buang tertutup.
- D. Langkah Buang:** Setelah mendekati TMA, maka katup buang akan terbuka sehingga langkah buang mulai, yang berlangsung terus sampai torak kembali ke TMA sehingga gas-gas sisa pembakaran di tekan keluar dari silinder setelah itu torak akan kembali melakukan langkah isap dan begitu terus menerus selama operasi motor bergerak.

#### 5.2. Air Conditioning (AC)

Komponen-komponen utama dari AC antara lain:

- a. Reciever drier.
- b. Katup ekspansi
- c. Evaporator

- d. Kompresor
- e. Kondensor

### 5.3. Sabuk Datar

Sabuk datar moderen terdiri dari inti elastis yang kuat yang dikelilingi oleh kulit bersepuh chrom atau suatu elastomer. Perhitungan pemakaian daya pada pulley, kompresor yaitu daya yang ditransmisikan melalui sabuk ke pulley kompresor

$$P = \frac{((F_1 - F_2) \cdot V \cdot Sf)}{1000, HP}$$

( *A.text book of machine design. P.C Sharma.hal 160*)

Dimana :

$F_1$  : tegangan sabuk pada sisi ketat , N

$F_2$  : tegangan sabuk pada sisi longgar , N

$V$  :  $\frac{(\pi \cdot D \cdot n)}{60} = 37,68$  m/s(kecepatan sabuk)

$D$  : 0,12 m ( diameter pulley)

$Sf$  : 1,35 (factor service untuk kondisi berdebu dan basah)

$F_1$  dan  $F_2$  dapat dihitung dari persamaan:

$$F_1 - F_2 = \frac{b \cdot t \cdot (f_1 - \rho \cdot V^2) \cdot (e^{\mu\theta} - 1)}{e^{\mu\theta}}$$

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

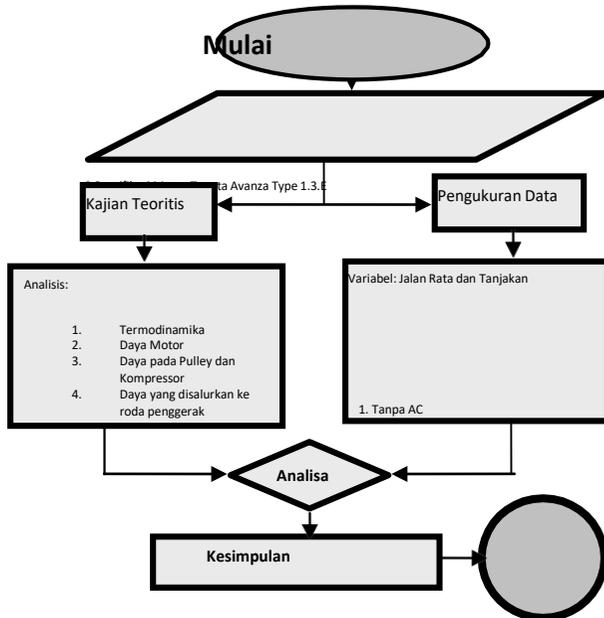
Penelitian ini dilakukan di daerah Jalan Ring Road Padang Bulan sampai dengan Simpang Helvetia Medan dengan kondisi jalan rata dan di daerah Sembahe sampai dengan daerah Tahura Berastagi dengan kondisi jalan tanjakan. Waktu penelitian pada bulan Desember 2007.

### 2.2. Alat dan Instrumen Penelitian

Alat yang dipakai yaitu sebuah mobil Jenis Toyota Avanza Type 1.3. E dengan no polisi BK. 1959 GY. Tahun pembuatan tahun 2005.

Instrumen penelitian antara lain : Tachometer dan Speedometer.

## Diagram Alir Penelitian



### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Termodinamika Motor

##### 3.1.1. Perhitungan Parameter Volume Langkah Torak

a. Volume langkah torak ( $V_s$ )

$$V_s = \pi/4 D^2 \cdot S \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$V = 0,785 \cdot 7,2^2 \cdot 7,97 = 324,3343 \text{ cm}^3$$

b. Volume Kompresi ( $V_c$ )

$$V_c = \frac{V_s}{\epsilon - 1} \text{ (cm}^3\text{)} = \frac{324,3343}{9,5 - 1} = 38,1569 \text{ cm}^3$$

$\epsilon - 1$

9,5 - 1

##### 3.1.2. Perhitungan Parameter Langkah Pengisian

a. Tekanan Pada Akhir Langkah Pengisian (awal langkah kompresi  $P_a$ )

$$P_a = (0,85 \text{ s/d } 0,92) \cdot P_o \dots \text{untuk motor tanpa supercharging}$$

$$P_a = (0,86 \cdot 1) = 0,86$$

b. Temperatur pada akhir langkah pengisian (Awal langkah kompresi  $T_a$ )

$$\frac{T_a + \Delta T}{1 + \gamma_r} + (\gamma_r \cdot T) = \frac{w}{r} \cdot r = \frac{302 + 5 + (0,1 \cdot 800)}{1 + 0,1} = 351,818 \text{ } ^0\text{K}$$

c. Efisiensi Pengisian ( $\eta_{ch}$ )

Koefisien pengisian adalah perbandingan antara jumlah udara bersih yang sebenarnya dengan secara teoritis yang dapat masuk kedalam silinder pada suatu

$$\eta_{ch} = \frac{\epsilon \cdot P_a \cdot T_0}{(\epsilon - 1) P_0 \cdot T_a \cdot (1 + \gamma_r)} = \frac{9,5 \cdot 0,86 \cdot 302}{(9,5 - 1) \cdot 1,351 \cdot 818 \cdot (1 + 0,1)} = 0,75$$

$\eta_{ch}$  untuk motor karburator 0,75 s/d 0,85 (*motor vehicle engine, hal 106*)

dimana :  $\epsilon$  = perbandingan kompresi sesuai data motor ;  $P_a$  = tekanan udara pada awal langkah kompresi ;  $T_0$  = temperatur udara luar = 302<sup>0</sup>K ;  $P_0$  = tekanan udara luar 1 kg/cm<sup>2</sup> ;  $T_a$  = temperatur udara awal langkah kompresi dan  $\gamma_r$  = koefisien gas residu 0,10.

