

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Klasifikasi Motor listrik

2.1.1 Motor Listrik

Klasifikasi mesin listrik, motor listrik termasuk kedalam kategori mesin listrik dinamis dan merupakan sebuah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor listrik pada umumnya diklasifikasikan menjadi dua yaitu motor induksi dan motor sinkron. Motor induksi mempunyai faktor daya dan efisiensi lebih rendah dibanding dengan motor sinkron. Arus awal induksi juga sangat besar. Namun motor induksi s.d. 600 kW masih banyak dipakai karena harganya yang relatif murah dan pemeliharaannya mudah. Motor listrik induksi terdapat 2 jenis yaitu jenis sangkar bajing (*squirrel-cage*) dan jenis rotor lilit (*wound rotor*). Motor listrik tipe sangkar bajing lebih banyak digunakan karena mudah pemeliharaannya. Motor listrik jenis sinkron mempunyai faktor daya dan efisiensi yang tinggi, namun harganya mahal, sehingga jika pemakaian daya tidak merupakan faktor yang sangat menentukan, motor jenis ini jarang digunakan. Motor ini banyak digunakan pada industri yang membutuhkan tekanan udara yang besar. Karakteristik starter pada motor listrik bermacam-macam tergantung pada momen awal, kapasitas sumber tenaga (listrik) yang ada dan pengaruh arus awal pada sistem distribusi daya yang ada. Berikut table karakteristik start beberapa motor listrik.^[12]

Tabel 2.1 Karakteristik start motor listrik

Motor		Starter	Momen awal(%)	Arus awal(%)	Harga
Motor induksi	Sangkar bajing	Tanpa starter (tegangan penuh)	100	500	Murah
		Reaktor	40	400	Sedang
	Jenis motor lilit	Kompensator	40	200	Mahal
		Resistor sekunder	100	150	Paling mahal
Motor sinkron		Tanpa starter (tegangan penuh)	50-60	500	Murah
		Reaktor	20-30	400	Sedang
		Kompensator	20-30	200	Mahal

2.1.2 Penggunaan Motor Listrik

Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar *impeller* pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan dan lain-lain. Motor listrik digunakan juga di rumah (*mixer*, bor listrik, fan angin) dan di industri. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri.

2.1.3 Prinsip Kerja Motor Listrik

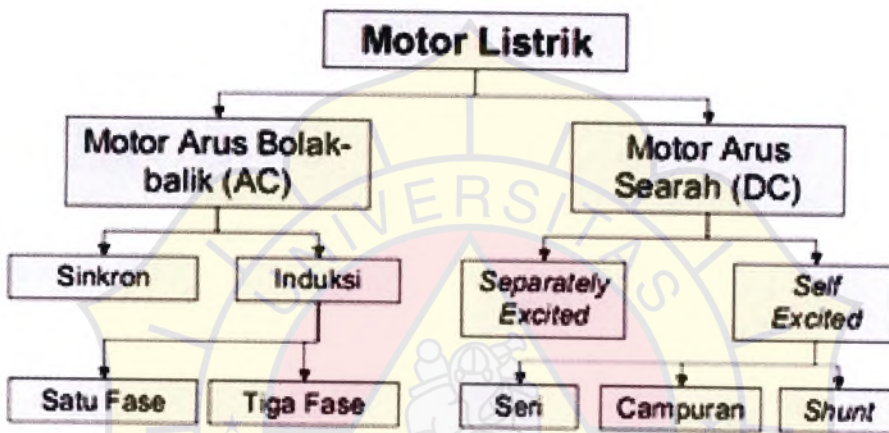
Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum sama.

- Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya

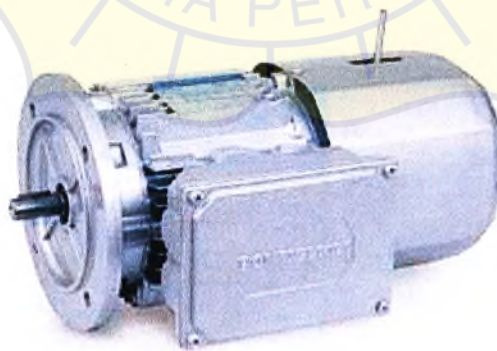
- Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran atau *loop*, maka kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
- Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar (*torque*) untuk memutar kumparan.
- Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamanya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan. Dalam memahami sebuah motor, penting untuk mengerti apa yang dimaksud dengan beban motor. Beban mengacu kepada keluaran tenaga putar (*torque*) sesuai dengan kecepatan yang diperlukan. Beban umumnya dapat dikategorikan kedalam tiga kelompok (BEE India, 2004):
- Beban *torque konstan* adalah beban dimana permintaan keluaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasinya namun *torque* nya tidak bervariasi. Contoh beban dengan *torque* konstan adalah *conveyors*, *rotary kilns*, dan pompa *displacement* konstan.
- Beban dengan *variabel torque* adalah beban dengan *torque* yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contoh beban dengan variabel *torque* adalah pompa sentrifugal dan fan (*torque* bervariasi sebagai kwadrat kecepatan).^[12]

