



BUKU AJAR

MOTOR PENGGERAK

- Annisa Nur Ichniarsyah, S.TP.,M.Si
- Azhar, A.Pi.,MM

PUSAT PENDIDIKAN PERTANIAN

Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian

KEMENTERIAN PERTANIAN

2019



MOTOR PENGGERAK

- Annisa Nur Ichniarsyah, S.TP.,M.Si
- Azhar, A.Pi.,MM

PUSAT PENDIDIKAN PERTANIAN

Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian
KEMENTERIAN PERTANIAN

2019

BUKU AJAR

POLITEKNIK PEMBANGUNAN PERTANIAN

ISBN : 978-602- 6367-52-5

PENANGGUNG JAWAB

Kepala Pusat Pendidikan Pertanian

PENYUSUN

Motor Penggerak

- Annisa Nur Ichniarsyah, S.TP.,M.Si
- Azhar, A.Pi.,MM

TIM REDAKSI

Ketua : Dr. Ismaya Nita Rianti Parawansa, SP.,M.Si
Sekretaris : Yudi Astoni, S.TP.,M.Sc

Pusat Pendidikan Pertanian
Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian,
Kantor Pusat Kementerian Pertanian
Gedung D, Lantai 5, Jl. Harsono RM, No. 3 Ragunan, Jakarta Selatan 12550
Telp./Fax. : (021) 7827541, 78839234

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Buku Ajar Motor Penggerak dapat diselesaikan dengan baik. Buku ajar ini merupakan bahan pembelajaran bagi mahasiswa Pendidikan Tinggi Vokasi Pertanian lingkup Kementerian Pertanian dalam mengikuti proses perkuliahan untuk mendapatkan gambaran secara jelas dalam menerima materi pembelajaran.

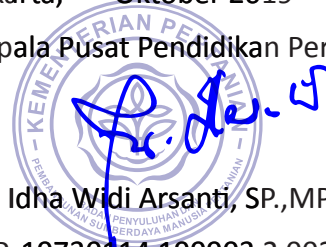
Terima kasih kami sampaikan kepada tim penyusun yang telah menyusun buku ajar ini serta semua pihak yang telah ikut membantu dalam penyelesaiannya. Materi buku ajar ini merupakan Mata kuliah Motor Penggerak dengan bobot 3 SKS (1-2) dilaksanakan pada semester II. Terdapat 14 kali tatap muka efektif ditambah dengan UTS dan UAS. Mata kuliah ini memberikan pengalaman belajar kepada mahasiswa tentang klasifikasi motor bakar dan motor listrik, efisiensi motor, bahan bakar dan pembakaran yang terjadi pada ruang bakar, serta menghitung efisiensi dan daya motor.

Isi buku ajar ini mencakup materi tentang 1. Mengenal Motor Penggerak Pertanian; 2. Prinsip Termodinamika Dalam Pembakaran; 3. Siklus Operasi Motor; 4. Motor Bakar Mesin; 5. Motor Bakar Diesel; 6. Motor Listrik; 7. Pendinginan dan Pelumasan. Buku ajar dilengkapi dengan soal latihan sebagai bahan evaluasi mahasiswa terhadap materi yang telah diberikan.

Pada kesempatan ini kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyusun dalam menyelesaikan buku ajar ini. Semoga buku ajar ini dapat memberikan manfaat bagi para mahasiswa pada Pendidikan Tinggi Vokasi Pertanian lingkup Kementerian Pertanian.

Jakarta, Oktober 2019

Kepala Pusat Pendidikan Pertanian



Dr. Idha Widi Arsanti, SP.,MP

NIP. 19730114 199903 2 002

PRAKATA

Mata kuliah Motor Penggerak merupakan salah satu mata kuliah wajib di Prodi Teknologi Mekanisasi Pertanian, sesuai dengan kurikulum yang berlaku sejak 2018. Setelah mengikuti perkuliahan, mahasiswa diharapkan memperoleh dasar-dasar pengetahuan dan keterampilan tentang cara pengoperasian dan perawatan motor penggerak.

Buku ajar ini disusun sebagai acuan pembelajaran bagi mahasiswa. Penyusun telah berupaya untuk menyusun bahan ajar sehingga mudah dipahami. Materi buku ajar ini disesuaikan dengan Rencana Pembelajaran Semester (RPS) yang telah disusun oleh tim dosen.

Kami menyadari bahwa banyak kekurangan dalam buku ajar ini. Untuk itu, kami sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan buku ajar ini di masa yang akan datang. Kami mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan buku ajar ini.

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
PRAKATA	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
PETA KOMPETENSI	x
GLOSARIUM	xi
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Deskripsi	1
B. Prasyarat	1
C. Manfaat Pembelajaran	1
D. Capaian Pembelajaran	1
E. Petunjuk Pembelajaran	2
F. Cek Kemampuan Awal (<i>Pre Test</i>)	2
BAB II. PEMBELAJARAN	3
Kegiatan Pembelajaran 1 :	
1. MENGENAL MOTOR PENGGERAK PERTANIAN.....	3
A. Deskripsi	3
B. Kegiatan Pembelajaran	3
1. Tujuan Pembelajaran	3
2. Uraian Materi	4
3. Rangkuman	7
4. Soal Latihan	8
5. Kunci Jawaban	8
6. Sumber Informasi dan Referensi	9
C. Penilaian	9
1. Sikap	9
2. Pengetahuan	9
3. Keterampilan	9

Kegiatan Pembelajaran 2 :

2. PRINSIP TERMODINAMIKA DALAM PEMBAKARAN	9
A. Deskripsi	9
B. Kegiatan Pembelajaran	10
1. Tujuan Pembelajaran	10
2. Uraian Materi	11
3. Rangkuman	21
4. Soal Latihan	21
5. Kunci Jawaban	22
6. Sumber Informasi dan Referensi	23
C. Penilaian	24
1. Sikap	24
2. Pengetahuan	24
3. Keterampilan	24

Kegiatan Pembelajaran 3 :

3. SIKLUS OPERASI MOTOR	24
A. Deskripsi	24
B. Kegiatan Pembelajaran.....	24
1. Tujuan Pembelajaran	24
2. Uraian Materi	25
3. Rangkuman	38
4. Soal Latihan	39
5. Kunci Jawaban	39
6. Sumber Informasi dan Referensi	40
C. Penilaian	40
1. Sikap	40
2. Pengetahuan	40
3. Keterampilan	40

Kegiatan Pembelajaran 4 :

4. MOTOR BAKAR BENSIN	40
A. Deskripsi	40

B. Kegiatan Pembelajaran.....	41
1. Tujuan Pembelajaran	41
2. Uraian Materi	41
3. Rangkuman	49
4. Soal Latihan	50
5. Kunci Jawaban	50
6. Sumber Informasi dan Referensi	51
C. Penilaian	52
1. Sikap	52
2. Pengetahuan	52
3. Keterampilan	52
Kegiatan Pembelajaran 5 :	
5. MOTOR BAKAR DIESEL	52
A. Deskripsi	52
B. Kegiatan Pembelajaran	52
1. Tujuan Pembelajaran	52
2. Uraian Materi	52
3. Rangkuman	58
4. Soal Latihan	59
5. Kunci Jawaban	59
6. Sumber Informasi dan Referensi	61
C. Penilaian	62
1. Sikap	62
2. Pengetahuan	62
3. Keterampilan	62
Kegiatan Pembelajaran 6 :	
6. MOTOR LISTRIK	62
A. Deskripsi	62
B. Kegiatan Pembelajaran	63
1. Tujuan Pembelajaran	63
2. Uraian Materi	63

3. Rangkuman	76
4. Soal Latihan	77
5. Kunci Jawaban	77
6. Sumber Informasi dan Referensi	78
C. Penilaian.....	78
1. Sikap	78
2. Pengetahuan	78
3. Keterampilan	78
Kegiatan Pembelajaran 7 :	
7. PENDINGINAN DAN PELUMASAN	79
A. Deskripsi	79
B. Kegiatan Pembelajaran.....	79
1. Tujuan Pembelajaran	79
2. Uraian Materi	79
3. Rangkuman	91
4. Soal Latihan	92
5. Kunci Jawaban	93
6. Sumber Informasi dan Referensi	94
C. Penilaian	95
1. Sikap	95
2. Pengetahuan	95
3. Keterampilan	95
BAB III. PENUTUP	96
DAFTAR PUSTAKA	96

DAFTAR TABEL

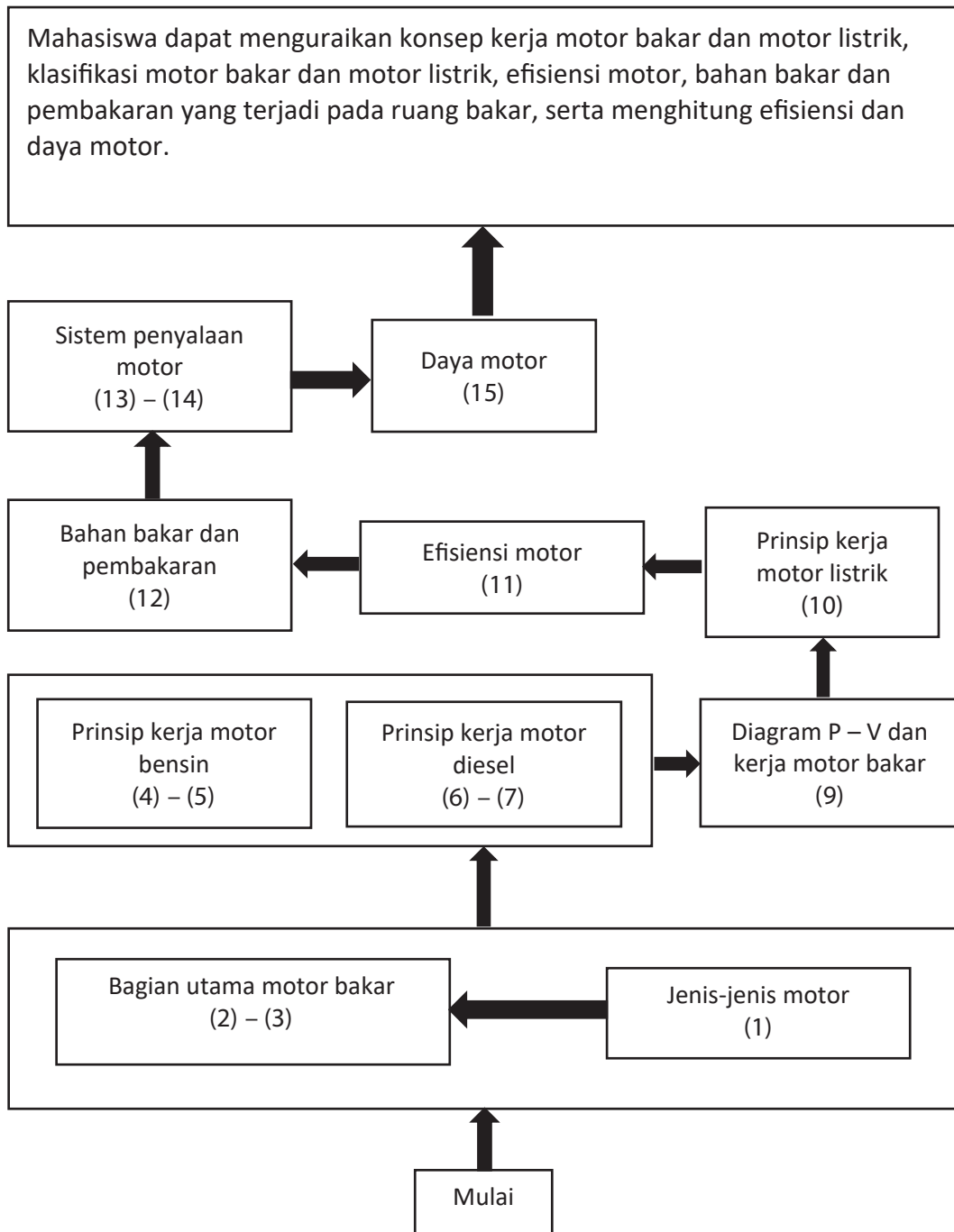
Tabel	Halaman
1. Perbandingan Motor Diesel dan Motor Bensin	58
2. Jenis Kehilangan pada Motor Induksi	74
3. Konduktivitas Termal Beberapa Material	82

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Irisan Sebuah Mobil yang Memperlihatkan Ruang Bakar	13
2. Siklus Mesin Otto yang Ideal (a) Diagram P-V (b) Diagram T-s	14
3. Perbandingan Diagram P-V Siklus Otto (a) 2 Langkah (b) 4 Langkah	16
4. Siklus Mesin Diesel yang Ideal (a) Diagram P-V (b) Diagram T-s	17
5. Diagram P-V pada Siklus Ganda	18
6. Diagram P-V pada Siklus Atkinson	19
7. Diagram P-V pada Silus Miller	20
8. Potongan Komponen Motor Bensin Empat Langkah	25
9. Torak	26
10. Batang Torak	27
11. Pena Torak dan Bagian Sambungan	27
12. Cincin Torak	28
13. Poros Engkol (a) Satu Silinder (b) Empat Silinder	29
14. Blok Silinder	29
15. Macam-macam Konfigurasi Blok Silinder	30
16. Kepala Silinder	31
17. Packing Kepala Silinder	31
18. Prinsip Kerja Motor Dua Langkah	
(a) Langkah Hisap dan Kompresi	
(b) Langkah Daya dan Buang.....	32
19. Prinsip Kerja Motor Empat Langkah	34
20. Skema Sistem Bahan Bakar Motor Bensin	42
21. Tangki Bahan Bakar dan Komponennya	43
22. Saringan Bahan Bakar	43
23. Siklus Aliran Bahan Bakar	45
24. Mekanisme Kerja Pelampung	46
25. Koil	47
26. Platina	48
27. Kondensator	48

28. Busi	49
29. Skema Sistem Bahan Bakar Motor Diesel	53
30. Diagram Alir Bahan Bakar	54
31. Saringan Bahan Bakar	56
32. Pompa Injeksi Bahan Bakar	56
33. Pipa Tekanan Tinggi	57
34. Pengabut	57
35. Klasifikasi Jenis Motor Listrik	64
36. Medan Magnet Membawa Arus Mengelilingi Konduktor	65
37. Medan Magnet Membawa Arus yang Mengelilingi Konduktor Berbentuk U	65
38. Motor DC	67
39. Motor Sinkron	69
40. Motor Induksi 3 Fase	71
41. Grafik Hubungan Antara Beban, Kecepatan dan Torsi	73
42. Skema Sistem Pendingin Cairan pada Motor	82
43. Tekanan Gas Pembakaran Terhadap Cincin Torak	88

PETA KOMPETENSI



GLOSARIUM

<i>Bearing</i>	: Berfungsi sebagai bantalan antara dua poros yang berputar untuk mengurangi gesekan sehingga poros dapat berputar secara halus
Busi	: Menghasilkan percikan api pada motor bensin
Cincin torak	: Cincin yang terpasang pada torak untuk mencegah kebocoran kompresi dan menahan oli naik ke kepala silinder
Karburator	: Alat yang mencampur udara dan bahan bakar pada mesin bakar internal
Katup	: Mengatur keluar-masuk udara dan bahan bakar ke dalam dan ke luar silinder
Poros engkol	: Komponen mesin yang mengubah gerak naik-turun torak menjadi gerak putar
<i>Stroke</i>	: Panjang langkah kerja torak yang diukur dari Titik Mati Atas (TMA) sampai ke Titik Mati Bawah (TMB)
Titik Mati Atas (TMA)	: Ketika torak berada pada bagian atas suatu langkah di dalam silinder dan posisi torak dekat pada kepala silinder
Titik Mati Bawah (TMB)	: Ketika torak berada pada bagian bawah suatu langkah di dalam silinder dan posisi torak dekat pada poros engkol
Torak	: Komponen sumbat geser yang terpasang presisi di dalam silinder yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima hentakan pembakaran pada ruang bakar



BAB I.