### 3.1.3. Perhitungan Proses Kompresi

#### a. Pangkat Politropik Kompresi ( $n_1$ )

Untuk mendapatkan nilai  $n_1$  yang tepat dengan metode trial and error dihitung besaran ruas kiri dan kanan arus sama besar dimana range  $n_1 = 1,34$  s/d 1,38

$$A + B \cdot T_a (\epsilon^{n_1 - 1} + 1) = \frac{1,985}{n_1 - 1}$$

$$= 4,62 + 53 \cdot 10^{-5} \cdot 351,818 (9,5^{1,3785499 - 1} + 1) = \frac{1,985}{1,3785499 - 1}$$

$$5,243694 = 5,243694$$

#### b. Temperatur Udara Pada Akhir Kompresi ( $T_c$ )

$$T_c = T_a \cdot \epsilon^{n_1 - 1} = 351,818 \cdot 9,5^{1,3785499 - 1} = 824,964 \text{ } ^0 K$$

#### c. Tekanan akhir kompresi ( $P_c$ )

$$P_c = P_a \cdot \epsilon^{n_1} = 0,86 \cdot 9,5^{1,3785499} = 19,157 \text{ kg/cm}^2$$

#### d. Tingkat Kenaikan Tekanan ( $\lambda$ )

$$\lambda = P_z / P_c \text{ atau } P_z = P_c \cdot \mu (T_z / T_c) \hat{U} \lambda = P_z / P_c \hat{U} P_z = \lambda \cdot P_c$$

$$P_z = P_c \cdot \mu (T_z / T_c) \text{ dimana untuk motor bensin } \lambda = 1,7 - 2,2$$

### 3.1.3. Perhitungan Parameter-parameter Proses Pembakaran 1 Kg Bahan Bakar

#### a. Jumlah udara yang dibutuhkan untuk pembakaran 1 kg bahan bakar

$$L' = \alpha \cdot L_0 \text{ (mol/kgbb) dimana: } \alpha: \text{ Koef. udara lebih } 1,05 - 1,29$$

diambil 1,29 (motor karburator) sedangkan  $L_0$

$\phi$  jumlah udara

teoritis yang

diperlukan untuk pembakaran 1 kg bb

$$L_o = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right] \text{ mol/kg bb } \hat{U}$$

$$0,21 \left[ \frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} - \frac{0}{32} \right] = 0,07125 + 0,03625 - 0 = 0,1075$$

$$= 1,29 \cdot 0,1075 = 0,138675 \text{ mol/kg bb}$$

sehingga :  $L' = \alpha \cdot L$   $\hat{O} = 1,29 \cdot 0,138675$

= 0,17989075 mol/kg bb

**b. Komposisi gas-gas hasil pembakaran**

Banyaknya unsur-unsur untuk pembakaran 1 kg bb terdiri dari:

$$M_g = \alpha L \left[ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right] = 1,29 \cdot 0,138675 = 0,17989075$$

$M_g = 0,17989075$

$M_g = 0,17989075$

$$(\text{CO}_2) = M_{\text{CO}_2} = \frac{C}{12} = \frac{0,855}{12} = 0,07125 \text{ mol}$$

$$\text{Uap Air (H}_2\text{O)} = M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H}{4} = \frac{0,145}{4} = 0,03625 \text{ mol}$$

$$\text{Oksigen (O}_2) = M_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)L = 0,03117499$$

$$\text{Nitrogen (N}_2) = M_{\text{N}_2} = 0,79 \alpha L = 0,52168214 \text{ mol}$$

**c. Jumlah Total molekul gas -gas pembakaran 1 kg bb ( $M_g$ )**

$$M_g = M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} = 0,17989075 \text{ mol/kg bb}$$

**d. Koefisien perubahan molekul gas ( $\mu_0$ )**

$$\mu_0 = M_g / L' = 0,17989075 / 0,17989075 = 1,05489452$$

= 1,05489452

**e. Koefisien Perubahan Molekul dengan memperhitungkan sisa-sisa gas pembakaran ( $\mu$ ).**

Campuran bahan bakar yang dimasukkan kedalam silinder untuk proses pembakaran akan bercampur dengan sisa-sisa gas hasil pembakaran sebelumnya sehingga perubahan molekul gas secara aktual haruslah memperhitungkan sisa-sisa gas hasil pembakaran :

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,05489452 + 0,1}{1 + 0,1} = 1,04990$$

dimana :  $\mu$  = koefisien perubahan molekul gas

$\gamma_r$  = Koefisien gas -gas residu 0,08

**f. Perbandingan isi relative unsure-unsur hasil pembakaran  
Carbon dioksida (CO<sub>2</sub>)**

$$v_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_g} = \frac{c}{12 \cdot M_g} = \frac{0,855}{12,0 \cdot 69660713} = 0,102281$$

$$v_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} = \frac{h}{2 \cdot M_g} = 0,104075$$

Oksigen (O<sub>2</sub>)

$$v_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L'}{M_g} = \frac{0,21(1,29 - 1) \cdot 0,51190476}{0,69660713} = 0,04475262$$