2.1.4 Jenis Motor Listrik

Bagian ini menjelaskan tentang dua jenis utama motor listrik: DC dan motor AC. Memperlihatkan motor listrik yang paling umum. Motor tersebut dikategorikan berdasarkan pasokan *input*, konstruksi, dan mekanisme operasi dan dijelaskan lebih lanjut dalam bagan dibawah ini



Gambar bagan 2.1 klasifikasi motor listrik.^[13]



Gambar 2.2 Sebuah motor Ac.^[13]

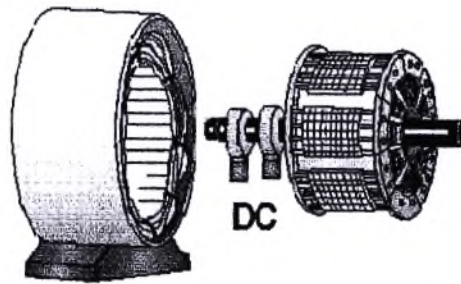
2.2 Jenis-jenis Motor dan Komponennya

2.2.1 Motor AC dan DC

Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik memiliki dua buah bagian dasar listrik: "stator" dan "rotor" seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor. Keuntungan utama motor DC terhadap motor AC adalah bahwa kecepatan motor AC lebih sulit dikendalikan. Untuk mengatasi kerugian ini, motor AC dapat dilengkapi dengan penggerak frekwensi variabel untuk meningkatkan kendali kecepatan sekaligus menurunkan dayanya. Motor induksi merupakan motor yang paling populer di industri karena kehandalannya dan lebih mudah perawatannya. Motor induksi AC cukup murah (harganya setengah atau kurang dari harga sebuah motor DC) dan juga memberikan rasio daya terhadap berat yang cukup tinggi (sekitar dua kali motor DC).^[12]

2.2.2 Motor Sinkron

Motor sinkron adalah motor AC, bekerja pada kecepatan tetap pada sistim frekwensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki *torque* awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekwensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan banyak listrik.^[12]



Gambar 2.3 Motor Sinkron. ^[13]

Komponen utama motor sinkron adalah :

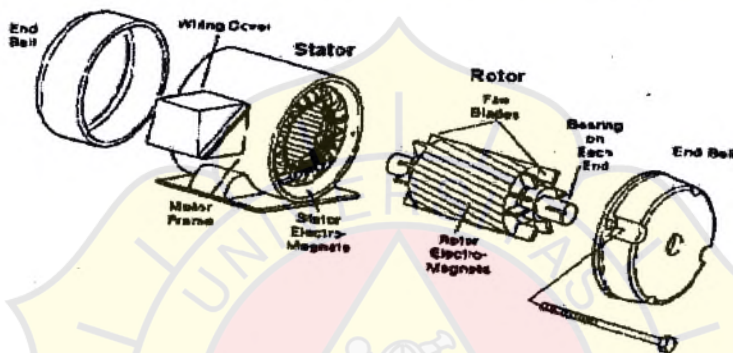
- *Rotor.* Perbedaan utama antara motor sinkron dengan motor induksi adalah bahwa rotor mesin sinkron berjalan pada kecepatan yang sama dengan perputaran medan magnet. Hal ini memungkinkan sebab medan magnet rotor tidak lagi terinduksi. Rotor memiliki magnet permanen atau arus *DC-excited*, yang dipaksa untuk mengunci pada posisi tertentu bila dihadapkan dengan medan magnet lainnya.
- *Stator.* Stator menghasilkan medan magnet berputar yang sebanding dengan frekwensi yang dipasok.

a. Komponen

Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama

- Rotor. Motor induksi menggunakan dua jenis rotor:
 - Rotor kandang tupai terdiri dari batang penghantar tebal yang dilekatkan dalam petak-petak *slots* paralel. Batang-batang tersebut diberi hubungan pendek pada kedua ujungnya dengan alat cincin hubungan pendek.