PENDAHULUAN

A. Deskripsi

Mata kuliah Motor Penggerak dengan bobot 3 SKS (1-2) dilaksanakan pada semester II. Terdapat 14 kali tatap muka efektif ditambah dengan UTS dan UAS. Mata kuliah ini memberikan pengalaman belajar kepada mahasiswa tentang klasifikasi motor bakar dan motor listrik, efisiensi motor, bahan bakar dan pembakaran yang terjadi pada ruang bakar, serta menghitung efisiensi dan daya motor.

B. Prasyarat

Tidak ada mata kuliah prasyarat untuk mengikuti mata kuliah Motor Penggerak. Mata kuliah ini memberikan pengetahuan dasar terkait motor penggerak dan berbagai jenisnya dan menjadi salah satu fondasi keilmuan mahasiswa dalam bidang mekanisasi pertanian pada perkuliahan di semester berikutnya.

C. Manfaat Pembelajaran

Menjelaskan tentang manfaat materi pembelajaran bagi mahasiswa. Setelah mengikuti perkuliahan, mahasiswa mampu mengoperasikan, melakukan perawatan dan pemeliharaan, serta melakukan modifikasi sederhana alat dan mesin pertanian (alsintan). Dengan demikian, mahasiswa nantinya mampu menjadi operator dan teknisi alsintan. Dalam bidang jasa, mahasiswa diharapkan mampu menjadi wirausahawan di bidang pertanian seperti menyediakan layanan jasa perawatan dan pemeliharaan alsintan serta mampu melakukan modifikasi sederhana pada alsintan.

D. Capaian Pembelajaran

Adapun capaian pembelajaran yang ingin diperoleh dari mata kuliah ini adalah agar mahasiswa mampu menjelaskan jenis tenaga penggerak di bidang pertanian, efisiensi motor, bahan bakar dan pembakaran yang terjadi di ruang bakar serta daya motor.

E. Petunjuk Pembelajaran

Kompetensi yang ingin dicapai dari mata kuliah Motor Penggerak dinyatakan melalui indikator-indikator performansi. Hasilnya, dijabarkan ke dalam materi pembelajaran mata kuliah Motor Penggerak yang memiliki 3 SKS dengan 1 SKS teori dan 2 SKS praktik. Oleh karena itu, sesuai dengan definisi 1 SKS maka setiap minggu pembelajaran terdiri dari metode kuliah selama 50 menit tatap muka, 60 menit alokasi waktu untuk tugas terstruktur, dan 60 menit alokasi waktu untuk tugas mandiri. Setiap minggu terdapat pembelajaran praktik yang dilakukan dengan praktikum di kebun/lahan praktik selama 2 x 120 menit kegiatan praktik dan 2 x 50 menit kegiatan mandiri.

F. Cek Kemampuan Awal (*Pre Test*)

Perhatikan pernyataan di bawah ini, kemudian lingkari huruf B jika pernyataan tersebut **Benar** dan lingkari huruf S jika pernyataan tersebut **Salah**.

- B – S 1 Motor bakar adalah motor karena ada proses pembakaran
- B – S 2 Yang dimaksud dengan motor bakar dalam (internal combustion engine) ialah motor bakar yang dilengkapi dengan poros engkol di dalam karter
- B – S 3 Mesin bensin 2 langkah artinya mesin yang dalam satu kali siklus pembakaran akan mengalami 4 proses dalam 2 kali putaran piston
- B – S 4 Fungsi piston pada saat langkah kompresi pada motor diesel 4 tak adalah menekan udara yang masuk ke ruang bakar di dalam silinder
- B – S 5 Bomb calorimeter adalah salah satu alat untuk mengukur nilai kalor suatu benda
- B – S 6 Terjadinya pembakaran dalam motor diesel disebabkan oleh semprotan bahan bakar oleh nosel
- B – S 7 Efisiensi panas motor diesel lebih besar dari motor bensin karena nilai bakar bahan bakar diesel lebih rendah daripada bensin
- B – S 8 Yang membedakan antara karburator otomatis dengan karburator sederhana adalah ada dan tidaknya jarum penutup dan pelampung
- B – S 9 Pembakaran pada motor diesel terjadi pada saat posisi piston pada awal langkah kompresi
- B – S 10 Komponen untuk memasukkan bahan bakar diesel ke dalam ruang pembakaran adalah dengan injektor (nosel)

BAB II.

PEMBELAJARAN

Kegiatan Pembelajaran 1 :

1. Mengetahui Motor Penggerak Pertanian

A. Deskripsi

Teknologi hadir untuk memudahkan pekerjaan manusia sekaligus untuk meningkatkan hasil. Oleh karena itu, peran teknologi dalam bidang pertanian sangat dibutuhkan seperti misalnya dalam kegiatan produksi pertanian yang meliputi kegiatan pengolahan tanaman (*on-farm*) hingga penanganan pascapanen (*off-farm*). Penggunaan teknologi telah membantu meningkatkan produktivitas hasil pertanian. Sebelum memahami mengenai teknologi yang membantu kegiatan budidaya, mahasiswa terlebih dahulu memahami mengenai motor sebagai sumber tenaga. Bab ini akan menjelaskan tentang jenis-jenis motor penggerak.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Mahasiswa dapat merumuskan dan menjelaskan pengertian pesawat tenaga;
- b. Mahasiswa dapat menjelaskan pengertian motor;
- c. Mahasiswa dapat menjelaskan pengertian mesin;
- d. Mahasiswa dapat menjelaskan dan membandingkan motor bakar dalam (*internal combustion engine-ICE*) dan motor bakar luar (*external combustion engine-ECE*) ; dan
- e. Mahasiswa dapat mengklasifikasikan motor bakar menurut: perubahan energi, cara pembakaran, prinsip kerja, gerak yang dihasilkan, bahan bakar yang digunakan, siklus, kerja yang dilakukan, jumlah silinder, dan sistem pendinginan.

2. Uraian Materi

a. Sumber Tenaga Penggerak pada Alat dan Mesin Pertanian

Terdapat dua jenis energi yang dapat digunakan secara langsung di bidang pertanian: energi kinetik dan energi panas. Energi kinetik biasa digunakan untuk menggerakkan alat dan mesin pertanian (alsintan). Sedangkan energi panas digunakan untuk kegiatan pengeringan dan pengolahan pascapanen. Contoh penggunaan energi kinetik adalah pada pengolahan tanah menggunakan implemen (bajak), menarik *trailer*, dan lainnya. Contoh lain adalah penggunaan energi kinetik untuk memutar poros seperti yang terdapat pada alat pompa air, alat perontok, dan lainnya.

Sumber tenaga penggerak adalah asal dari tenaga yang digunakan pada pekerjaan pertanian. Misalnya, suatu peralatan digerakkan menggunakan motor listrik, sedangkan listrik tersebut dibangkitkan oleh generator yang berputar karena kincir angin. Berarti sumber tenaga untuk peralatan tersebut adalah tenaga angin. Terdapat tiga jenis sumber tenaga yang umum digunakan manusia di bidang pertanian, antara lain tenaga manusia, tenaga hewan, tenaga mesin, dan tenaga alam.

Motor adalah mesin pengubah tenaga yang menghasilkan luaran berupa putaran poros. Motor merupakan sumber penggerak yang keluaran tenaga putarnya digunakan untuk menggerakkan berbagai mesin atau peralatan lain. Motor bakar ialah sumber tenaga penggerak yang menghasilkan keluaran berbentuk putaran yang sumber energinya berasal dari pembakaran. Contoh motor bakar antara lain:

- 1) Motor bensin untuk berbagai penerapan misalnya pada pompa air, sepeda motor, mobil, kompresor udara, mesin semprot, mesin pemotong rumput, dan sebagainya. Sumber energi untuk menggerakkan motor bensin adalah pembakaran bensin.
- 2) Motor diesel yang digunakan pada mobil, traktor, pembangkit listrik, pompa air, gilingan padi, dan sebagainya. Sumber energi untuk menggerakkan motor diesel adalah pembakaran solar.

- 3) Motor listrik digunakan pada mobil, sepeda, kereta, dan sebagainya. Penggunaan motor listrik belakangan semakin meningkat karena dinilai lebih ramah lingkungan.
- 4) Mesin uap, baik yang berupa torak maupun turbin (turbin uap). Sumber energi untuk menggerakkan mesin uap adalah pembakaran berbagai macam bahan bakar misalnya batubara, kayu bakar, minyak bakar, ampas tebu, dan sebagainya.
- 5) Turbin gas, berupa turbin yang digerakkan oleh tenaga hembusan gas hasil pembakaran bahan bakar. Prinsip kerjanya sama dengan turbin uap, pembedanya ialah jika turbin uap digerakkan oleh tekanan uap, turbin gas digerakkan oleh tekanan gas hasil pembakaran.

b. Klasifikasi Motor Penggerak

Motor penggerak ada yang beroperasi sebagai mesin kalor adapula yang berasal dari tenaga listrik. Mesin kalor adalah mesin yang mengubah energi panas untuk melakukan kerja mekanis. Dengan kata lain, motor bakar dengan tenaga kimia yang berasal dari bahan bakar diubah menjadi energi gerak. Tenaga yang dihasilkan oleh motor bakar lebih besar dibandingkan tenaga manusia dan hewan. Keuntungan penggunaan motor bakar antara lain:

- 1) Tenaga yang dihasilkan besar;
- 2) Mampu bekerja dalam jangka waktu yang lama;
- 3) Dapat digunakan setiap saat selama masih ada bahan bakar; dan
- 4) Dapat menjadi sumber tenaga alat yang stasioner maupun mesin yang bergerak.

Berdasarkan cara pembakaran, motor bakar digolongkan menjadi dua golongan, yaitu:

- 1) Motor bakar pembakaran luar (*external combustion engine*)

Motor bakar tipe ini bekerja dengan proses pembakaran terjadi di luar mesin. Fluida kerja (fluida yang menghasilkan energi gerak) terpisah dari gas hasil pembakaran. Contoh motor bakar pembakaran luar adalah mesin uap.

Pembakaran pada mesin uap terjadi di tungku, sedangkan air dan uap air sebagai fluida kerja terletak di dalam ketel dan saluran uap. Panas pembakaran yang disalurkan melalui dinding ketel ke fluida kerja, adapun gas hasil pembakaran dibuang ke luar. Mesin uap meliputi jenis mesin uap torak dan turbin uap. Kebanyakan mesin uap yang ada sekarang adalah dari jenis turbin uap. Turbin uap banyak dipakai di pembangkit listrik serta di pabrik gula.

2) Motor bakar pembakaran dalam (*internal combustion engine*)

Pembakaran pada motor tipe ini berasal dari dalam mesin tersebut. Fluida kerja motor bakar dalam berasal dari gas hasil pembakaran yang terjadi pada silinder blok mesin. Bagian utama motor bakar torak adalah silinder dan torak. Di dalam ruang silinder atau yang biasa disebut ruang bakar dibatasi oleh kepala silinder, dinding silinder, dan torak terjadi pembakaran bahan bakar dengan oksigen. Gas hasil pembakaran yang memuai kemudian akan mendorong torak bergerak sepanjang silinder hingga terjadi gerak translasi. Gerak translasi torak ini diubah melalui mekanisme poros engkol menjadi gerak rotasi. Motor dengan pembakaran di dalam silinder dapat diklasifikasi sebagai berikut:

Berdasarkan langkah gerak torak atau piston, yaitu:

- i. Motor 4 Langkah
- ii. Motor 2 Langkah

Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, yaitu:

- i. Motor bensin
- ii. Motor diesel
- iii. Motor kerosin

Berdasarkan jumlah silinder yang digunakan, yaitu:

- i. Motor satu silinder (tunggal)
- ii. Motor dua silinder (ganda)
- iii. Motor multi silinder (bersilinder 3, 4, 6, dan seterusnya)

Berdasarkan sistem pengapian proses terjadinya pembakaran, yaitu:

- i. Loncatan bunga api listrik dari busi (motor bensin)
- ii. Panas kompresi (motor diesel)

Berdasarkan putaran motor (rpm), terdiri atas:

- i. Motor dengan putaran rendah (<800 rpm)
- ii. Motor dengan putaran sedang (800 – 1200 rpm)
- iii. Motor dengan putaran tinggi (>1200 rpm)

Berdasarkan sistem pendinginan, terdiri atas:

- i. Sistem pendinginan dengan udara
- ii. Sistem pendinginan dengan air

3. Rangkuman

Energi yang dapat digunakan secara langsung di bidang pertanian adalah energi kinetik dan energi panas. Energi kinetik digunakan untuk menggerakkan alat dan mesin pertanian. Adapun energi panas, digunakan untuk kegiatan pengeringan dan pengolahan pascapanen.

Motor adalah mesin pengubah tenaga yang menghasilkan luaran berupa putaran poros. Motor bakar ialah sumber tenaga penggerak yang menghasilkan keluaran berbentuk putaran yang sumber energinya berasal dari pembakaran. Keuntungan penggunaan motor bakar adalah: 1) tenaga yang dihasilkan besar, b) mampu bekerja dalam jangka waktu yang lama, c) dapat digunakan setiap saat, d) dapat menjadi sumber tenaga mesin stasioner maupun mesin bergerak.