Nitrogen (N<sub>2</sub>)

$$v_{N_2} = \frac{0,79 \cdot \alpha \cdot L'}{M_g} = \frac{0,79 \cdot 1,29 \cdot 0,51190476}{0,69660713} = 0,74889003$$

f. Panas Jenis gas-gas pada volume konstan (mc<sub>v</sub>)

(mc<sub>v</sub>)<sub>g</sub> = A<sub>g</sub> + B<sub>g</sub> · T<sub>Z</sub> (Kcal/mol<sup>0</sup>C) dimana :

$$A_g = v_{CO_2} \cdot A_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot A_{H_2O} + v_{N_2} \cdot A_{N_2} + v_{O_2} \cdot A_{O_2} = 5,06906934$$

$$B_g = v_{CO_2} \cdot B_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot B_{H_2O} + v_{N_2} \cdot B_{N_2} + v_{O_2} \cdot B_{O_2} = 0,000665047$$

$$\text{maka : } (mc_v)_g = A_g + B_g \cdot T_Z = 5,06906934 + 6,65047 \cdot 10^{-4} \cdot T_Z \quad \text{Kcal/mol}^0\text{C}$$

h. Panas jenis gas-gas pada tekanan konstan

(mc<sub>p</sub>)<sub>g</sub>

$$(mc_p)_g = (mc_v)_g + 1,985$$

$$= 7,0727869 + 6,66283 \cdot 10^{-4} \cdot T_Z \quad \text{Kcal/mol}^0\text{C}$$

i. Panas jenis molekul udara pada volume konstan dan temperatur akhir kompresi (mc<sub>v</sub>)<sub>a</sub>

$$(mc_v)_a = A_a + B_a \cdot T_c = 4,62 + 53 \cdot 10^{-5} \cdot 824,964 = 5,05723 \quad \text{Kcal/mol}^0\text{C}$$

j. Temperatur Pembakaran Maximum

Dengan persamaan pembakaran dari gabungan volume 824,964 dan tekanan konstan, jadi temperatur pembakaran adalah :

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma} \frac{T_1}{T_2}$$

o r

dimana :  $\xi_Z$  : Koefisien pemanfaatan panas pembakaran 0,84-0,95 diambil 0,85  $H_1$  :

nilai kalor bahan bakar (kcal/kg) = 9530 kcal/kg

$\alpha$  : Koef udara lebih 1,05 – 1,29 diambil 1,29

$\rho$  : jumlah udara teoritis yang diperlukan untuk pembakaran 1kg bahan bakar

(mol/kg bb) 0,51190476 mol/kg bb

$\gamma_T$  : koefisien gas-gas residu 0,10

$(mc_V)_a$  : panas jenis molekul udara pada volume konstan 5,05723 kcal/mol<sup>0</sup>C  $T_c$  :

temperatur akhir kompresi 824,964<sup>0</sup>K

$\mu$  : koef pembakaran molekul gas dengan memperhitungkan sisa gas 1,0499041

$(mc_V)_g$  : panas jenis gas-gas pada volume konstan

(kcal/mol<sup>0</sup>C) 5,069069 + 6,65047.10<sup>-4</sup>. $T_z$

Maka didapat :

0,839.9530

1,29.0,51190476(1+0,1)

(5,06906934 + 6,65047.10<sup>-4</sup>. $T_z$

$$T_z = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ ( K) dimana}$$

a : 0,00069823. $T^2$  b : 5,32203668.T c : 15179,3959245

z

z

maka : 69823.10<sup>-4</sup>. $T^2$  + 5,32203668.T + 15179,3959245 = 0

z

didapat  $T_z = 2210,888^0$  K

**k.** Tingkat perbandingan ekspansi pendahuluan ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{\mu.T_z}{\lambda.T_c} = \frac{1,04990410.2210,888}{2,81.824,964} = 1$$

Dimana  $\rho = 1$  i.e. all the heat is received at constant volume  $\lambda = 9$  (motor vehicle engine hal. 35)

**3.1.4. Perhitungan parameter-parameter proses ekspansi titik b (akhir kompresi /awal pembuangan)**

**a.** Tekanan Pembakaran Maksimum ( $P_a$ )

$$P_z = P_c \cdot \mu \left( \frac{T_z}{T_c} \right) = 19,157 \cdot 1,04990410 \cdot \frac{2210,888}{824,964} = 53,902 \text{ kg/mm}^2$$

**b.** Derajat Ekspansi Susulan ( $\delta$ )

$\delta = \epsilon / \rho$  dimana :  $\epsilon$  : perbandingan kompresi 9,5 dan  $\rho$  : derajat ekspansi

pendahuluan 1  
jadi :  $\delta = 9,5$

**c. Pangkat politropik Ekspansi ( $n_2$ )**

$$\left[ 1 \right] 1,985$$

$$A_g + B_g \cdot T_z \left| 1 + n_2^{-1} \right| = \frac{1}{n_2 - 1} \text{ dengan nilai } n_2 = 1,2704651$$

maka di dapat nilai ruas kiri dan kanan

$$-4 \left[ 1 \right] 1,985$$

$$\frac{5,06906934 + 6,65047 \cdot 10^{-2} \cdot 2210,888 \left| 1 + \frac{1,2704651}{9,5} \right|}{,339209} = \frac{1,2704651}{1,2704651} = 7,339209$$