- Lingkaran rotor yang memiliki gulungan tiga fase, lapisan ganda dan terdistribusi. Dibuat melingkar sebanyak kutub stator. Tiga fase digulungi kawat pada bagian dalamnya dan ujung yang lainnya dihubungkan ke cincin kecil yang dipasang pada batang as dengan sikat yang menempel padanya.
- Stator. Stator dibuat dari sejumlah *stampings* dengan *slots* untuk membawa gulungan tiga fase. Gulungan ini dilingkarkan untuk sejumlah kutub yang tertentu. Gulungan diberi spasi geometri sebesar 120 derajat.



Gambar 2.4 Motor induksi. [13]

b. Kecepatan motor induksi

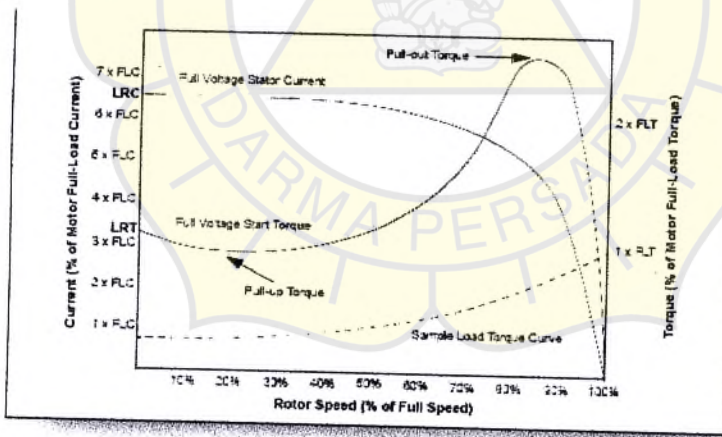
Motor induksi bekerja sebagai berikut. Listrik dipasang ke stator yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Walaupun begitu, didalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada “kecepatan dasar” yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya “*slip*/geseran” yang meningkat dengan meningkatnya

beban. *Slip* hanya terjadi pada motor induksi. Untuk menghindari slip dapat dipasang sebuah cincin.

c. **Hubungan antara beban dan torque**

Grafik *torque*-kecepatan motor induksi AC tiga fase dengan arus yang sudah ditetapkan :

- Mulai menyala ternyata terdapat arus nyala awal yang tinggi dan *torque* yang rendah (“*pull-up torque*”).
- Mencapai 80% kecepatan penuh, *torque* berada pada tingkat tertinggi (“*pull-out torque*”) dan arus mulai turun.
- Pada kecepatan penuh, atau kecepatan sinkron, arus *torque* dan *stator* turun ke nol.



Gambar 2.5 Grafik Torque-kecepatan motor induksi. [13]

2.2.3 Motor Dengan Beberapa Kecepatan

Motor dapat digulung menjadi dua kecepatan, dan perbandingan 2:1, dapat dicapai. Motor juga dapat digulung dengan dua gulungan terpisah, masing-masing memberi dua kecepatan operasi dan dengan begitu totalnya menjadi empat kecepatan. Motor dengan beberapa kecepatan dapat dirancang untuk penggunaan yang melibatkan *torque* konstan, *torque* bervariasi, atau untuk keluaran daya yang konstan. Motor dengan beberapa kecepatan cocok untuk penggunaan yang memerlukan pengendalian kecepatan yang terbatas (dua atau empat kecepatan, bukan kecepatan yang terus menerus bervariasi). Motor-motor tersebut cenderung sangat ekonomis dan efisiensinya lebih rendah dibanding dengan motor yang berkecepatan tunggal.

2.3 Klasifikasi Kompresor

2.3.1 Konstruksi Kompresor

Dalam TA ini hanya akan dibahas khusus konstruksi kompresor torak, karena pada umumnya kompresor udara yang digunakan pada bidang kerja otomotif skala menengah kecil adalah kompresor torak. Kompresor torak atau kompresor bolak-balik pada dasarnya adalah merubah gerakan putar dari penggerak mula menjadi gerak bolak-balik torak/ piston. Gerakan ini diperoleh dengan menggunakan poros engkol dan batang penggerak yang menghasilkan gerak bolak-balik pada torak.