Berdasarkan cara pembakaran, motor bakar digolongkan menjadi dua golongan yaitu motor bakar pembakaran luar dan motor bakar pembakaran dalam. Sedangkan berdasarkan langkah gerak torak/piston, motor bakar terdiri dari motor 2 langkah dan 4 langkah. Sedangkan berdasarkan bahan bakar yang digunakan, pembagian motor bakar adalah motor bensin, motor diesel, dan motor kerosin.

4. Soal Latihan

- 1) Sebutkan dan jelaskan dua jenis energi yang digunakan secara langsung di bidang pertanian!
- 2) Jelaskan dengan contoh, tenaga manusia yang digunakan di bidang pertanian!
- 3) Apa yang dimaksud dengan motor? Apakah motor dan motor bakar berbeda? Jelaskan!
- 4) Jelaskan keuntungan penggunaan motor bakar!
- 5) Apa yang dimaksud dengan motor bensin?

5. Kunci Jawaban

- 1) Terdapat dua jenis energi yang langsung digunakan di bidang pertanian yaitu energi kinetik dan energi panas. Energi kinetik biasa digunakan untuk menggerakkan alsintan. Sedangkan energi panas digunakan untuk kegiatan pengeringan dan pengolahan pascapanen.
- 2) Tenaga manusia yang digunakan di bidang pertanian misalnya dalam kegiatan pengolahan tanah menggunakan cangkul. Contoh lain adalah kegiatan pindah tanam yaitu penanaman bibit padi yang sudah disemai ke lahan secara manual merupakan contoh tenaga manusia yang digunakan di bidang pertanian.
- 3) Motor adalah mesin pengubah tenaga yang menghasilkan luaran berupa putaran poros. Motor bakar adalah sumber tenaga penggerak yang menghasilkan luaran berbentuk putaran yang sumber energinya berasal dari pembakaran. Motor dan motor bakar berbeda jika ditinjau dari definisinya.
- 4) Penggunaan motor bakar memberikan beberapa keuntungan, antara lain menghasilkan tenaga yang besar, pekerjaan dapat dilangsungkan pada waktu yang lama, dapat digunakan setiap saat, dan motor bakar dapat menjadi sumber tenaga alat yang stationer maupun mesin yang bergerak.
- 5) Motor bensin adalah motor yang sistem pengapiannya berasal dari loncatan bunga api listrik dari busi. Bahan bakar dan udara yang tercampur dan dalam kondisi terkompresi di ruang bakar kemudian dipercikkan bunga api dari

busi. Ledakan yang terjadi dalam ruang bakar akan mendorong torak yang meneruskan dorongan ke poros engkol sehingga ada gaya rotasi. Mesin bensin disebut juga dengan mesin Otto.

6. Sumber Informasi dan Referensi

Arismunandar, Wiranto. 1994. Motor Bakar Torak: Penggerak Mula. Bandung: Penerbit ITB

Cengel, Yunus A dan Michael A. Boles. 2015. *Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition*. New York: McGraw Hill

Goering, Carroll E dan Allan C. Hansen. 2004. Engine and Tractor Power 4th Edition. St. Joseph. Michigan: ASAE

Griswold, John. 1996. Fuel Combustion and Furnaces. London: Mc. Graw- Hill

Stone, Richard dan Jeffrey K. Ball. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals*. Warrendale: SAE International

C. Penilaian

1. Sikap : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
2. Pengetahuan : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
3. Keterampilan : Mampu menjelaskan terkait motor penggerak

Kegiatan Pembelajaran 2 :

2. Prinsip Termodinamika Dalam Pembakaran

A. Deskripsi

Secara teoritis, pembakaran dapat diartikan sebagai reaksi kimia berantai antara oksigen dengan elemen yang mudah terbakar (*combustible element*). Proses pembakaran digunakan pada berbagai kebutuhan manusia. Rekayasa konversi energi memanfaatkan proses pembakaran untuk pembangkitan tenaga listrik, kendaraan bermotor, dan kebutuhan-kebutuhan lainnya.

Untuk mendapatkan manfaat yang maksimal dari proses pembakaran, dibutuhkan proses pembakaran yang sempurna. Syarat-syarat agar dapat terjadi pembakaran sempurna yaitu:

- 1) Kualitas udara (oksigen) yang disuplai ke bahan bakar cukup;
- 2) Oksigen dan bahan bakar benar-benar tercampur;
- 3) Campuran bahan bakar-udara terjaga di atas temperatur pengapiannya; dan
- 4) Volume ruang bakar cukup luas sehingga memberikan waktu yang cukup bagi campuran bahan bakar-udara untuk tercampur sempurna.

Pada kondisi ideal, proses pembakaran dapat terjadi apabila jumlah bahan bakar dan udara pada proporsi tertentu, yang berdasarkan prinsip kimia (stoikiometrik). Namun kenyataan yang terjadi adalah, campuran bahan bakar dengan udara di dalam ruang bakar sangat mustahil untuk mencapai kondisi sempurna. Untuk itulah dibutuhkan adanya *excess air* yang disuplai ke dalam proses pembakaran untuk memastikan terjadinya pembakaran yang sempurna. Jumlah dari *excess air* tergantung dari bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran.

Motor bakar menghasilkan tenaga gerak akibat adanya proses pembakaran di ruang bakar (silinder mesin). Proses pembakaran yang terjadi haruslah mendekati ideal agar menghasilkan kerja motor yang optimal. Oleh karena itu, pembakaran yang terjadi haruslah mengikuti prinsip termodinamika pembakaran. Bab ini akan menjelaskan tentang pembakaran yang terjadi di ruang bakar dan hubungannya dengan prinsip termodinamika.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang pengertian diagram $P - V$;
- b. Mahasiswa mampu menjelaskan dan menggambarkan diagram $P - V$ motor bensin 2 langkah dan 4 langkah; dan
- c. Mahasiswa mampu menjelaskan dan menggambarkan diagram $P - V$ motor diesel 2 langkah dan 4 langkah.

2. Uraian Materi

a. Mengenal Termodinamika

Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang berkaitan dengan hukum-hukum pertukaran panas ke dalam bentuk tenaga mekanis atau sebaliknya. Terdapat tiga hukum utama termodinamika yaitu Hukum Termodinamika I, Hukum Termodinamika II, dan Hukum Termodinamika III. Ketiga hukum ini bersama dengan hukum termodinamika ke-nol yang merupakan dasar pengukuran temperatur membentuk suatu dasar dalam membangun pengetahuan termodinamika.

Hukum Termodinamika I merupakan hasil pengujian yang meliputi semua perubahan siklus, termasuk perubahan akibat adanya pemberian panas pada sistem dan pelaksanaan kerja oleh sistem selama proses siklus tersebut. Oleh karena itu, jumlah transfer kerja sebanding dengan jumlah transfer panas.

Hukum Termodinamika II memberikan jawaban tentang beberapa hal di antaranya:

- 1) Menentukan efisiensi paling tinggi yang mungkin dari suatu mesin panas atau koefisien performa maksimum dari suatu mesin pendingin;
- 2) Menentukan apakah suatu proses mungkin berlangsung atau tidak;
- 3) Menentukan arah atau derajat suatu reaksi kimia;
- 4) Menentukan skala temperatur yang tidak tergantung pada sifat-sifat fisik tiap zat; dan
- 5) Mendefinisikan suatu sifat yang sangat berguna yang disebut entropi.

Hukum Termodinamika III menyatakan bahwa panas tidak dapat dipindahkan dari derajat yang lebih rendah ke derajat yang lebih tinggi tanpa adanya kerja luar, pada kenyataannya juga tampak panas tidak pernah mengalir dari temperatur rendah ke temperatur yang lebih tinggi.

b. Proses Termodinamika pada Siklus Motor

Perubahan panas menjadi usaha mekanis di dalam silinder motor bakar dapat diteliti secara teoritis dengan menganalisis proses termodinamika yang terjadi.

Efisiensi kerja motor dapat diketahui berdasarkan analisis tersebut. Siklus motor bakar dibentuk dari lima rangkaian proses, antara lain:

- 1) Proses pengisian,
- 2) Proses kompresi,
- 3) Proses pengapian,
- 4) Proses ekspansi, dan
- 5) Proses pembuangan.

Kelima proses dapat bekerja dengan baik pada motor empat langkah jika melalui empat langkah torak dan pada motor dua langkah setelah melalui dua langkah torak. Proses kompresi dan ekspansi terjadi secara adiabatik. Proses pembakaran juga terjadi secara isobaris dan isokhorik. Ketiga rangkaian proses ini kemudian membentuk suatu siklus motor bakar. Proses-proses ini dinyatakan dalam hubungan tekanan-volume ($P - V$) dengan menganggap bahwa:

- 1) Muatan dalam silinder memenuhi sifat-sifat gas sempurna, yang disebut sebagai udara standar;
- 2) Panas jenis muatan konstan pada tiap keadaan dan tiap proses;
- 3) Proses kompresi dan ekspansi berlangsung secara adiabatik;
- 4) Massa yang dikerjakan itu berjumlah konstan;
- 5) Tidak terdapat kerugian mekanis pada tiap langkah;
- 6) Bahan bakar menguap sempurna dan tercampur homogen pada udara; dan
- 7) Katup-katup dan saluran masuk atau buang terbuka dan tertutup tepat pada titik-titik matinya.

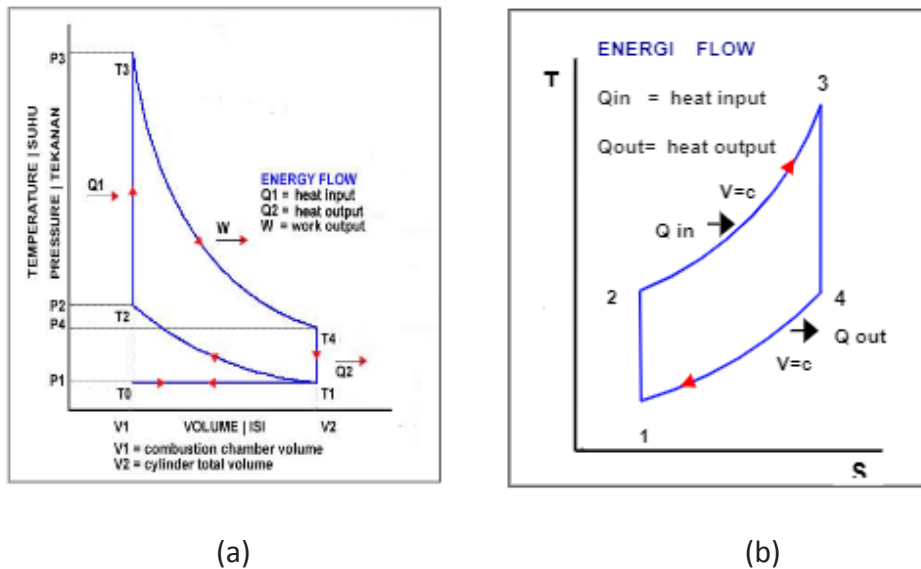
Dalam ilmu Termodinamika, gas sebagai benda kerja umumnya dianggap bersifat sebagai gas ideal. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat gas ideal yang hanya berbeda sedikit dari sifat-sifat gas yang sebenarnya. Gas ideal adalah kondisi suatu gas yang tenaga ikat molekul-molekulnya dapat diabaikan.



Gambar 1. Irisan Sebuah Mobil yang Memperlihatkan Ruang Bakar (Sumber: *Thermodynamics, Cengel*)

(1) Siklus Otto

Siklus Otto adalah siklus ideal yang terjadi pada mesin bensin. Penamaan siklus ini berasal dari penemu mesin bensin yaitu Nikolaus A. Otto yang telah berhasil membuat mesin empat langkah pada tahun 1876 di Jerman. Motor bensin dikenal dengan **motor pengapian percik** (*spark ignition engines – SI engines*). Pada kebanyakan motor bensin, piston menyelesaikan empat langkah kerja di dalam silinder dan engkol berputar dua kali dari tiap siklus termodinamika. Siklus Otto didekati dengan siklus volume konstan. Gambar 2 berikut menunjukkan diagram P-V dan diagram T-s suatu siklus Otto yang ideal untuk mesin Otto empat langkah.



Gambar 2. Siklus Mesin Otto yang Ideal (a) Diagram P-V (b) Diagram T-s

Hubungan diagram P – V dengan fase pada mesin Otto empat langkah adalah sebagai berikut:

1) Fase pemasukan

Garis $T_0 - T_1$ adalah garis fase proses tekanan tetap dan suhu tetap yang menggambarkan langkah pemasukan gas campuran udara dan bahan bakar pada tekanan dan suhu tetap dari karburator ke silinder mesin, ketika katup masuk membuka dan piston turun 180° , ruang silinder membesar. Dalam proses ini, tekanan gas (P) dan suhu gas (T) tetap dan setara tekanan dan suhu standar normal udara luar, karena katup masuk terbuka. Volume silinder (V) membesar dari V_1 ke V_2 , sehingga bobot molekul gas campuran bahan bakar dan udara dalam silinder bertambah.

2) Fase kompresi

Garis $T_1 - T_2$ adalah garis fase proses yang menggambarkan langkah pemampatan gas campuran udara dan bahan bakar dalam silinder, ketika katup masuk tertutup dan katup buang tertutup dan piston naik 180° , ruang silinder mengecil. Volume silinder dan volume gas (V) mengecil dari V_1 ke V_2 , bobot molekul gas campuran bahan bakar dan udara tetap. Tekanan gas (P) meningkat dari P_1 ke P_2 dan suhu gas (T) meningkat dari T_1 ke T_2 .

3) Fase pembakaran

Garis $T_2 - T_3$ adalah proses pada volume tetap yang menggambarkan proses pemanasan, penyalaan, dan pembakaran gas campuran bahan bakar dan udara oleh percikan api busi, ketika kedua katup tertutup. Dalam proses ini volume gas pada V_1 , tetapi karena pemanasan, tekanan gas meningkat naik dari P_2 ke P_3 , sehingga suhu meningkat naik dari T_2 ke T_3 dan terjadi peledakan gas campuran bahan bakar dan udara oleh percikan api busi.

4) Fase tenaga

Garis $T_3 - T_4$ adalah garis proses yang menggambarkan langkah tenaga karena pembakaran gas campuran udara dan bahan bakar dalam silinder ketika kedua katup tertutup sehingga silinder turun 180° , ruang silinder membesar. Fase ini ditandai dengan volume silinder (V) yang membesar dari V_1 ke V_2 , bobot gas campuran tetap, tekanan gas (P) turun dari P_3 ke P_4 dan suhu gas (T) turun dari T_3 ke T_4 .