**d. Tekanan Akhir ekspansi ( $P_b$ )**

$$P = P_z = 53,902 = 3,086 \text{ kg/mm}^2$$

$$b \quad \delta^{n_2} \quad \frac{1,2704651}{9,5}$$

**e. Tekanan Efektif ( $P_e$ )**

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad P_e = \eta_m \cdot P \text{ dimana } \eta_m = 0,80-0,85 \text{ maka :}$$

$$P_e = \eta_m \cdot P = 0,81 \cdot 12,36296 = 10,0139976 \approx 10 \text{ kg/cm}^2$$

**3.1.5. Diagram Indikator**

**a. Konstruksi diagram indikator**

Untuk mendapatkan konstruksi diagram indikator maka dihitung parameter tekanan dan volume gas pada titik 1 sampai dengan 5 yaitu : pada tekanan diagram indikator didapat :

$$P_1 = P_a = 0,85 \text{ kg/cm}^2, P_2 = P_c = 18,934 \text{ kg/cm}^2, P_{3/4} = P_z = 53,275 \text{ kg/cm}^2$$

$P_5 = P_b = 3,050420707 \text{ kg/cm}^2$  dan  $n_1 = 1,3785499, n_2 = 1,2704651$ . Untuk volumetelah didapat bahwa:  $\delta = 9,5$  dan  $\varepsilon = 9,5$  dimana

$$\varepsilon = \frac{V_s + V_c}{V_c} \quad P \quad V_c = \frac{V_s}{\varepsilon - 1} = \frac{324,33436}{9,5 - 1} = 38,15 \text{ cm}^3 \text{ maka,}$$

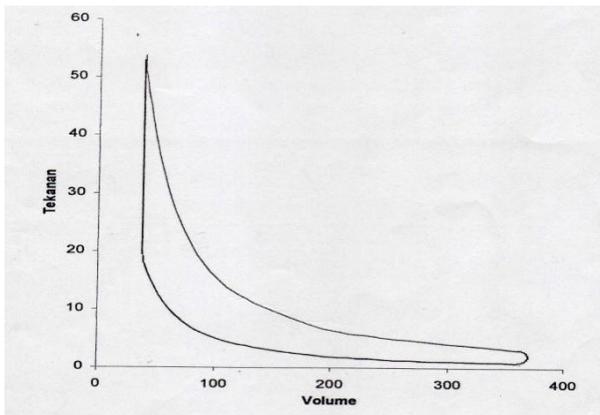
$$V_1 = V_a = V_s + V_c = 324,33436 + 38,15 = 362,4843 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = V_c = 38,15 \text{ cm}^3, V_3 = V_2 = 38,15 \text{ cm}^3,$$

$$V = V = 362,4843 \text{ cm}^3, \text{ dan } V = V^5 = 38,15 \text{ cm}^3 \text{ 5 1 } \delta$$

**b. Tekanan Indikator pada diagram Indikator**  
**Tabel 1. Perhitungan Tekanan Indikator**

$\epsilon$	$V=V_a/\epsilon$	$\epsilon^{n_1}$	$P=P_a \cdot \epsilon^{n_1}$	$\epsilon^{n_2}$	$P=P_b \cdot \epsilon^{n_2}$
1	362,4843	1	0,86	1	3,0863
1,5	241,6562	1,7488	1,5039	1,6738	5,1659
2	181,2421	2,6000	2,236	2,4123	7,4452
3	120,8281	4,5471	3,9105	4,0379	12,462
4	90,6210	6,7603	5,8138	5,8196	17,961
5	72,4968	9,1952	7,9078	7,7271	23,848
6	60,4140	11,822	10,1675	9,7412	30,064
7	51,7834	14,622	12,5750	11,8486	36,569
8	45,3105	17,577	15,1164	14,0392	43,330
9	40,2760	20,676	17,7815	16,3054	50,324
9,5	38,1562	22,276	19,1574	17,4648	53,902



Gambar 1. Diagram Indikator P-V

**3.1.6. Daya Motor ( $N_e$ )**

$$\pi \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot a \cdot P_e \cdot N$$

$$Z \cdot 60 \cdot 75 \cdot 100$$

dimana :  $z$  : Koefisien tak untuk motor 4 langkah = 2D :

Diameter silinder = 7,2 cm

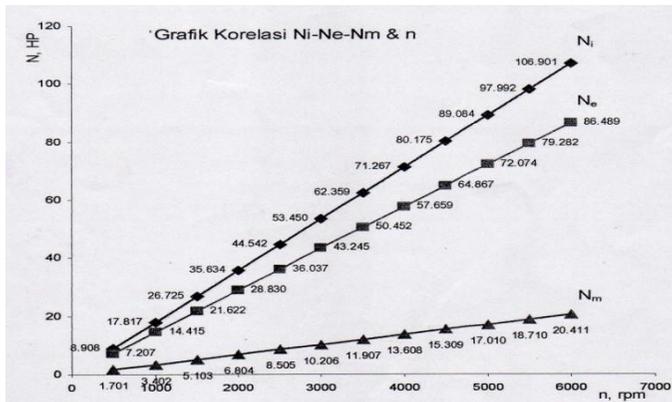
$S$  : Panjang Langkah Torak = 7,97 cmn : Putaran

motor = 6000 rpm

$a$  : Jumlah silinder = 4

$P_e$  : Tekanan efektif = 10 kg/cm<sup>2</sup>

Jadi :



$$N_e = \frac{0,78.(7,2)^2 \cdot 7,97.6000.4.10}{900000}$$

$$= \frac{77840248,32}{900000}$$

$$= 86,589648 \approx 86\text{HP}$$

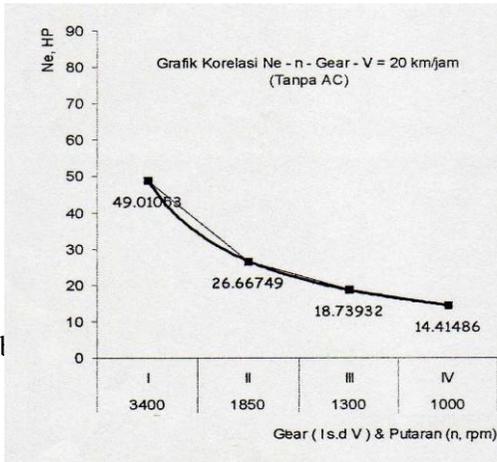
Gambar 2. Grafik korelasi putaran dan daya