Gerakan torak akan menghisap udara ke dalam silinder dan memampatkannya. Langkah kerja kompresor torak hampir sama dengan konsep kerja motor torak yaitu:

(1) Langkah Isap

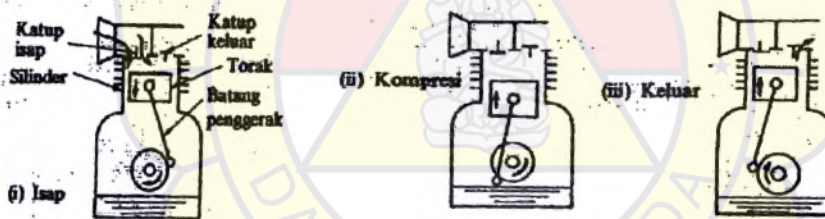
Langkah isap adalah bila poros engkol berputar searah putaran jarum jam, torak bergerak dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB). Tekanan negatif terjadi pada ruangan di dalam silinder yang ditinggalkan torak sehingga katup isap terbuka oleh perbedaan tekanan dan udara terisap masuk ke silinder.

(2) Langkah Kompresi

Langkah kompresi terjadi saat torak bergerak dari TMB ke TMA, katup isap dan katup buang tertutup sehingga udara dimampatkan dalam silinder

(3) Langkah Keluar

Bila torak meneruskan gerakannya ke TMA, tekanan di dalam silinder akan naik sehingga katup keluar akan terbuka oleh tekanan udara sehingga udara akan keluar.

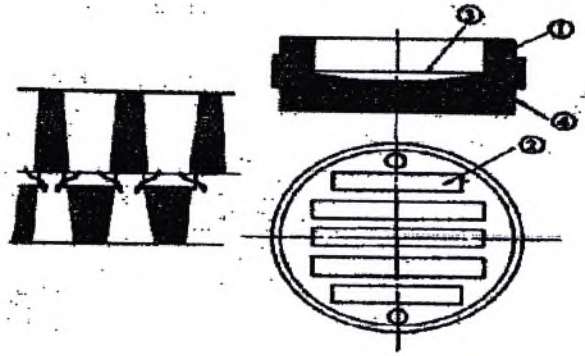


Gambar 2.6 Kompresi kerja tunggal ^[11]

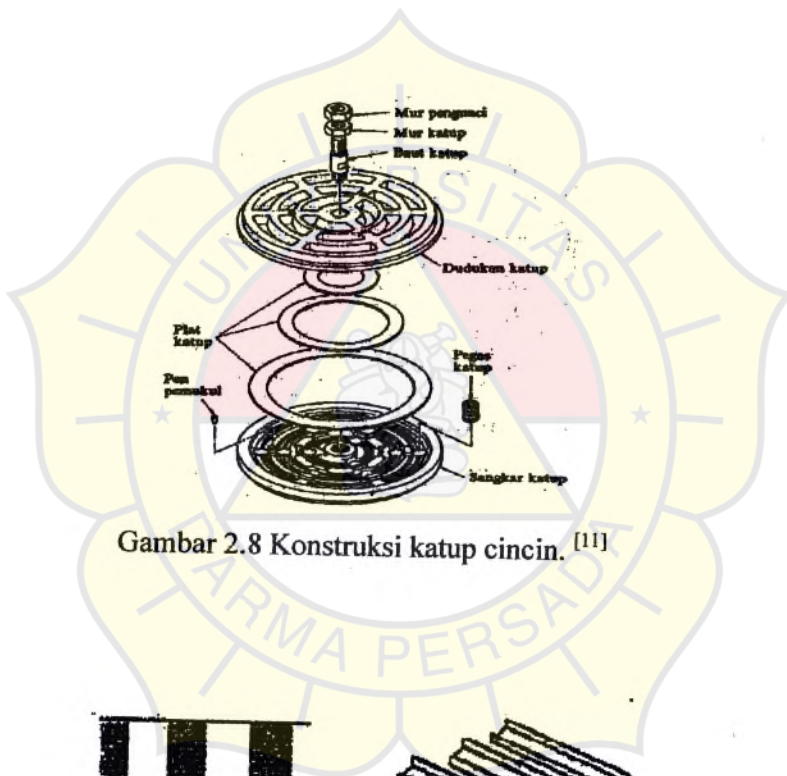
2.3.2 Bagian-bagian katup

Katup-katup pada kompresor membuka dan menutup secara otomatis tanpa mekanisme penggerak katup. Pembukaan dan penutupan katup tergantung dari perbedaan tekanan yang terjadi antara bagian dalam dan bagian luar silinder.