5) Fase pendinginan

Garis $T_4 - T_1$ adalah proses volume konstan yang menggambarkan proses pendinginan dan pengeluaran tenaga panas hasil pembakaran, ketika katup buang terbuka. Fase ini ditandai dengan volume gas tetap pada V_2 , bobot gas campuran tetap tekanan gas turun dari P_4 ke P_1 sehingga suhu gas turun dari T_4 ke T_1 .

6) Fase pembuangan

Garis $T_1 - T_0$ menunjukkan pada fase proses tekanan tetap yang menggambarkan langkah pembuangan sisa pembakaran, piston naik, ruang silinder mengecil. Tekanan gas P dan suhu gas T tetap setara tekanan atmosfer (udara luar) karena katup buang terbuka. Volume silinder (V) mengecil dari V_2 ke V_1 , sehingga bobot gas sisa pembakaran berkurang.

Perbandingan diagram P-V pada mesin dua langkah dan empat langkah disajikan pada Gambar 3 berikut.

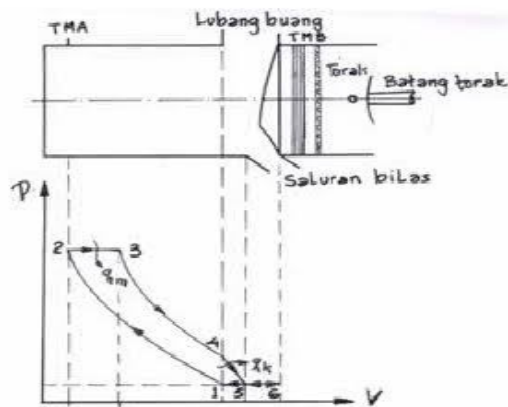


Diagram siklus otto 2 langkah

(a)

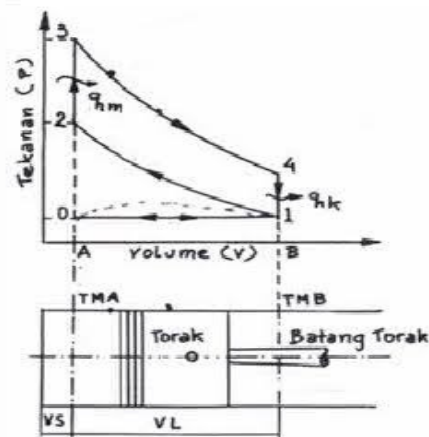


Diagram siklus otto 4 langkah

(b)

Gambar 3. Perbandingan Diagram P – V Siklus Otto (a) 2 Langkah (b) 4 Langkah

Keterangan:

Mesin dua langkah

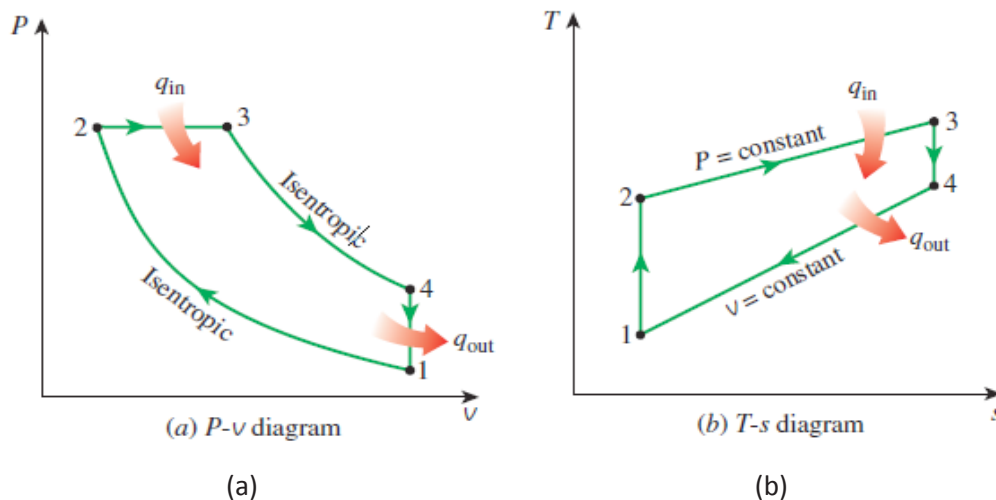
- 1 – 2 : Langkah kompresi tekanan bertambah, $Q = c$ (adiabatik)
- 2 – 3 : Pembakaran, P naik, $V = c$ (isokhorik)
- 3 – 4 : Langkah kerja kerja V bertambah, P turun (adiabatik)
- 4 – 5 : Awal pembuangan
- 5 – 6 : Awal pembilasan
- 6 – 7 : Akhir pembilasan

Mesin empat langkah

- 0 – 1 : Langkah hisap pada $P = c$ (isobar)
- 1 – 2 : Langkah kompresi, P bertambah, $Q = c$ (adiabatik)
- 2 – 3 : Pembakaran, P naik, $V = c$ (isokorik)
- 3 – 4 : Langkah kerja P bertambah, $V = c$ (adiabatik)
- 4 – 1 : Pengeluaran kalor sisa pada $V = c$ (isokhorik)
- 1 – 0 : Langkah buang pada $P = c$

(2) Siklus Diesel

Siklus Diesel adalah siklus ideal untuk mesin kompresi. Mesin ini dinamai seperti nama penemunya, Rudolph Diesel. Motor diesel sering dikenal dengan sebutan **motor penyalaaan kompresi** (*compression ignition engines – CI engines*). Perbedaan mesin Otto dan mesin Diesel terletak pada cara pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran didekati melalui pemasukan kalor pada tekanan konstan sehingga sering disebut siklus tekanan konstan. Adapun diagram P-V pada mesin diesel dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Siklus Mesin Diesel yang Ideal (a) Diagram P-V (b) Diagram T-s

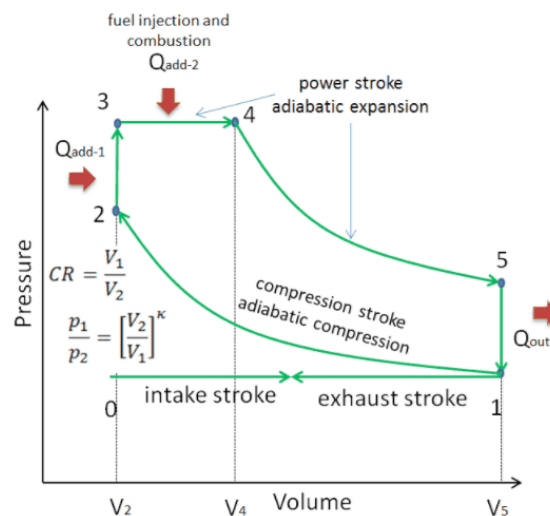
Keterangan:

- 1 – 2 : Proses kompresi secara isentropik
- 2 – 3 : Proses penambahan kalor pada tekanan konstan
- 3 – 4 : Proses ekspansi secara isentropik
- 4 – 1 : Proses pembuangan kalor pada volume konstan

Pada siklus mesin diesel ini, proses penyemprotan bahan bakar dimulai ketika torak mendekati TMA dan terus bekerja hingga mulai menghasilkan langkah kerja. Oleh sebab itu, proses pembakaran di mesin jenis ini memerlukan waktu yang agak lama, akibatnya proses pembakaran pada siklus diesel ideal menghasilkan tambahan panas pada tekanan yang konstan atau bisa disebut juga dengan proses penambahan kalor yang terjadi pada siklus diesel berlangsung pada tekanan konstan.

(3) Siklus Ganda

Siklus ganda (*dual cycle*) atau kadang disebut siklus **tekanan terbatas** merupakan siklus udara standar yang digunakan untuk menganalisis siklus motor pengapian kompresi modern. Sebutan siklus ganda berasal dari proses pemasukan kalor pada proses pembakaran yang terbaik dapat didekati melalui proses ganda, yaitu proses volume konstan diikuti proses tekanan konstan. Siklus ini sering dianggap sebagai modifikasi siklus Otto dengan suatu batasan tekanan bagian atas. Gambar 5 berikut menunjukkan diagram P-V pada siklus ganda.



Gambar 5. Diagram P-V Pada Siklus Ganda

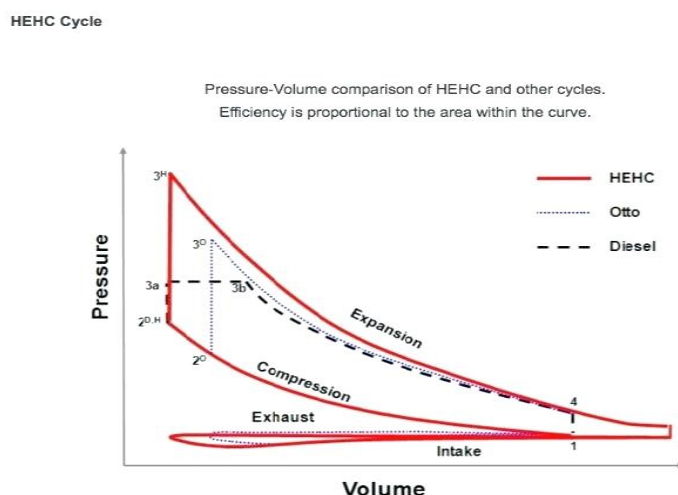
Keterangan:

- 0 – 1 : Langkah hisap pada tekanan konstan
- 1 – 2 : Proses kompresi secara isentropik
- 2 – 3 : Proses pembakaran pada volume konstan
- 3 – 4 : Proses pembakaran pada tekanan konstan
- 4 – 5 : Proses ekspansi secara isentropik
- 5 – 1 : Langkah buang pada volume konstan
- 1 – 0 : Langkah buang pada tekanan konstan

(4) Siklus Atkinson

Ketika katup masuk terbuka menjelang akhir langkah ekspansi bagi siklus Otto dan Diesel, tekanan di dalam silinder masih sekitar 3 sampai 5 atmosfer. Kemampuan melakukan tambahan kerja selama langkah daya akan hilang jika tutup buang terbuka dan tekanan berkurang ke tekanan atmosfer. Jika katup buang tidak terbuka sampai gas di dalam silinder berekspansi ke tekanan atmosfer, sejumlah kerja yang lebih besar akan diperoleh pada saat langkah daya dengan meningkatkan efisiensi termal motor. James Atkins pada tahun 1882 kemudian memperkenalkan siklus yang serupa dengan siklus udara baku berdasarkan pemikiran tadi. Oleh karena itu, siklus tersebut dinamai dengan siklus Atkinson atau siklus over-ekspansi.

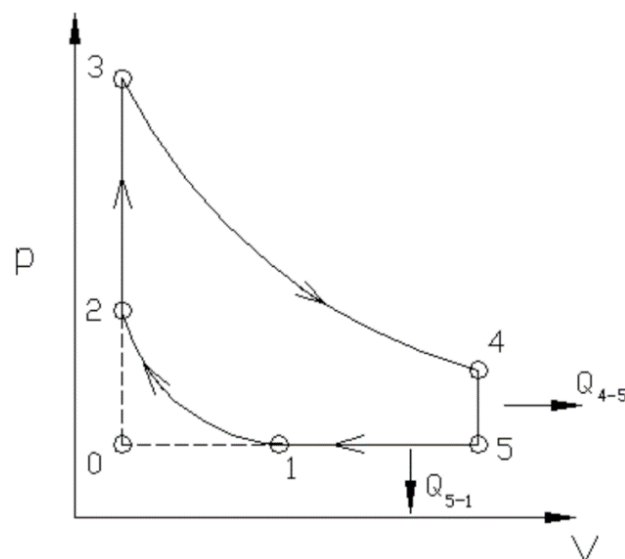
Siklus Atkinson mengacu pada motor lempat langkah. Katup hisap ditahan terbuka lebih lama untuk mengizinkan aliran balik ke dalam *manifold* hisap. Hal ini kemudian mengurangi rasio kompresi efektif dan memungkinkan rasio ekspansi melebihi rasio kompresi sedangkan tekanan kompresi dijaga normal. Harapannya, ekonomi bahan bakar dapat diperbaiki karena rasio kompresi pada motor bensin dibatasi oleh tingkat oktan bahan bakar sedangkan rasio ekspansi yang tinggi memberikan langkah daya lebih panjang dan mengurangi limbah kalor pada buangan sehingga membuat motor lebih efisien. Gambar 6 berikut menunjukkan siklus Atkinson udara baku.



Gambar 6. Diagram P-V Pada Siklus Atkinson

(5) Siklus Miller

Siklus ini dinamai seperti nama penemunya, R. H. Miller dan merupakan modifikasi dari siklus Atkinson modern dan mempunyai rasio ekspansi yang lebih besar dari rasio kompresi. Saluran masuk udara pada siklus Miller tanpa trotel. Jumlah udara yang bekerja pada setiap silinder selanjutnya dikendalikan dengan penutupan katup hisap pada saat yang tepat, jauh sebelum TMB. Saat torak bergerak secara kontinyu ke TMB sepanjang akhir langkah hisap, tekanan silinder berkurang melalui proses 1. Saat torak mencapai TMB dan mulai kembali menuju TMA, tekanan silinder meningkat lagi melalui proses 1 – 5. Siklus yang dihasilkan adalah 0-1-2-3-4-5-1. Gambar 7 menerangkan diagram P – V pada siklus Miller.



Gambar 7 Diagram P – V pada siklus Miller

Produksi motor mobil pertama yang beroperasi pada siklus Miller menggunakan dua metode yaitu metode penutupan katup hisap lebih awal dan metode penutupan katup hisap lebih lambat. Beberapa jenis sistem *timing* katup variabel telah dikembangkan dan digunakan. Pembukaan dan penutupan katup dengan aktuator elektronik tanpa menggunakan poros bubungan, memberikan fleksibilitas paling besar, baik untuk *timing* dan langkah katup variabel. Siklus Miller pada umumnya menggunakan pompa kompresor dengan tekanan puncak manifold hisap 150 – 200 kPa.