#### 4. Korelasi Daya dan Putaran Motor

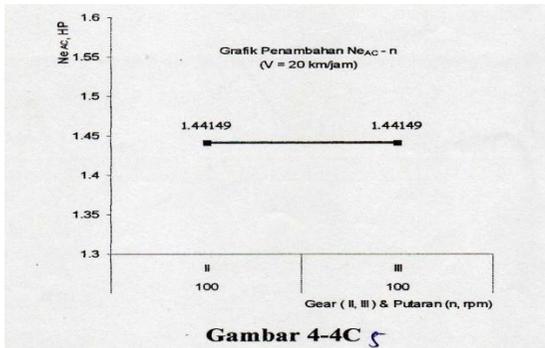
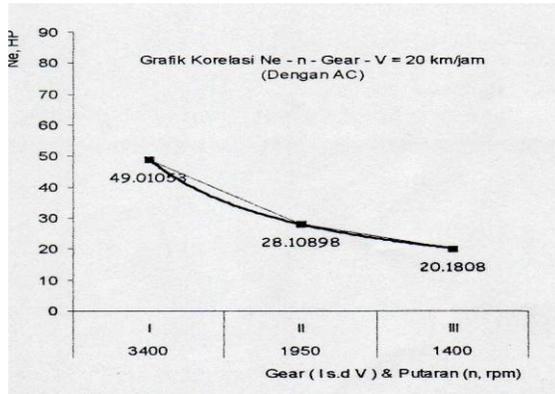
##### 4.1. Hasil Pengukuran Daya Motor dan Putaran Motor pada jalan mendatar

Kondisi motor bergerak dengan 5 variasi yaitu : 20 km/jam, 40 km/jam, 60 km/jam, 80 km/jam dan 100 km/jam

Gambl



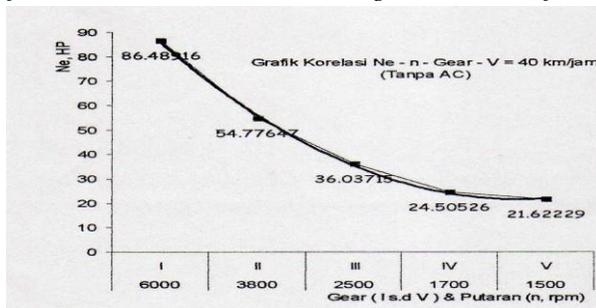
Gambar 4



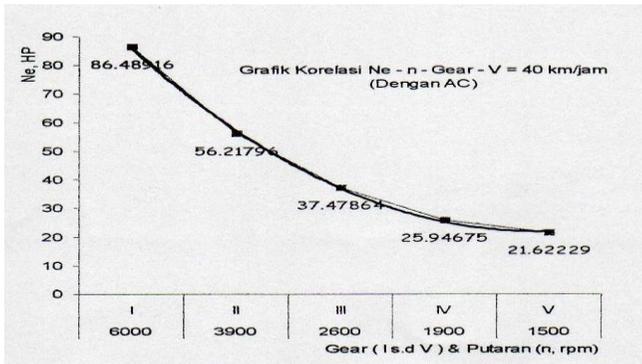
Gambar 5

Pada gambar 3 dan 4 terlihat bahwa tanpa AC kendaraan dapat dioperasikan dari gear I s/d IV selanjutnya dengan menjalankan AC hanya bisa menggunakan gear I s/d III. Pada gambar 5 dengan kecepatan 20 km/jam dengan variasi gear I, II dan III terjadi kenaikan daya untuk mengoperasikan AC sebesar 1,44 HP dan penambahan putaran 100 rpm hanya pada gear II dan III.

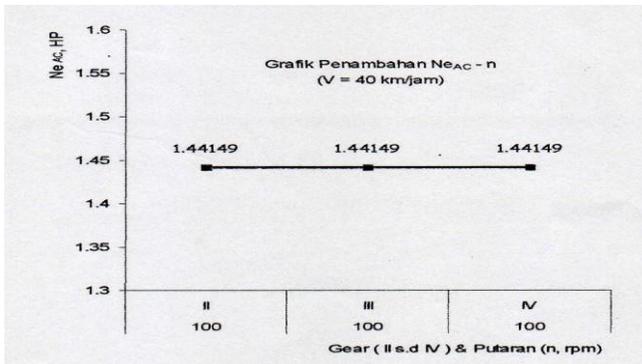
*b. Grafik Korelasi  $N_e - n - \text{Gear}$  dengan  $V = 40 \text{ km/jam}$*