Jenis-jenis katup yang biasa digunakan adalah jenis katup pita, katup cincin, katup kanal dan katup kepak.



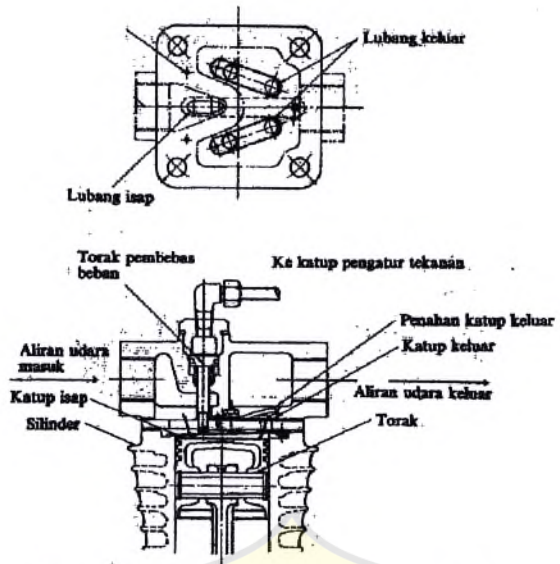
Gambar 2.7 Konstruksi katup pita (Reed Valve).^[11]



Gambar 2.8 Konstruksi katup cincin.^[11]



Gambar 2.9 Konstruksi katup kanal^[11]



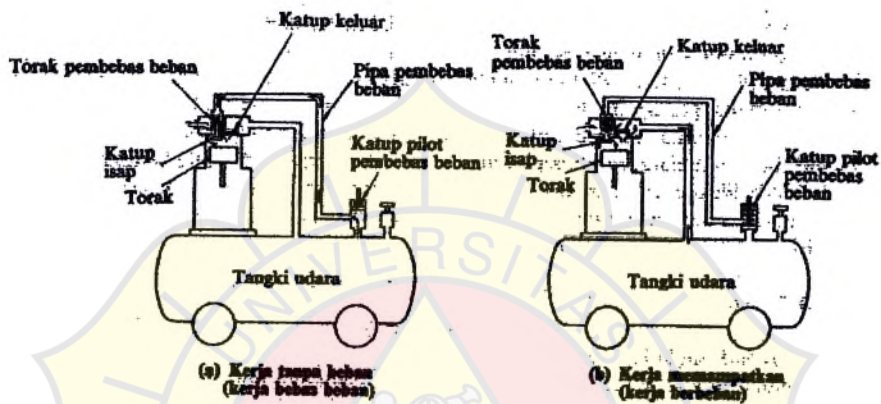
Gambar 2.10 Konstuksi katup kepak ^[11]

2.3.3 Pengatur Kapasitas

Volume udara yang dihasilkan kompresor harus sesuai dengan kebutuhan. Jika kompresor terus bekerja maka tekanan dan volume udara akan terus meningkat melebihi kebutuhan dan berbahaya terhadap peralatan. Untuk mengatur batas volume dan tekanan yang dihasilkan kompresor digunakan alat yang biasa disebut pembebas beban (unloader). Pembebas beban dapat digolongkan menurut azas kerjanya yaitu : pembebas beban katup isap, pembebas beban celah katup, pembebas beban trolol isap dan pembebas beban dengan pemutus otomatis. Pembebas beban yang difungsikan untuk memperingan beban pada waktu kompresor distart agar penggerak mula dapat berjalan lancar dinamakan pembebas beban awal. Adapun ciri-ciri, cara kerja, dan pemakaian berbagai jenis pembebas beban.

2.3.4 Pembebasan Beban Katup Isap

Jenis ini sering dipakai pada kompresor kecil atau sedang. Cara ini menggunakan katup isap di mana plat katupnya dapat dibuka terus pada langkah isap maupun langkah kompresi sehingga udara dapat bergerak keluar masuk silinder secara bebas melalui katup ini tanpa terjadi kompresi. Hal ini berlangsung sebagai berikut.