3. Rangkuman

Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang berkaitan dengan hukum-hukum pertukaran panas ke dalam bentuk tenaga mekanis atau sebaliknya. Terdapat tiga hukum utama termodinamika yaitu Hukum Termodinamika I, Hukum Termodinamika II, dan Hukum Termodinamika III. Ketiga hukum ini bersama dengan hukum termodinamika ke-nol yang merupakan dasar pengukuran temperatur membentuk suatu dasar dalam membangun pengetahuan termodinamika. Analisis siklus yang terjadi pada motor bakar menggunakan pendekatan teoritis siklus termodinamika yang menggunakan siklus udara yang dapat dianggap sebagai gas ideal. Siklus yang dianalisis pada umumnya siklus volume konstan, tekanan konstan, dan tekanan terbatas; masing-masing digunakan sebagai pendekatan teoritis proses pembakaran pada motor, baik motor bensin maupun motor diesel. Siklus Otto didekati dengan siklus volume konstan, sedangkan siklus diesel didekati dengan siklus tekanan konstan. Siklus untuk motor penyalaan kompresi modern menggunakan pendekatan siklus ganda. Sebutan tersebut berasal dari proses pemasukan kalor pada proses pembakaran terbaik dapat didekati melalui proses ganda, yaitu volume konstan yang diikuti oleh tekanan konstan.

Pengembangan lanjutan dari siklus motor bakar dilakukan oleh James Atkins yang dikenal dengan sebutan siklus Atkinson. Siklus ini memiliki langkah ekspansi lebih panjang dibandingkan langkah kompresi. Pengembangan siklus Atkinson dilakukan oleh R. H. Miller dan dikenal dengan sebutan siklus Miller. Siklus ini merupakan suatu peningkatan dari siklus Otto yang disempurnakan oleh beberapa kemajuan teknologi, sebagian besar melalui *timing* kendali katup variabel. Kendali katup mempertimbangkan suatu siklus yang lebih efisien dengan mengurangi kerugian pompa.

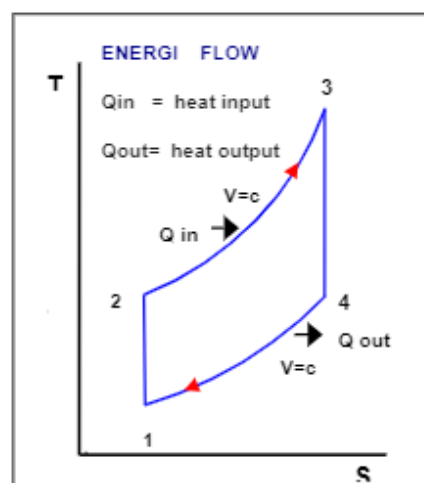
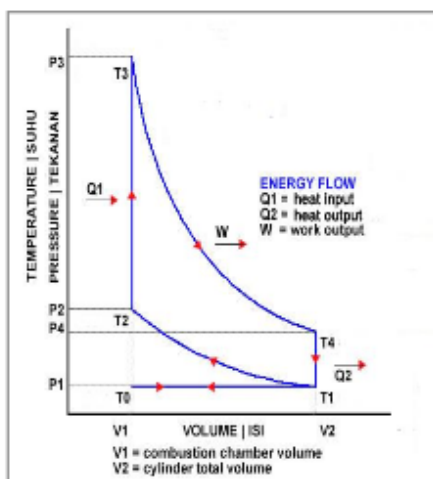
4. Soal Latihan

- 1) Apakah ilmu termodinamika dan mengapa ilmu tersebut penting dalam menganalisis pembakaran di mesin bensin dan mesin diesel?
- 2) Sebutkan lima rangkaian proses yang terjadi pada siklus motor bakar!

- 3) Sebutkan siklus apa saja yang menjadi acuan dalam termodinamika pembakaran bahan bakar?
- 4) Jelaskan bagaimana cara kerja siklus Otto!
- 5) Jelaskan perbedaan signifikan antara siklus Otto dan siklus Diesel!

5. Kunci Jawaban

- 1) Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang berkaitan dengan hukum-hukum pertukaran panas ke dalam bentuk tenaga mekanis atau sebaliknya. Ilmu termodinamika penting untuk menganalisis siklus yang terjadi pada motor bakar yang menggunakan pendekatan siklus udara gas ideal.
- 2) Lima rangkaian proses siklus motor bakar antara lain:
 - a) Proses pengisian,
 - b) Proses kompresi,
 - c) Proses pengapian,
 - d) Proses ekspansi, dan
 - e) Proses pembuangan.
- 3) Siklus Otto, siklus diesel, siklus ganda, siklus Atkinson, dan siklus Miller.
- 4) Cara kerja siklus Otto adalah sebagai berikut:



- Garis $T_0 - T_1$: Dalam proses ini, tekanan gas (P) dan suhu gas (T) tetap dan setara tekanan dan suhu standar normal udara luar, karena katup masuk terbuka. Volume silinder (V) membesar dari V_1 ke V_2 , sehingga bobot molekul gas campuran bahan bakar dan udara dalam silinder bertambah.
- Garis $T_1 - T_2$: Volume silinder dan volume gas (V) mengecil dari V_1 ke V_2 , bobot molekul gas campuran bahan bakar dan udara tetap. Tekanan gas (P) meningkat dari P_1 ke P_2 dan suhu gas (T) meningkat dari T_1 ke T_2 .
- Garis $T_2 - T_3$: volume gas pada V_1 , tetapi karena pemanasan, tekanan gas meningkat naik dari P_2 ke P_3 , sehingga suhu meningkat naik dari T_2 ke T_3 dan terjadi peledakan gas campuran bahan bakar dan udara oleh percikan api busi.
- Garis $T_3 - T_4$: Volume silinder (V) yang membesar dari V_1 ke V_2 , bobot gas campuran tetap, tekanan gas (V) turun dari P_3 ke P_4 dan suhu gas (T) turun dari T_3 ke T_4 .
- Garis $T_4 - T_1$: volume gas tetap pada V_2 , bobot gas campuran tetap tekanan gas turun dari P_4 ke P_1 sehingga suhu gas turun dari T_4 ke T_1 .
- Garis $T_1 - T_0$: Volume silinder (V) mengecil dari V_2 ke V_1 , sehingga bobot gas sisa pembakaran berkurang.
- 5) Perbedaan mesin Otto dan mesin Diesel terletak pada cara pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran didekati melalui pemasukan kalor pada tekanan konstan sehingga sering disebut siklus tekanan konstan.

6. Sumber Informasi dan Referensi

- Cengel, Yunus A dan Michael A. Boles. 2015. *Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition*. New York: McGraw Hill
- Griswold, John. 1996. *Fuel Combustion and Furnaces*. London: Mc. Graw- Hill.
- Ferguson, Colin R dan Allan T. Kirkpatrick. 2001. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences 2nd Edition*. New York: John Willey & Sons INC
- Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw Hill
- Kristanto, Philip. 2015. *Motor Bakar Torak: Teori dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Penerbit Andi

C. Penilaian

1. **Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
2. **Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
3. **Keterampilan** : Mampu menjelaskan diagram P – V dan hubungannya dengan termodinamika pembakaran bahan bakar

Kegiatan Pembelajaran 3 :

3. Siklus Operasi Motor

A. Deskripsi

Siklus operasi motor berjalan tidak lepas dari adanya termodinamika pembakaran. Prinsip dasar kerja motor bakar adalah adanya pemanasan pada ruang tertutup yang menyebabkan pemuaian gas, pada gilirannya menaikkan tekanan gas. Tekanan gas dapat diubah menjadi daya mekanika, dengan membuat rancangan berupa silinder yang ditutup mati pada ujung yang satu sedang ujung lain ditutup torak yang dapat bergeser sepanjang silinder. Berdasarkan siklus operasinya, terdapat dua jenis siklus operasi motor yaitu motor dua langkah dan motor empat langkah.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

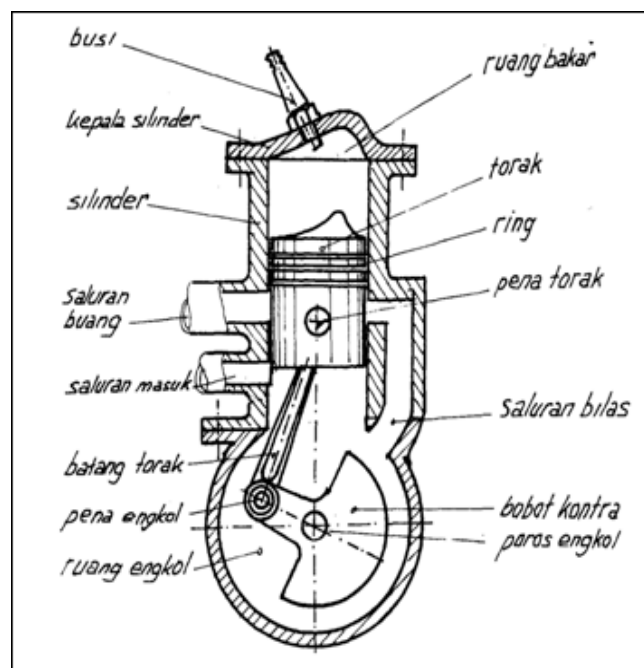
Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a) Memahami dan menjelaskan fungsi dari bagian utama motor bakar,
- b) Menjelaskan tentang perbandingan kompresi,
- c) Memahami dan menjelaskan karakteristik bagian utama motor bakar,
- d) Memahami dan menjelaskan langkah kerja motor.

2. Uraian Materi

a) Bagian-bagian motor bakar dan fungsinya

Motor bakar terdiri atas bagian-bagian yang disebut suku cadang. Suku cadang terdiri atas beberapa komponen, yaitu komponen yang bersifat statis (diam) dan komponen yang bersifat gerak atau bergesek dan bekerja sesuai dengan fungsinya masing-masing. Komponen motor bakar secara umum dapat dilihat pada Gambar 8 (komponen motor empat langkah).



Gambar 8. Potongan Komponen Motor Bensin Empat Langkah

Berdasarkan Gambar 8 di atas berikut adalah penjelasan tentang masing-masing komponen beserta fungsinya, antara lain:

1) Torak (piston)

Torak atau piston adalah bagian motor bakar yang berbentuk silinder yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima tekanan hasil pembakaran pada ruang bakar. Piston terhubung ke poros engkol (*crankshaft*) melalui batang piston (*connecting rod*). Material piston umumnya terbuat dari bahan yang ringan dan tahan tekanan, berupa aluminium yang sudah dicampur bahan tertentu (*aluminium alloy*).

Torak juga merupakan komponen yang meneruskan tenaga dari hasil pembakaran menjadi tenaga mekanik. Pada piston atau torak terdapat cincin torak yang selalu menjadi satu bagian penting dalam motor bakar. Cincin torak adalah cincin yang memisahkan dua bagian, yaitu torak dan silinder. Fungsi cincin torak adalah untuk mempertahankan kerapatan antara torak dan dinding silinder agar tidak ada kebocoran gas dari ruang bakar kedalam bak mesin. Cincin torak juga berfungsi membantu pengontrolan lapisan minyak pelumas di dinding silinder. Cincin torak dibuat dari besi tuang atau baja campuran dan digunakan sebagai penekan ke dinding silinder untuk membentuk suatu perapat (*seal*) antara silinder dan torak. Gambar 9 berikut menunjukkan gambar piston dengan tiga cincin torak.



Gambar 9. Torak

2) Batang torak (*connecting rod*)

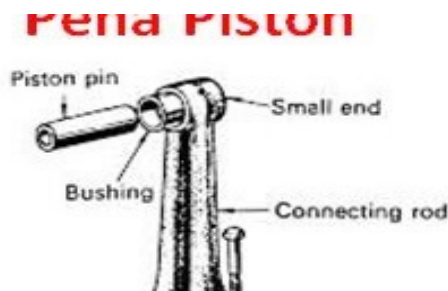
Batang torak berfungsi untuk menghubungkan torak ke poros engkol dan selanjutnya meneruskan tenaga yang dihasilkan oleh torak ke poros engkol. Batang torak merupakan bagian penting yang melakukan proses kerja mengubah gerak naik turun menjadi gerak putar. Pada batang torak terdapat bagian penghubung yang berukuran kecil disebut *small end* dan bagian yang besar yang berhubungan dengan poros engkol disebut *big end*. *Small end* terhubung ke piston menggunakan piston pin dan *big end* menempel pada *crank pin* dengan dilapisi *bearing* di dalamnya. Batang torak dibuat dengan bahan yang sangat ringan namun mempunyai kekuatan untuk meneruskan gaya dorong ke poros engkol. Gambar 10 berikut ini menunjukkan konstruksi batang torak



Gambar 10. Batang Torak

3) Pena torak (*piston pin*)

Pena torak berfungsi sebagai pengikat torak terhadap batang penggerak yang menghubungkan torak dengan bagian ujung yang kecil *small end* pada batang torak. Selain itu, pena torak juga berfungsi sebagai pemindah tenaga torak ke batang penggerak agar gerak bolak-balik dari torak dapat diubah menjadi gerak berputar pada poros engkol. Pena torak terbuat dari bahan baja paduan yang bermutu tinggi agar tahan terhadap beban yang sangat besar. Pena torak dibuat berlubang di dalamnya untuk mengurangi berat yang berlebihan dan kedua ujung ditahan oleh *bushing* pena torak (*piston pin boss*). Pena torak ditunjukkan oleh Gambar 11 di bawah ini.



Gambar 11. Pena Torak dan Bagian Sambungan

4) Cincin torak (*piston ring*)

Torak dilengkapi tiga cincin yang melingkar di sekelilingnya dan membentuk bidang geser yang melawan dinding silinder. Di dekat puncak torak pada umumnya terdapat dua cincin kompresi. Cincin ketiga yang terletak di bawah cincin kompresi adalah cincin minyak yang berfungsi untuk mencegah minyak

pelumas pada dinding silinder masuk ke ruang bakar pada saat langkah kompresi. Cincin torak terbuat dari baja terpasang melingkari kepala torak (*piston*). Cincin torak dan letaknya dapat dilihat pada Gambar 12. Adapun kegunaannya antara lain:

- a) Merapatkan dinding torak dengan silinder;
- b) Mencegah kebocoran kompresi;
- c) Mencegah kebocoran pembakaran;
- d) Menimbulkan isapan motor; dan
- e) Mencegah naiknya oli ke ruang bakar.



Gambar 12. Cincin Torak

5) Poros engkol (*crankshaft*)

Poros putar yang terletak di bagian dasar blok mesin dan ditopang oleh bantalan utama di bak engkol. Poros ini berfungsi mengubah gerak naik turun piston menjadi gerak putar (gerakan bolak-balik torak sebagai akibat tekanan gas pembakaran diubah menjadi gerakan putar dengan perantaraan batang torak). Poros engkol menerima beban yang berat selama beroperasi, maka poros engkol dibuat dari bahan baja karbon khusus yang memiliki daya tahan tinggi. Adapun Gambar 13 berikut menunjukkan gambar poros engkol 1 silinder maupun 4 silinder.