Gambar 6



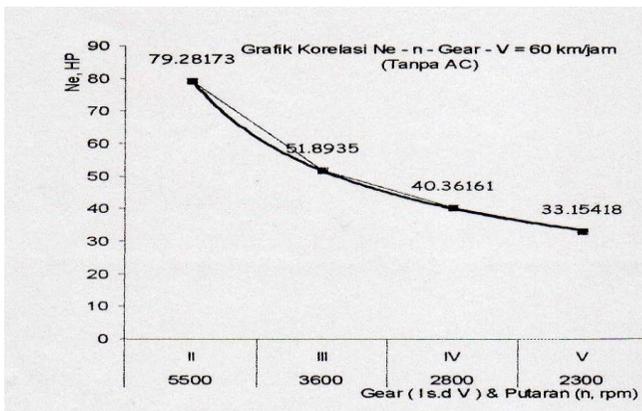
Gambar 7



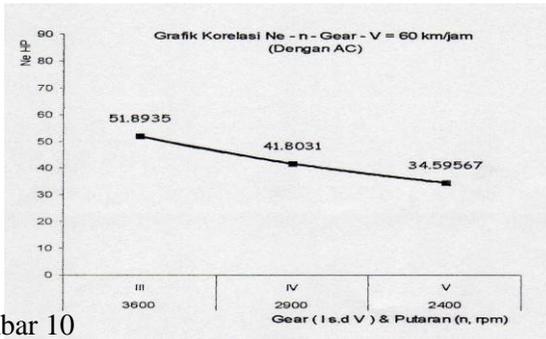
Gambar 8

Pada gambar 6 dan 7 terlihat dengan kecepatan 40 km/jam tanpa AC maupun dengan AC, kendaraan dapat dioperasikan dari gear I s/d V, dimana penambahan daya untuk mengoperasikan AC hanya terjadi pada gear II, III dan IV sebesar 1,44 HP dengan penambahan putaran 100 rpm.

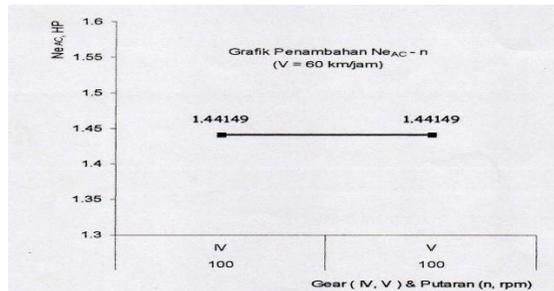
c. Grafik Korelasi  $N_e - n - Gear$  dengan  $V = 60 km/jam$



Gambar 9



Gambar 10

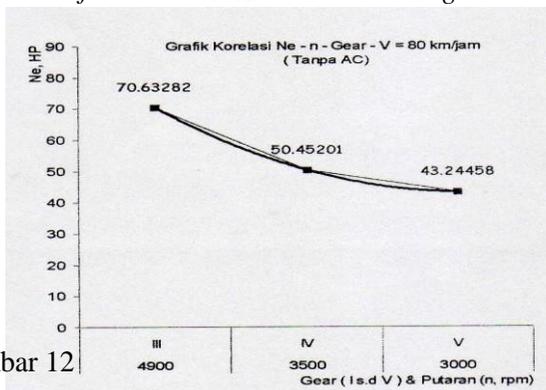


Gambar 11

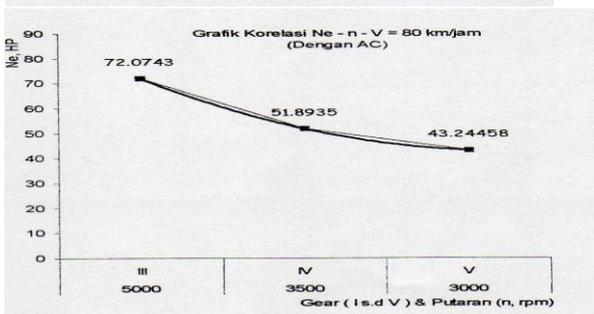
Dari gambar 9,10 dan 11 pada kecepatan 60 km/jam tanpa AC kendaraan dapat dioperasikan dari gear II sampai dengan gear V dan jika menggunakan AC kendaraan hanya dapat dioperasikan dari gear III sampai dengan V

dengan penambahan daya untuk mengoperasikan AC terjadi pada gear IV dan V sebesar 1,44 HP dengan kenaikan putaran sebesar 100 rpm.

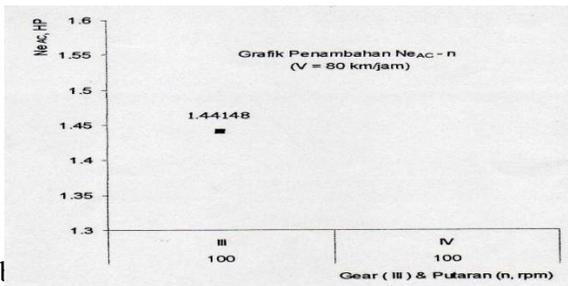
**d. Grafik Korelasi  $N_e - n - Gear$  dengan  $V = 80 km/jam$**



Gambar 12



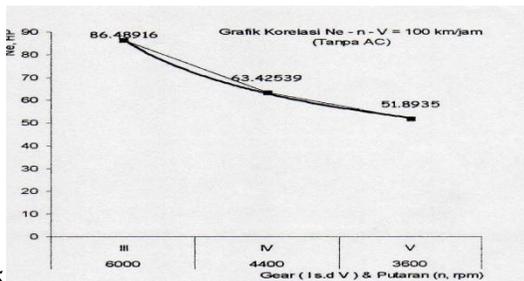
Gambar 13



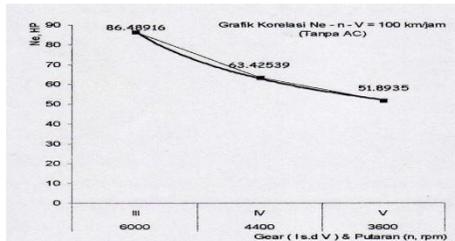
Gambl

Pada gambar 12, 13 dan 14 tanpa menggunakan dan menggunakan AC kendaraan dapat dioperasikan dari gear III sampai dengan gear V dan kenaikan daya untuk mengoperasikan AC hanya terjadi pada gear III dengan penambahan daya sebesar 1,44HP dan penambahan putaran 100 rpm