Gambar 2.11 kerja pembebas beban katup isap. [11]

Jika kompresor bekerja maka udara akan mengisi tangki udara sehingga tekanannya akan naik sedikit demi sedikit. Tekanan ini disalurkan ke bagian bawah katup pilot dari pembebas beban. Jika tekanan di dalam tangki udara masih rendah, maka katup akan tetap tertutup karena pegas atas dari katup pilot dapat mengatasi tekanan tersebut. Namun jika tekanan di dalam tangki udara naik sehingga dapat mengatasi gaya pegas tadi maka katup isap akan didorong sampai terbuka. Udara tekan akan mengalir melalui pipa pembebas beban dan menekan torak pembebas beban pada tutup silinder ke bawah. Maka katup isap akan terbuka dan operasi tanpa beban mulai. Selama kompresor bekerja tanpa beban, tekanan di dalam tangki udara akan menurun terus karena udara dipakai sedangkan penambahan udara dari kompresor

tidak ada. Jika tekanan turun melebihi batas maka gaya pegas dari katup pilot akan mengalahkan gaya dari tekanan tangki udara. Maka katup pilot akan jatuh, laluan udara tertutup, dan tekanan di dalam pipa pembebas beban menjadi sama dengan tekanan atmosfer. Dengan demikian torak pembebas beban akan terangkat oleh gaya pegas, katup isap kembali pada posisi normal, dan kompresor bekerja mengisap dan memampatkan udara.

2.4 Peluang Efisiensi Energi

2.4.1 Efisiensi kompresor

Beberapa pengukuran kompresor yang biasa digunakan adalah: efisiensi volumetrik, efisiensi adiabatik, efisiensi isothermal, dan efisiensi mekanik. Efisiensi adiabatik dan isothermal dihitung sebagai daya isothermal atau adiabatik dibagi oleh konsumsidaya aktual. Efisiensi isothermal = Daya masuk aktual terukur / Daya Isothermal. Perhitungan daya isothermal tidak menyertakan daya yang diperlukan untuk mengatasi gesekan dan biasanya memberikan efisiensi yang lebih rendah dari efisiensi adiabatik. Nilai efisiensi yang dilaporkan biasanya efisiensi isothermal. Hal ini merupakan bahan pertimbangan yang penting dalam memilih kompresor berdasarkan nilai efisiensi yang dilaporkan, dan yang akan di bahas dalam TA ini adalah efisiensi mekanis.

2.4.2 Lokasi kompresor

Lokasi kompresor udara dan kualitas udara yang ditarik oleh kompresor akan memiliki pengaruh yang cukup berarti terhadap jumlah energi yang digunakan. Kinerja kompresor sebagai mesin yang bernafas akan meningkat dengan udara yang dingin, bersih dan kering pada saluran masuknya.

2.4.3 Suhu Udara pada Aliran Masuk

Pengaruh udara masuk pada kinerja kompresor tidak boleh diremehkan. Udara masuk yang tercemar atau panas dapat merusak kinerja kompresor dan menyebabkan energi serta biaya perawatan yang berlebihan. Jika kadar air, debu, atau bahan pencemar lain terdapat dalam udara masuk, maka bahan pencemar tersebut dapat terkumpul pada komponen bagian dalam kompresor, seperti kran, fan, rotor dan baling-baling. Kumpulan pencemar tersebut dapat mengakibatkan kerusakan dini dan menurunkan kapasitas kompresor. Kompresor menghasilkan panas pada operasinya yang kontinyu. Panas ini dilepaskan ke kamar atau ruang kompresor sehingga memanaskan udara masuk. Hal ini mengakibatkan rendahnya efisiensi volumetrik dan pemakaian daya menjadi lebih besar.

Sebagai aturan umum, *“Setiap kenaikan suhu udara masuk sebesar 4^oC akan meningkatkan konsumsi energi sebesar 1 persen untuk keluaran yang sama”*. Jadi udara dingin yang masuk akan meningkatkan efisiensi energi kompresor. Jika saringan udara masuk ditempatkan pada kompresor, suhu ambien harus dijaga pada nilai minimum untuk mencegah penurunan aliran massa.