Gambar 13. Poros Engkol (a) Satu Silinder (b) Empat Silinder

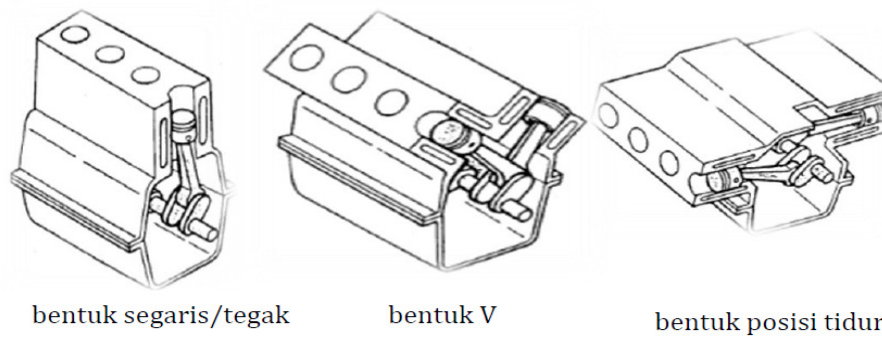
6) Blok silinder

Blok silinder merupakan bagian dasar dari suatu motor penggerak. Bahan pembuatnya adalah besi tuang atau paduan aluminium. Susunan silinder dipasang pada blok silinder. Bagian atas blok silinder ditutup oleh kepala silinder dan di bagian bawah terdapat bak engkol tempat poros engkol bertumpu. Bentuk blok silinder dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Blok Silinder

Bentuk blok silinder menyesuaikan dengan konfigurasi torak. Adapun macam-macam bentuk blok silinder ditampilkan pada Gambar 15.



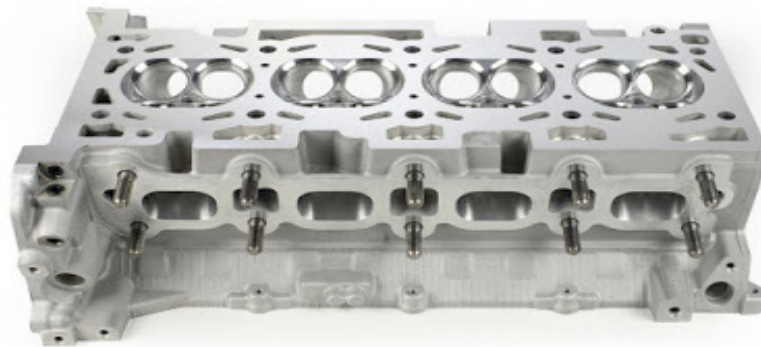
Gambar 15. Macam-Macam Konfigurasi Blok Silinder

7) Kepala silinder (*cylinder head*)

Bagian ini adalah penutup ujung bagian atas silinder yang di bagian bawah terdapat katup-katup dan tempat memasang busi (pada mesin bensin). Kepala silinder terbuat dari besi tuang yang tahan terhadap temperatur dan tekanan yang tinggi selama mesin bekerja.

Fungsi utama kepala silinder adalah menyediakan ruang untuk terjadinya pencampuran bahan bakar dan udara sehingga pembakaran dapat terjadi secara efisien. Oleh karena itu, terdapat lubang berbentuk khusus yang berada di atas setiap silinder.

Kepala silinder juga mempunyai beberapa saluran (*ports*). Saluran masuk adalah saluran lewat campuran bahan bakar dan udara ke dalam ruang pembakaran. Saluran buang adalah saluran pembuangan gas dari dalam ruang pembakaran. Saluran pendingin adalah saluran yang dilalui air pendingin dari radiator. Katup masuk dan buang ditempatkan sebagai penyekat terhadap ruang pembakaran dan saluran buang, pada saat katup-katup berada pada posisi menutup. Bentuk kepala silinder dapat dilihat pada Gambar 16 berikut.



Gambar 16. Kepala Silinder

8) *Packing kepala silinder (cylinder head gasket)*

Packing kepala silinder (*gasket*) berfungsi untuk mencegah kebocoran gas pembakaran, air pendingin, dan oli. Gasket terbuat dari serat aramida (pengganti asbes) dan baja berlaminasi yang berisi lapisan-lapisan logam tipis karena harus tahan panas dan tekanan akibat adanya perubahan suhu. Adapun tampilan *packing* kepala silinder dapat dilihat pada Gambar 17 berikut.



Gambar 17. *Packing* Kepala Silinder

b) Motor dua langkah

Motor dua langkah hanya membutuhkan satu kali putaran poros engkol untuk menyelesaikan satu siklus di dalam silinder. Langkah daya dihasilkan pada setiap putaran poros engkol. Tidak terdapat katup yang beroperasi pada motor dua langkah. Sebagai gantinya, sebagian besar motor dua langkah menggunakan lubang saluran di dinding silinder. Beberapa motor dua langkah menggunakan katup pasif atau kelopak penutup untuk membantu menutup bak engkol setelah

campuran bahan bakar/udara dihisap. Jika seluruh proses pada motor empat langkah berlangsung di atas torak maka motor dua langkah juga memanfaatkan area di bawah torak untuk mempercepat operasi.

Proses kompresi pada motor dua langkah terjadi dua kali setiap putaran. Kompresi pertama terjadi di dalam bak engkol, ketika campuran udara/bahan bakar ditarik ke dalam bak engkol dan selanjutnya dikompresi melalui gerakan engkol dan masuk ke ruang bakar. Kompresi kedua berlangsung di dalam silinder dan ruang bakar hingga dihasilkan tekanan tinggi untuk menyalakan campuran udara/bahan bakar dengan bantuan busi.

Berdasarkan prinsip kerja yang disampaikan di atas dapat disimpulkan bahwa beberapa kelebihan motor dua langkah adalah konstruksinya sederhana sehingga biaya produksi lebih murah dan ringan dan konstruksi mesin yang lebih kecil dan ringkas. Akan tetapi, terdapat beberapa kekurangan yang ditemukan pada motor dua langkah antara lain efisiensi bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan dengan motor empat langkah, emisi bahan bakar lebih tinggi, dan memerlukan oli samping. Karena kekurangan-kekurangan ini, belakangan penggunaan motor dua langkah sangat jauh berkurang. Adapun visualisasi prinsip kerja motor dua langkah dapat dilihat pada Gambar 18 berikut.



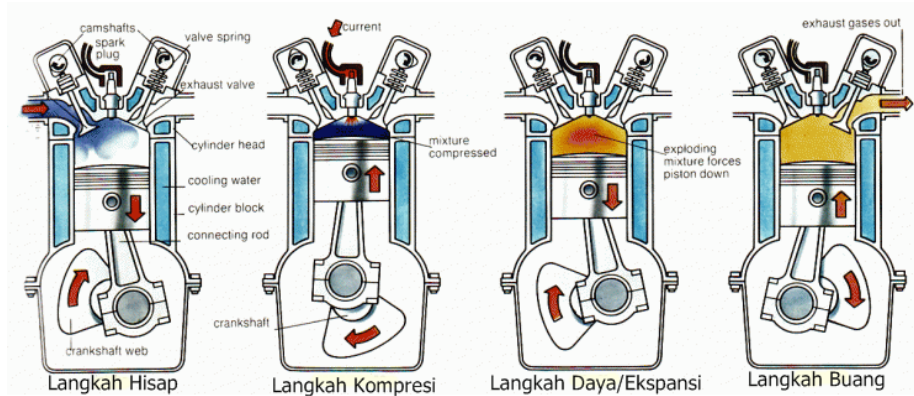
Gambar 18. Prinsip Kerja Motor Dua Langkah (a) Langkah Hisap dan Kompresi

(b) Langkah Daya dan Buang

- 1) **Langkah hisap.** Saat torak bergerak menuju TMA, setengah putaran pertama atau 180° , terjadi kevakuman di ruang engkol dan saluran masuk terbuka. Karena adanya perbedaan tekanan, udara luar dihisap masuk dan bercampur dengan bahan bakar di karburator yang selanjutnya masuk ke ruang engkol.
- 2) **Kompresi pertama.** Saat torak bergerak ke bawah (setengah putaran atau 180°) menutup lubang saluran masuk dan menekan campuran udara/bahan bakar di dalam bak engkol sehingga tekanan meningkat. Saat torak terus bergerak ke bawah, saluran transfer pada dinding silinder terbuka. Campuran bertekanan didesak naik ke atas di atas piston. Pada titik ini, saluran buang di dinding silinder di seberang saluran transfer juga terbuka.
- 3) **Langkah kompresi.** Piston bergerak ke TMA, menutup saluran transfer dan buang dan memampatkan campuran udara/bahan bakar ke dalam ruang bakar.
- 4) **Langkah daya.** Tepat sebelum torak mencapai TMS, busi menyalakan campuran udara/bahan bakar dan tekanan tinggi yang diciptakan mendorong torak ke TMB untuk melakukan langkah daya.
- 5) **Langkah buang.** Saat torak bergerak ke bawah melakukan langkah daya, saluran buang dan campuran yang masuk dari saluran transfer membantu mendorong gas terbakar ke luar dari mesin. Proses ini disebut **pembilasan**.

c) **Motor empat langkah**

Motor empat langkah membutuhkan dua kali putaran poros engkol untuk menyelesaikan satu siklus di dalam silinder. Artinya, setiap silinder membutuhkan empat langkah torak pada dua putaran poros engkol untuk melengkapi siklusnya. Berdasarkan prinsip kerjanya, terdapat beberapa kelebihan yang ditemukan pada motor empat langkah yaitu efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan motor dua langkah, emisi bahan bakar yang lebih rendah, dan biaya perawatan yang lebih rendah dibandingkan motor dua langkah. Kelebihan-kelebihan ini mampu menutupi kekurangan motor empat langkah yang secara konstruksi lebih rumit dibandingkan dengan motor dua langkah. Prinsip kerja motor empat langkah dijelaskan pada Gambar 19 berikut.



Gambar 19. Prinsip Kerja Motor Empat Langkah

- 1) **Langkah hisap.** Langkah ini diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir dengan posisi torak di TMB sehingga menghisap campuran segar ke dalam silinder.
- 2) **Langkah kompresi.** Langkah ketika kedua katup tertutup di mana campuran di dalam silinder dimampatkan dan volumenya diperkecil. Menjelang akhir langkah kompresi, pembakaran diaktifkan dan tekanan silinder naik dengan cepat.
- 3) **Langkah daya** atau langkah ekspansi, diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir di TMB ketika temperature dan tekanan gas yang tinggi mendorong torak ke bawah dan memaksa poros engkol untuk berputar. Ketika torak mendekati TMB, katup buang terbuka untuk mengawali proses buang dan tekanan silinder turun mendekati tekanan buang.
- 4) **Langkah buang.** Langkah ketika sisa gas yang dibakar keluar dari silinder disebabkan tekanan silinder yang lebih tinggi dibandingkan tekanan buang. Gas kemudian didorong keluar oleh torak ketika bergerak ke arah TMA. Ketika torak mendekati TMA, katup masukan terbuka. Sesaat telah TMA, katup buang menutup dan siklus dimulai lagi.

d) **Konsumsi bahan bakar spesifik**

Dalam pengujian motor, konsumsi bahan bakar diukur sebagai laju aliran massa bahan bakar per satuan waktu, . Ukuran bagaimana motor menggunakan bahan bakar yang tersedia secara efisien untuk menghasilkan kerja disebut **konsumsi**

bahan bakar spesifik yang dinyatakan sebagai laju aliran massa bahan bakar per satuan keluaran daya.

Keterangan:

$$sfc = \frac{\dot{m}_{bb}}{W}$$

Keterangan:

$\dot{m}_{bb}$: laju aliran bahan bakar ke dalam motor (g/detik)

W : daya motor (kW)

e) Efisiensi motor

Rasio **kerja** yang dihasilkan per siklus terhadap sejumlah energi **bahan bakar** yang disediakan per siklus yang dapat dilepas dalam proses pembakaran biasanya digunakan untuk menyatakan ukuran **efisiensi motor**. Energi bahan bakar yang disuplai dan dapat dilepaskan oleh pembakaran dinyatakan oleh **massa bahan bakar**, $\dot{m}_{bb}$, yang disuplai ke motor per siklus dikalikan nilai kalor bahan bakar, Q_{HV} . **Nilai kalor** bahan bakar, Q_{HV} , menggambarkan kandungan energi dari bahan bakar. Ukuran dari efisiensi ini disebut **efisiensi konversi bahan bakar**, η_{bb} yang didefinisikan sebagai:

$$\eta_{bb} = \frac{W}{\dot{m}_{bb} Q_{HV}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{bb} Q_{HV}} = \frac{1}{sfc \times Q_{HV}}$$

Atau dengan satuan:

$$\eta_{bb} = \frac{3,600}{sfc(\text{g/kW-jam}) \times Q_{HV}(\text{MJ/kg})}$$

Untuk siklus tunggal satu silinder, efisiensi termal dapat dengan:

$$\eta_{bb} = \frac{W}{\dot{m}_{bb} Q_{HV} \eta_c}$$

Keterangan:

W : kerja pada satu siklus

η_{bb} : efisiensi konversi bahan bakar

$\dot{m}_{bb}$: massa bahan bakar untuk satu siklus

Q_{HV} : nilai kalor bahan bakar

η_c : efisiensi pembakaran

f) Efisiensi termal

Efisiensi pembakaran didefinisikan untuk menyatakan fraksi dari bahan bakar yang terbakar, memiliki nilai 0.95 – 0.98 pada motor yang beroperasi ideal.

$$Q_{masuk} = m_{bb} Q_{HV} \eta_c$$

Untuk kondisi steady,

$$\dot{Q}_{masuk} = \dot{m}_{bb} Q_{HV} \eta_c$$

Dan **efisiensi termal** dinyatakan dengan:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_{masuk}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{masuk}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{bb} Q_{HV} \eta_c} = \frac{\eta_{bb}}{\eta_c}$$

Keterangan:

W : kerja pada satu siklus

$\dot{W}$: daya

η_{bb} : efisiensi konversi bahan bakar

m_{bb} : massa bahan bakar untuk satu siklus

$\dot{m}_{bb}$: laju aliran massa bahan bakar

Q_{HV} : nilai kalor bahan bakar

η_c : efisiensi pembakaran

g) Efisiensi volumetrik

Besar daya dan kinerja yang dapat diperoleh motor tergantung pada jumlah maksimum udara di dalam silinder sepanjang setiap siklus. Semakin banyak udara yang terkandung di dalamnya berarti semakin banyak bahan bakar yang terbakar dan lebih banyak energi yang dapat dikonversi ke keluaran daya. Secara ideal, sebuah motor empat langkah dapat mengisap udara sebesar volume langkah torak (V_d). Akan tetapi, hal ini tidak pernah terjadi dalam kondisi riil karena terbatasnya waktu siklus yang tersedia dan adanya hambatan alir pada sistem masukan sehingga udara yang masuk ke dalam silinder kurang dari jumlah ideal. Massa udara yang masuk ke dalam silinder sebanding dengan kerapatan udara atmosfer dikalikan volume langkah silinder yang harus diolah pada setiap siklus.