f. Grafik Korelasi  $N_e - n - Gear$  dengan  $V = 100 \text{ km/jam}$



Gambar 15



Gambar 16

Dari gambar 15 dan 16 pada kecepatan 100 km/jam tanpa AC maupun menggunakan AC kendaraan dapat dioperasikan dari gear III sampai gear V, dimana walaupun AC dioperasikan tidak terjadi kenaikan daya dan penambahan putaran. Dari hasil pengukuran daya motor ( $n_e$ ) dan putaran motor pada jalan rata diperoleh informasi bahwa hanya pada kecepatan tertentu terjadi kenaikan putaran jika AC dioperasikan lihat Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2. Peningkatan Putaran Akibat penambahan AC pada jalan Rata

V km/jam)	GEAR									
	I		II		III		IV		V	
	Non AC	AC	Non AC	AC	Non AC	AC	Non AC	AC	Non AC	AC
20	●	●	●	1950	●	1400	●	▲	▲	▲
40	●	●	●	3900	●	2600	●	1900	●	●
60	▲	▲	●	▲	●	●	●	2900	●	2400
80	▲	▲	▲	▲	●	5000	●	●	●	●
100	▲	▲	▲	▲	●	●	●	●	●	●

Tabel 3. Peningkatan Putaran Akibat penambahan AC pada Jalan Tanjakan

V (km/jam)	GEAR									
	I		II		III		IV		V	
	Non AC	AC	NonAC	AC	Non AC	AC	Non AC	AC	Non AC	AC
20	●	●	●	2300	●	▲	▲	▲	▲	▲
40	●	●	●	3800	●	2600	▲	▲	▲	▲
60	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
80	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
100	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

**Ket:** ● : Putaran gear yang dapat digunakan untuk non AC maupun AC , ▲ : Putarangear yang tidak dapat digunakan

Angka : Keneikan putaran untuk mengoperasikan AC

### 5. Pemakaian Daya pada Pulley Kompresor

$$D_p = \frac{(F_1 - F_2) \cdot V \cdot S_f}{1000} \text{HP.}$$

(A.text book of machine design , P.C Sharma, hal.160)

dimana :  $F_1$  : Tegangan sabuk pada sisi ketat, N

$F_2$  : Tegangan sabuk pada sisi longgar, N

V :  $(\mu \cdot D \cdot n) / 60 = 37,68 \text{ m/s}$  (kecepatan sabuk)

D : 0,12 m (diameter pulley)

$S_f$  : 1,35 (faktor service untuk kondisi berdebu dan basah) Nilai

$F_1$  dan  $F_2$  dihitung dengan persamaan umum sabuk :

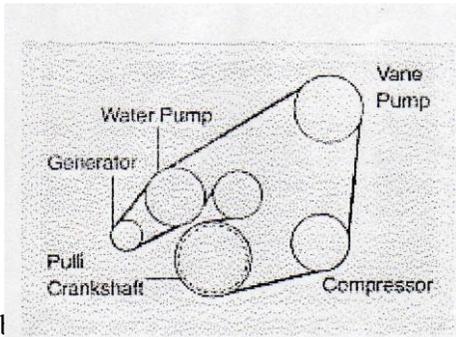
$$F_1 - F_2 = \frac{b \cdot t \cdot (f - \rho \cdot V^2) \cdot (e^{\mu\theta} - 1)}{e^{\mu\theta}} \text{ (N)}$$

dimana :

b : 0,012 m, t : 0,0028 m,  $f_t$  : 3 MPa ( tegangan sabuk yang diizinkan)  $\rho$  : 1400 kg/m<sup>3</sup> ( berat jenis material sabuk, V : 37,68 m/s  $\mu$  : 0,30 (koefisien gesek antara sabuk dan fulley) dan

$\theta$  :  $(102/360) \cdot 2\pi = 1,77 \text{ rad}$  ( sudut kontak pada pulley terkecil)

maka :  $F_1 - F_2 = 29,792 \text{ N}$  sehingga didapat  $D_p = 1,515 \text{ HP}$  atau  $1,5\text{HP}$



Gambl

### 6. Daya ( $N_d$ ) Putaran ( $n$ ) serta Torsi ( $t$ ) yang didistribusikan ke Roda Belakang

a. Besar daya yang disalurkan ke roda belakang dan besar daya yang hilang pada sistem transmisi, umumnya kendaraan yang letak motor penggerak berada dibagian depan sedangkan roda belakangnya sebagai roda yang menggerakkan hal ini akan mengalami kehilangan daya sepanjang sistem transmisi yang dipakai.

$$N_d = N_e(\eta_c + \eta_{tr} + \eta_{as} + \eta_d) \text{ HP}$$

dimana :  $N_e$  = daya motor penggerak pada flens 86HP

$\eta_c$  = randemen kopling 0,99  $\eta_{tr}$  = randemen transmisi 0,97  $\eta_{as}$  =

randemen poros 0,98

$\eta_d$  = randemen join diferensial 0,99

$$\eta_{tr} = N_e - N_d = 86 - 78,52 = 7,48 \text{ HP}$$

b. Besar putaran yang disalurkan ke roda belakang

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{N_B}{N_A} \text{ atau } \omega_B = \left[ \frac{\omega_A}{\frac{N_B}{N_A}} \right]$$

dimana :