2.4.4 Pengertian Kompresor Torak

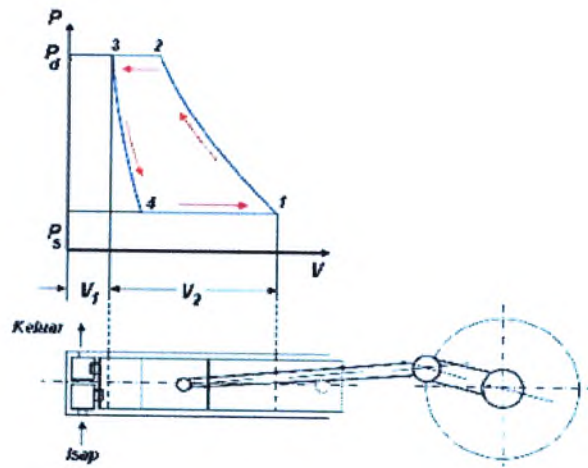
Merupakan salah satu *positive displacement compressor* dengan prinsip kerja memampatkan dan mengeluarkan udara atau gas secara *intermitten* (berselang) dari dalam silinder. Pemampatan udara atau gas dilakukan didalam silinder. Elemen mekanik yang digunakan untuk memampatkan udara atau gas dinamakan piston atau torak. Tekanan udara atau gas yang keluar merupakan tekanan *discharge* yang dihasilkan oleh kompresor *reciprocating*.

2.4.5 Prinsip Kerja Kompresor Torak

Prinsip kerja kompresor torak adalah sebagai berikut:

- Tenaga mekanik dari penggerak mula ditransmisikan melalui poros engkol dalam bentuk gerak rotasi dan diteruskan ke kepala silang (*cross head*) dengan perantaraan batang penghubung (*connecting rod*).
- Pada kepala silang gerakan rotasi diubah menjadi gerak translasi yang diteruskan ke torak melalui batang torak (*piston rod*).
- Gerakan torak bolak balik dalam silinder mengakibatkan perubahan volume dan tekanan sehingga terjadi proses pemasukan, kompresi, dan pengeluaran.

Secara sederhana prinsip kerja, perubahan tekanan dan volume dalam suatu kompresor torak *Simplex Single Acting* dapat diuraikan dalam bentuk diagram P-V sebagai berikut :



Gambar 2.12 Diagram P-V Kompresor Torak.^[11]

Torak memulai langkah kompresi pada titik (1), torak bergerak kekiri dan gas dimampatkan sehingga tekanannya naik ketitik (2). Pada titik ini tekanan di dalam silinder mencapai harga tekanan P_d yang lebih tinggi dari pada tekanan di dalam pipa keluar, sehingga katup keluar pada kepala silinder akan terbuka. Jika torak bergerak terus kekiri, gas akan didorong keluar silinder pada tekanan tetap sebesar P_d . Dititik (3) torak mencapai titik mati atas, yaitu titik akhir gerakan torak pada langkah kompresi dan pengeluaran.

Pada waktu torak mencapai titik mati atas ini, antara sisi atas torak dan kepala silinder masih ada volume sisa yang besarnya = V_c . Volume ini idealnya harus sama dengan nol agar gas dapat didorong seluruhnya keluar silinder tanpa sisa. Namun dalam praktiknya harus ada jarak (*clearance*) di atas torak agar tidak membentur kepala silinder. Selain itu juga harus ada lubang-lubang laluan pada katup-katup. Karena adanya volume sisa ini ketika torak mengakhiri langkah kompresinya, di atas torak masih ada sejumlah gas dengan volume sebesar V_c dan tekanan sebesar P_d .

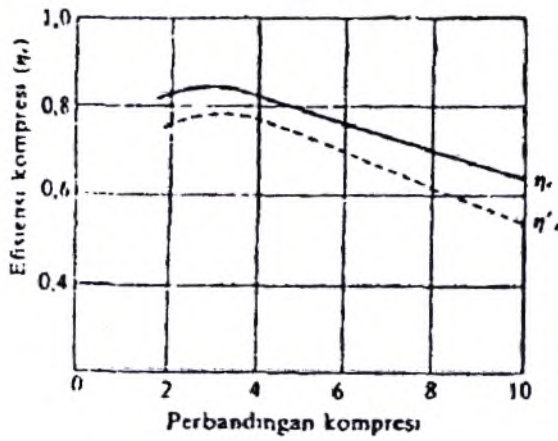
Jika

Jika kemudian torak memulai langkah isapnya (bergerak kekanan), katup isap tidak dapat terbuka sebelum sisa gas di atas torak berekspansi sampai tekanannya turun dari P_d menjadi P_s . Katup isap baru mulai terbuka dititik (4) ketika tekanannya sudah mencapai tekanan isap P_s . Disini pemasukan gas baru mulai terjadi dan proses pengisapan ini berlangsung sampai titik mati bawah (1). Dari uraian di atas dapat dilihat bahwa volume gas yang diisap tidak sebesar volume langkah torak sebesar V_s melainkan lebih kecil, yaitu hanya sebesar volume isap antara titik mati bawah (1) dan titik (4).