Parameter yang digunakan untuk mengukur efektivitas suatu proses isap pada motor adalah **efisiensi volumetrik**, η_v . Efisiensi ini digambarkan sebagai *laju*

aliran volume udara ke dalam sistem masukan dibagi dengan *laju volume yang dipindahkan* oleh torak (volume langkah torak).

$$\eta_v = \frac{m_{ud}}{\rho_{ud} V_L} = \frac{n \dot{m}_{ud}}{\rho_{ud} V_L N}$$

Keterangan:

m_{ud} : massa udara masuk ke dalam silinder untuk 1 siklus

$\dot{m}_{ud}$: aliran udara masuk ke dalam motor dalam keadaan stedi

ρ_{ud} : kerapatan udara diukur pada kondisi atmosferik di luar motor

V_L : volume langkah

N : kecepatan motor

n : jumlah putaran per siklus (=2 untuk motor empat langkah)

Standar tekanan dan temperatur udara sekitar dapat digunakan untuk menentukan kerapatan udara.

$$P_0 (\text{standar}) = 101 \text{ kPa} = 14.7 \text{ psia}$$

$$T_0 (\text{standar}) = 298 \text{ K} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_{ud} = \frac{P_0}{RT_0}$$

Keterangan:

P_0 : tekanan udara sekitar

T_0 : temperatur udara sekitar

R : konstanta gas untuk udara = 0.287 kJ/kg-K

Pada kondisi standar, kerapatan udara, $\eta_{ud} = 1.181 \text{ kg/m}^3$

Luaran motor sangat bergantung dengan kerapatan udara yang diisap motor karena berhubungan dengan suhu dan tekanan atmosfer. Sedangkan tekanan atmosfer dipengaruhi oleh ketinggian terhadap permukaan laut. Jika tekanan udara lebih tinggi dan temperatur lebih rendah, massa udara yang masuk ke dalam silinder akan bertambah. Sebaliknya, pada tekanan udara yang lebih rendah dan temperatur lebih tinggi massa udara yang masuk akan berkurang.

3. Rangkuman

Motor bakar terdiri atas bagian-bagian yang disebut suku cadang. Suku cadang terdiri atas beberapa komponen, yaitu komponen yang bersifat statis (diam) dan komponen yang bersifat gerak atau bergesek dan bekerja sesuai dengan fungsinya masing-masing. Komponen utama motor bakar antara lain:

- a) Torak,
- b) Batang torak,
- c) Pena torak,
- d) Cicin torak,
- e) Poros engkol,
- f) Blok silinder,
- g) Kepala silinder, dan
- h) *Packing* kepala silinder.

Berdasarkan siklus operasi motor maka terbagi menjadi dua jenis yaitu motor dua langkah dan motor empat langkah. Motor dua langkah hanya membutuhkan satu kali putaran poros engkol untuk menyelesaikan satu siklus di dalam silinder. Langkah daya dihasilkan pada setiap putara poros engkol. Tidak terdapat katup yang beroperasi pada motor dua langkah. Sebagai gantinya, sebagian besar motor dua langkah menggunakan lubang saluran di dinding silinder. Sebaliknya, pada motor empat langkah membutuhkan dua kali putaran poros engkol untuk menyelesaikan satu siklus di dalam silinder. Artinya, setiap silinder membutuhkan empat langkah torak pada dua putaran poros engkol untuk melengkapi siklusnya.

Untuk menghitung kinerja motor dapat dilihat nilai efisiensinya. Ada beberapa nilai efisiensi dalam penghitungan tersebut antara lain efisiensi bahan bakar, efisiensi termal, dan efisiensi volumetrik.

4. Soal Latihan

- 1) Jelaskan apa yang dimaksud dengan piston dan fungsinya!
- 2) Apakah komponen motor bakar yang fungsinya menghubungkan torak ke poros engkol?
- 3) Sebutkan kelebihan dan kekurangan motor dua langkah!
- 4) Sebutkan kelebihan dan kekurangan motor empat langkah!
- 5) Jelaskan prinsip kerja motor empat langkah!

5. Kunci Jawaban

- 1) Torak atau piston adalah bagian motor bakar yang berbentuk silinder yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima tekanan hasil pembakaran pada ruang bakar.
- 2) Batang torak.
- 3) Kelebihan motor dua langkah: konstruksi sederhana sehingga biaya produksi lebih murah dan ringan serta konstruksi mesin yang lebih kecil dan ringkas. Adapun kekurangan motor dua langkah adalah efisiensi bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan motor empat langkah, emisi bahan bakar yang lebih tinggi, dan memerlukan oli samping.
- 4) Emisi bahan bakar yang lebih rendah daripada motor dua langkah, efisiensi pembakaran lebih baik, dan perawatan sederhana. Kekurangannya adalah konstruksi yang lebih rumit serta bobot mesin yang lebih besar.
- 5) Prinsip kerja motor empat langkah antara lain:
 - a. **Langkah hisap.** Langkah ini diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir dengan posisi torak di TMB sehingga menghisap campuran segar ke dalam silinder.
 - b. **Langkah kompresi.** Langkah ketika kedua katup tertutup di mana campuran di dalam silinder dimampatkan dan volumenya diperkecil. Menjelang akhir langkah kompresi, pembakaran diaktifkan dan tekanan silinder naik dengan cepat.

- c. **Langkah daya** atau langkah ekspansi, diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir di TMB ketika temperature dan tekanan gas yang tinggi mendorong torak ke bawah dan memaksa poros engkol untuk berputar. Ketika torak mendekati TMB, katup buang terbuka untuk mengawali proses buang dan tekanan silinder turun mendekati tekanan buang.
- d. **Langkah buang.** Langkah ketika sisa gas yang dibakar keluar dari silinder disebabkan tekanan silinder yang lebih tinggi dibandingkan tekanan buang. Gas kemudian didorong keluar oleh torak ketika bergerak ke arah TMA. Ketika torak mendekati TMA, katup masukan terbuka. Sesaat telah TMA, katup buang menutup dan siklus dimulai lagi.

6. Sumber Informasi dan Referensi

Kristanto, Philip. 2015. Motor Bakar Torak: Teori dan Aplikasinya. Yogyakarta: Penerbit Andi

Turns, Stephen R. 2012. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. Boston: McGraw Hill

Williams, Forman A. 1985. Combustion Theory. Massachusetts: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

C. Penilaian

1. **Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
2. **Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
3. **Keterampilan** : Mampu menjelaskan terkait konfigurasi motor bakar, siklus kerja motor bakar dua langkah dan empat langkah.

Kegiatan Pembelajaran 4 :

4. Motor Bakar Bensin

A. Deskripsi

Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, motor bakar dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu motor bakar bensin dan diesel. Mesin bensin sering

disebut dengan mesin Otto, seperti nama penemunya Nikolaus A. Otto yang memproduksi motor empat langkah pada tahun 1876 di Jerman dengan menggunakan siklus yang diusulkan oleh Frenchman Beau de Rochas pada tahun 1862. Pada kebanyakan motor bensin, piston menyelesaikan empat langkah lengkap di dalam silinder dan poros engkol melakukan dua putaran untuk tiap siklus termodinamika. Karena pembakaran pada motor bensin dipicu oleh busi, motor bensin sering disebut dengan motor pengapian percik (*spark ignition engines – SI engines*).

Motor bensin banyak digunakan sebagai motor penggerak untuk mesin-mesin pertanian. Motor penggerak tersebut harganya relatif mahal dan mempunyai umur ekonomis tertentu. Agar motor penggerak tersebut mempunyai umur ekonomis sesuai dengan yang diharapkan, maka selain harus mengetahui cara mengoperasikan dengan benar, juga diperlukan perawatan pada motor penggerak tersebut.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Memahami dan menjelaskan definisi motor bensin,
- b. Memahami dan menjelaskan kerja motor bensin dua langkah dan empat langkah.

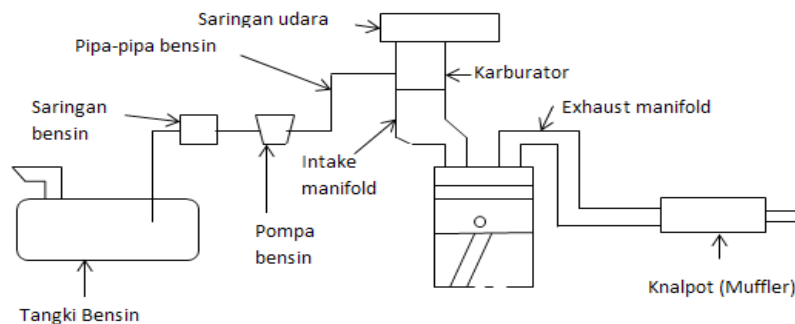
2. Uraian Materi

Motor bensin memiliki karakteristik yang khas sehingga banyak digunakan untuk kendaraan pribadi dan kendaraan kecil yang tidak memerlukan torsi yang besar, antara lain:

- 1) Kecepatannya tinggi,
- 2) Mudah dalam pengoperasiannya,
- 3) Pembakarannya sempurna,
- 4) Digunakan pada mobil penumpang,

- 5) Kompresi rendah dibanding mesin solar,
- 6) Konstruksi tidak sekuat mesin solar, hal ini karena mesin bensin cenderung lebih sedikit getarannya,
- 7) Hasil pembakaran mesin bensin lebih ramah terhadap lingkungan,
- 8) Yang dikompresikan berupa bahan bakar dan udara
- 9) Menggunakan busi sebagai media untuk membakar campuran udara dan bahan bakar di dalam silinder sebagai loncatan bunga api.

Berikut ini adalah sistem pembakaran pada motor bensin. Secara ringkas, skemanya ditampilkan pada Gambar 20 berikut.



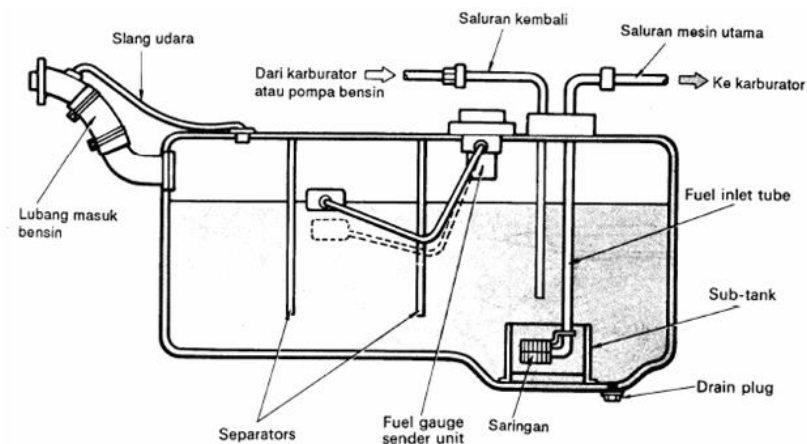
Gambar 20. Skema Sistem Bahan Bakar Motor Bensin

a) Tangki bahan bakar

Tangki bahan bakar umumnya ditempatkan di bagian belakang/bawah kendaraan. Bahan bakar diisap melalui pipa inlet bahan bakar yang ditempatkan 2 – 3 cm di bagian terendah tangki.

Bila tangki bensin tidak diisi penuh, uap di dalam tangki akan mengembun pada dinding tangki. Karena massa air lebih berat daripada bensin maka air akan turun ke bagian bawah tangki. Jika air yang timbul semakin banyak maka akan menyebabkan kesulitan penyalaan motor. Bila pengembunan pada tangki sedikit maka akan timbul karat. Oleh karena itu, penting untuk menjaga volume bahan bakar di dalam tangki. Pembersihan tangki secara berkala diperlukan untuk

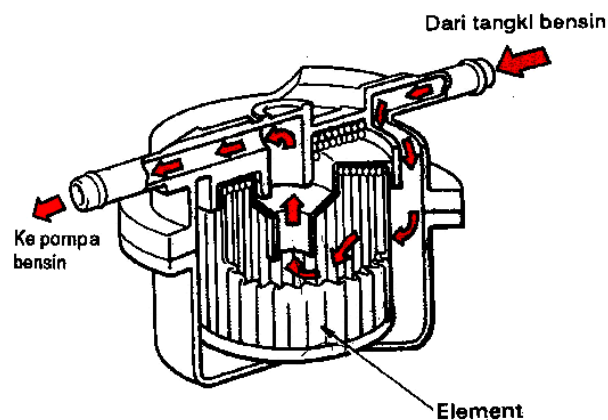
mencegah korosi dan endapan. Tangki bahan bakar dan komponennya disajikan pada Gambar 21 berikut.