$\omega_A$  = kecepatan sudut roda gigi penggerak  $2\pi \cdot n = 37680 \text{ rad/det}$

$\omega_B$  = kecepatan sudut roda gigi yang digerakkan  $N_A =$

Jumlah gigi roda penggerak, dan

$N_B =$  Jumlah gigi roda yg digerakkan

**Dengan Perbandingan gigi :**

Gigi 1 = 1: 3,769, Gigi 2 = 1:2,045,

Gigi 3 = 1: 1,376, Gigi 4 = 1:1,

Gigi 5 = 1: 0,838 dan **Gigi Mundur 1:4,128**

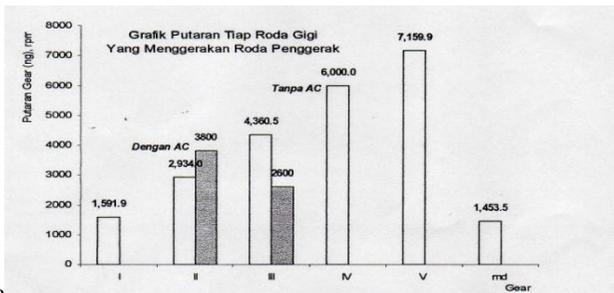
Jadi besar putaran tiap roda gigi untuk menggerakkan roda belakang untuk pemakaian daya maksimum adalah:

$$\omega = \frac{\omega_A}{\frac{N_B}{N_A}} = \frac{37680}{\frac{3,769}{1}} = 9997,346 \text{ rad/m}$$

$$= \frac{9997,346}{6,28} = 1591,934 \text{ rpm}$$

(2.3,14)

Dengan cara yang sama didapat besar putaran tiap roda gigi untuk menggerakkan roda penggerak dapat dilihat pada Grafik 1 .



Grafik 2. Besar putaran roda penggerak pada jalan tanjakan

c. *Torsi yang dibutuhkan roda belakang*

$$t_1 = 716,20 \text{ (N/n), kg.m (Marine External Combustion Engine)}$$

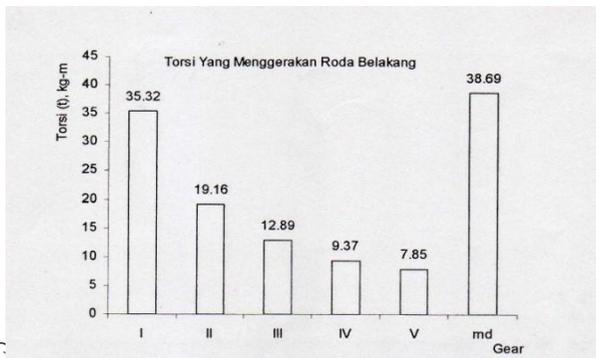
$$\text{Maka : } t = 716,20$$

$$78,52 = 35,32 \text{ kg.m}$$

1

$$\frac{78,52}{5} = 1591,934$$

Dengan menggunakan rumus yang sama didapat besar torsi sesuai besar daya dan putaran tiap gear seperti grafik 3 dibawah ini:



C  
menggerakkan roda belakang

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan antara lain:

- 1. Penambahan daya untuk jalan rata terjadi pada kecepatan gear untuk V = 20 km/jam yaitu pada gear II dan III, untuk V = 40 km/jam yaitu pada gear II, III dan IV, untuk V = 60 km/jam yaitu pada gear IV dan V serta untuk V = 80 km/jam yaitu pada gear III sementara pada jalan tanjakan penambahan daya terjadi pada kecepatan gear 20 km/jam yaitu pada gear II dan untuk V = 40km/jam yaitu pada gear II dan III.
- 2. Untuk mempertahankan kecepatan kendaraan bila AC digunakan maka pada gear dan kecepatan tertentu putaran poros harus diperbesar 100 rpm.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Boenarto, 1992. *Cara Pemeriksaan, Penyetelan dan Perawatan Chasis Mobil*, Penerbit Andi Ofset, Yogyakarta.
- Brij Lal dan N.Subrahmanyam, 2003, *Properties of Matter*, Eurasia Publishing House (Ltd), Ram Nagar,. New Delhi
- Joseph E. Shigley dan Larry D. Mitchell, 1994. *Perencanaan Teknik Mesin*, Edisi keempat Jilid 2. Erlangga. Jakarta
- J.M. Kuijper, 1954. *Diesel Motoren-Constructie En Berekening*. N.V. De Technische Uitgeverij H. Stam
- Nakolea Soenarta dan Shoichi Furuhamu, 2002. *Motor Serba Guna*, Cetakan ketiga PT. Perca, Jakarta
- N. Petrvsky, 2000. *Marine External Combustion Engine*, MIR Publisher, Moscow
- M. Khetagurov, *Marine Auxiliary Machinery And System*, Peace Publisher Moacow
- M. Khovakh, 1967. *Motor Vehicle Engines* , MIR Publisher, Moscow
- P.C. Sharma . D.K Aggarwal, 1997. *A Text Book Of Mashine Design-Mechanical Engineering*, SSMB Publishing India

P.N..Ananthanarayanan, 1982, *Basic Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi  
Rahardjo Tirtoatmojo, 2000. *Penggerak Mula*, CV. Citra Media Surabaya.  
R.C. Hibbeler, 1986. *Engineering Mechanic – Dynamics*, Fouth Edition Macmillan Publisher Company , New York  
R.S. Khurmi, J.K. Gupta . 2004. *A Text Book Of Machine Design*, Eurasia Publishing House Ltd, New Delhi.

## **DAFTAR ISI**



# **BABI**