2.4.6 Kompresi Mekanis

- Pada kompresor terjadi gesekan antara bagian yang bergerak, misalnya antara torak dan dinding silinder, antara poros dan bantalan, dan sebagainya.
- Oleh karena itu, diperlukan daya tambahan untuk mengatasi gesekan.
- Maka efisiensi mekanik adalah perbandingan antara daya yang diperlukan untuk mengkompresikan gas dalam keadaan sebenarnya terhadap daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor.

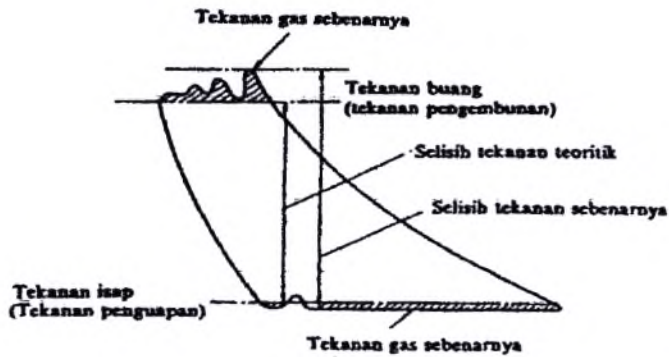
Efisiensi mekanik tergantung terutama pada kelonggaran antara bagian-bagian yang bergerak, kecepatan dan tekanan bidang, dan sebagainya.



Gambar 2.13 Prestasi Kompresor. ^[16]

Prestasi Kompresor

- Karakteristik kompresor diberikan oleh pabrik pembuatnya, sesuai dengan penelitian dan hasil pengujian yang telah dilakukan. Dari data yang diperoleh itu, dapat diperkirakan karakteristik dari kompresor lainnya yang sejenis, tetapi dengan jumlah silinder dan kecepatan putar yang beda.



Gambar 2.14 Siklus Kompresi dalam Keadaan Sebenarnya. ^[16]

Proses kompresi ini sangat berguna dalam analisis teoritis, namun untuk perhitungan kompresor tidak banyak kegunaannya. Pada kompresor yang sesungguhnya, meskipun silinder didinginkan sepenuhnya adalah tidak mungkin untuk menjaga temperatur yang tetap dalam silinder. Hal ini disebabkan oleh cepatnya proses kompresi (beberapa ratus sampai seribu kali permenit) di dalam silinder.

2.4.7 Kerja Mekanis

Efisiensi mekanik adalah perbandingan antara daya poros efektif dengan daya indikator. Efisiensi mekanik dapat dihitung sebagai berikut :^[3]

$$W_{mech} = \frac{2\pi n T}{60}$$

Dimana : n = putaran motor listrik

T = momen puntir

2.4.8 Mencari Nilai Torsi^[3]

$$T = \frac{P \cdot 60}{2\pi n} \text{ (Nm)}$$

Dimana : T = Torsi (Nm)

P = Daya motor (Watt)

n = Putaran motor (Rpm)

2.4.9 Mencari Nilai (Wi)^[10]

$$W_p = m \cdot R \cdot t \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\gamma t^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Dimana : m = massa udara (kg/cm²)

R = konstanta gas (kj/kg^ok)

t = Temperatur (°k)

n = index politropis

2.4.10 Mencari nilai massa udara ^[10]

$$P_1 V_1 = m.R.t$$

Dimana = P_1 = Tekanan isap (kg/cm²)

V_1 = Volume isap (Cm³)

m = massa udara (kg/cm)

R = Konstanta gas (kj/kg⁰k)

2.4.11 Mencari Nilai Index Politropis ^[10]

$$n = \frac{\log \gamma p}{\log \gamma p + \log \gamma t}$$

2.4.12 Mencari daya listrik ^[3]

$$P = V x I x \text{Cos } \phi$$

Dimana = V = voltage $\text{Cos } \phi = 0,85$

I = arus