Gambar 21. Tangki Bahan Bakar dan Komponennya

b) Saringan bahan bakar

Saringan bahan bakar berfungsi untuk menyaring kotoran dan air yang dibawa oleh bahan bakar. Oleh sebab itu, pembersihan saringan bahan bakar secara berkala perlu dilakukan. Tujuannya adalah untuk menjaga aliran bahan bakar tetap konstan. Kegiatan penggantian bahkan perlu dilakukan jika kondisi saringan sudah terlalu kotor. Saringan bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Saringan Bahan Bakar

Saringan bahan bakar dapat ditempatkan di tangki bahan bakar, di saluran bahan bakar tepat setelah pompa bahan bakar elektrik, di dalam pompa bahan bakar atau di saluran bahan bakar sebelum karburator atau injektor bahan bakar.

c) Pompa bahan bakar

Posisi tangki bahan bakar pada umumnya lebih rendah daripada karburator sehingga dibutuhkan pompa untuk menyalurkan bahan bakar ke karburator. Terdapat dua jenis pompa yaitu mekanik dan elektrik. Pompa mekanik digerakkan oleh mesin, sedangkan pompa bahan bakar elektrik digerakkan dengan arus listrik.

d) *Charcoal canister*

Fungsi *charcoal canister* adalah untuk menampung sementara uap bensin yang berasal dari ruang pelampung pada karburator dan uap bensin yang dikeluarkan dari saluran emisi pada saat tekanan di dalam tangki naik karena meningkatnya temperatur sehingga uap bensin tidak terbuang sia-sia keluar. Uap bensin yang ditampung kemudian dikirim langsung ke manifold isap kemudian ke ruang bakar untuk dibakar pada saat mesin menyala.

e) Sistem bahan bakar motor bensin (karburator)

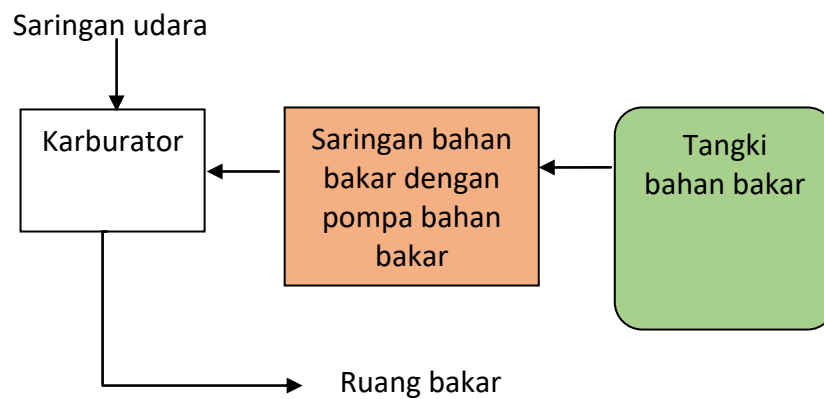
Pencampuran bahan bakar dengan udara secara otomatis dengan perbandingan dan kondisi tertentu diatur oleh komponen yang disebut karburator atau injektor bahan bakar.

Karburator mengatur pemasukan, pencampuran, atomisasi bahan bakar ke dalam arus udara sehingga dihasilkan rasio campuran yang sesuai dengan kondisi beban dan kecepatan putar poros engkol. Jumlah bahan bakar yang dapat terbakar bergantung pada jumlah udara yang ada di dalam silinder pada saat langkah isap.

Dalam operasinya, karburator berfungsi untuk:

- 1) Mengatur jumlah aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar,
- 2) Menyalurkan bahan bakar dengan jumlah yang tepat sesuai aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar sehingga rasio bahan bakar/udara tetap terjaga,
- 3) Mencampur udara dan bahan bakar dengan rata dan sempurna, dan
- 4) Mengabutkan campuran udara-bahan bakar.

Siklus aliran bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 23 berikut ini.

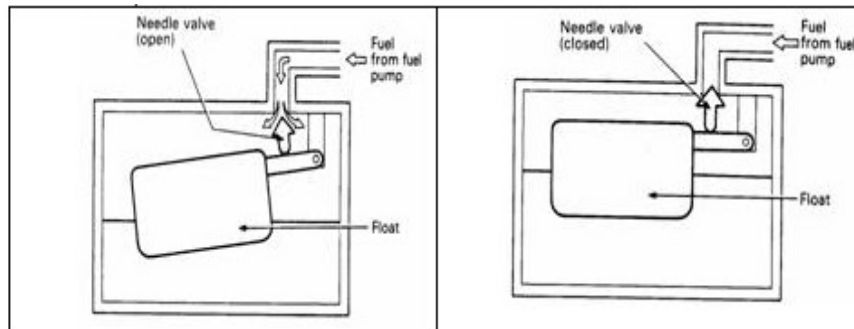


Gambar 23. Siklus Aliran Bahan Bakar

Karburator dilengkapi dengan beberapa komponen, antara lain:

- i. Katup pengatur gas (*throttle*) yang berfungsi untuk mengatur jumlah campuran bahan bakar dan udara yang melewati karburator ke ruang pembakaran guna mengatur kecepatan putaran mesin motor. Katup ini dihubungkan dengan tombol atau tuas gas.
- ii. Katup udara (*choke valve*), berfungsi untuk membuka atau menutup saluran udara yang akan masuk ke ruang bakar yang terletak di antara saringan udara dan venturi. Apabila katup ini tertutup maka udara yang mengalir ke karburator sedikit. Akibatnya, campuran bahan bakar lebih kaya (banyak). Efeknya adalah pembakaran pada saat motor dingin lebih mudah. Setelah motor menyala, katup harus dibuka berangsur-angsur sehingga campuran bahan bakar dan udara normal kembali.
- iii. *Sprayer*, berfungsi untuk mengalirkan bahan bakar yang keluar dari ruang apung menuju ke venturi pada karburator untuk proses pembakaran. Kecepatan motor dapat diatur sesuai kebutuhan melalui pengaturan katup pengatur gas dan sprayer.
- iv. Pelampung, berfungsi sebagai pengatur level (ketinggian) bahan bakar secara otomatis sesuai dengan kondisi suplai bahan bakar. Apabila bak pelampung kosong maka pelampung akan turun dan jarum pelampung terbuka. Hal ini

menyebabkan bahan bakar masuk ke ruang apung. Jika pelampung naik maka jarum pelampung menutup lubang pemasukan, sehingga bahan bakar dari tangki berhenti mengalir. Mekanisme kerja pelampung dapat dilihat pada Gambar 24 berikut.



Gambar 24. Mekanisme Kerja Pelampung

- v. Sistem penyalaan adalah salah satu sistem pada motor bensin yang sangat penting. Sistem penyalaan ini erat hubungannya dengan tenaga (daya) yang dihasilkan oleh suatu mesin. Apabila sistem tidak bekerja dengan baik dan tepat maka dapat mengganggu kelancaran pembakaran sehingga tenaga yang dihasilkan oleh mesin berkurang. Salah satu syarat mesin dapat menyala adalah adanya panas. Pada mesin bensin, panas yang dihasilkan berasal dari percikan api busi dan yang mengaturnya disebut dengan sistem pengapian.

Sistem penyalaan motor bensin ada dua macam yaitu sistem baterai dan magnet. Kedua sistem ini mempunyai prinsip dan tujuan yang sama yaitu sama-sama menggunakan arus listrik dan tujuannya untuk membangkitkan tegangan listrik yang tinggi yang memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik (elektron) di antara kedua ujung kutub busi, tinggi tegangan yang dihasilkan mencapai 10,000 – 12,000 V. Perbedaan kedua sistem ini terletak pada sumber dari arus listrik yang dipakai untuk penyalaan. Pada sistem baterai, sumber arus listrik berasal dari baterai, sedangkan pada sistem magnet, sumber arus listrik berasal dari generator AC.

Komponen-komponen untuk menghasilkan bunga api antara lain:

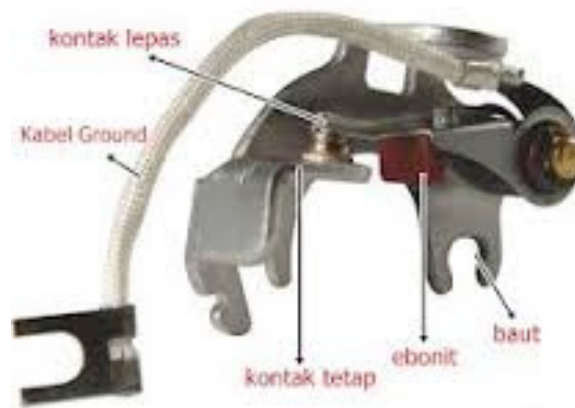
- (a) Koil, berfungsi untuk mengubah tegangan rendah baterai (12 V) menjadi tegangan tinggi (10,000 – 12,000 V) agar menghasilkan loncatan bunga api

pada busi. Arus listrik yang datang dari baterai ataupun dari generator AC, akan masuk ke dalam koil, arus ini mempunyai tegangan yang rendah dan oleh koil tegangan ini akan dinaikkan sampai mencapai tegangan kira-kira 10,000 – 12,000 volt. Dalam koil terdapat gulungan primer dan sekunder yang dililitkan pada besi pelat tipis yang bertumpuk, gulungan primer ini mempunyai kawat yang dililitkan dengan diameter 0.6 - 0.9 mm. Jumlah lilitannya sebanyak 200 kali sedang gulungan sekunder mempunyai lilitan kawat dengan diameter 0.05 - 0.08 mm dengan jumlah lilitan sebanyak 20,000 kali. Perbedaan jumlah gulungan pada kumparan primer dan sekunder akan memunculkan tegangan kira-kira 10,000 volt. Arus dengan tegangan tinggi ini timbul akibat terputus-putusnya aliran arus pada kumparan primer yang mengakibatkan tegangan tinggi pada kumparan sekunder. Hilangnya medan magnet ini terjadi pada saat terputusnya arus listrik pada kumparan primer maka dibutuhkan suatu saklar “pemutus arus” yang disebut *platina*. Gambar koil dapat dilihat pada Gambar 25 berikut.



Gambar 25. Koil

- (b) Pemutus arus (*platina/contact breaker*), berfungsi sebagai saklar pada kumparan primer dari koil penyalan yang berfungsi untuk memutus dan menyambungkan arus yang mengalir ke kumparan primer agar terjadi tegangan induksi pada kumparan sekunder. Bekerjanya platina ini diatur oleh poros kem sehingga waktu atau saat penyalan dari campuran gas dan bahan bakar dalam silinder dapat diatur menurut ketentuan yang telah ditetapkan. Platina di awal membuka, akan timbul bunga api sebagai penyebab cepat habisnya lapisan platina. Untuk menghindari hal ini maka digunakan suatu alat peredam/pengaman yang disebut kondensator. Komponen platina dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Platina

- (c) Kondensator, berfungsi untuk mencegah terjadinya loncatan bunga api listrik pada platina dengan cara menyerap arus induksi. Menurut sifatnya, kondensator dapat menyimpan sejumlah muatan listrik sesuai kapasitas dan dalam waktu yang tertentu. Oleh karena itu, kondensator dapat digunakan sebagai peredam arus listrik ekstra yang timbul akibat adanya tegangan induksi dari pada gulungan primer yang dapat menimbulkan bunga api listrik pada platina. Kondensator dibuat dari kertas isolasi dan kertas perak yang digulung bersama-sama. Kondensator disajikan pada Gambar 27.



Gambar 27. Kondensator

- (d) Busi (*spark plug*), adalah suatu alat yang digunakan untuk meloncatkan bunga api listrik di dalam silinder ruang bakar. Bunga api listrik ini diloncatkan dengan perbedaan tegangan 10,000 V di antara kedua kutub elektroda dari busi. Karena busi mengalami tekanan, temperatur tinggi, dan getaran yang keras sekali maka busi dibuat dari bahan-bahan yang dapat mengatasi masalah

tersebut. Pemakaian tipe busi untuk tiap mesin ditentukan oleh pabrik pembuat mesin tersebut. Gambar 28 menyajikan gambar busi.



Gambar 28. Busi

3. Rangkuman

Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, motor bakar dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu motor bakar bensin dan diesel. Mesin bensin sering disebut dengan mesin Otto, seperti nama penemunya Nikolaus A. Otto yang memproduksi motor empat langkah pada tahun 1876 di Jerman dengan menggunakan siklus yang diusulkan oleh Frenchman Beau de Rochas pada tahun 1862. Pada kebanyakan motor bensin, piston menyelesaikan empat langkah lengkap di dalam silinder dan poros engkol melakukan dua putaran untuk tiap siklus termodinamika. Karena pembakaran pada motor bensin dipicu oleh busi, motor bensin sering disebut dengan motor pengapian percik (*spark ignition engines*).

Motor bensin banyak digunakan sebagai motor penggerak untuk mesin-mesin pertanian. Motor penggerak tersebut harganya relatif mahal dan mempunyai umur ekonomis tertentu. Sistem bahan bakar pada motor bensin dibantu oleh komponen-komponen antara lain tangki bahan bakar, saringan bahan bakar, pompa bahan bakar, *charcoal canister*, dan karburator. Adapun komponen-komponen untuk menghasilkan bunga api antara lain koil, pemutus arus, kondensator, dan busi.

4. Soal Latihan

- 1) Sebutkan dan jelaskan fungsi saringan bahan bakar!
- 2) Mengapa pembersihan saringan bahan bakar perlu dilakukan?
- 3) Bagaimana pencampuran bahan bakar dan udara dapat terjadi? Jelaskan!
- 4) Sebutkan dan jelaskan komponen-komponen yang melengkapi karburator!
- 5) Jelaskan mengapa sistem penyalan penting pada motor bensin!

5. Kunci Jawaban

- 1) Saringan bahan bakar berfungsi untuk menyaring kotoran dan air yang dibawa oleh bahan bakar.
- 2) Karena fungsi saringan bahan bakar adalah untuk menyaring kotoran dan air yang terbawa di dalam bahan bakar maka perlu dilakukan pembersihan untuk menjaga aliran bahan bakar tetap konstan.
- 3) Pencampuran bahan bakar dengan udara secara otomatis dengan perbandingan dan kondisi tertentu diatur oleh karburator. Karburator mengatur pemasukan, pencampuran, atomisasi bahan bakar ke dalam arus udara sehingga dihasilkan rasio campuran yang sesuai dengan kondisi beban dan kecepatan putar poros engkol. Jumlah bahan bakar yang dapat terbakar bergantung pada jumlah udara yang ada di dalam silinder pada saat langkah isap.
- 4) Komponen-komponen yang melengkapi kerja karburator antara lain:
 - a) Katup pengatur gas (*throttle*) yang berfungsi untuk mengatur jumlah campuran bahan bakar dan udara yang melewati karburator ke ruang pembakaran guna mengatur kecepatan putaran mesin motor.
 - b) Katup udara (*choke valve*), berfungsi untuk membuka atau menutup saluran udara yang akan masuk ke ruang bakar yang terletak di antara saringan udara dan *venturi*
 - c) Sprayer, berfungsi untuk mengalirkan bahan bakar yang keluar dari ruang apung menuju ke *venturi* pada karburator untuk proses pembakaran.

Kecepatan motor dapat diatur sesuai kebutuhan melalui pengaturan katup pengatur gas dan *sprayer*.

- d) Pelampung, berfungsi sebagai pengatur level (ketinggian) bahan bakar secara otomatis sesuai dengan kondisi suplai bahan bakar.
- 5) Pembakaran motor bensin dipicu oleh percikan api busi. Oleh karena itu, sistem penyalan merupakan salah satu sistem yang sangat penting pada motor bensin. Sistem penyalan ini erat hubungannya dengan tenaga (daya) yang dihasilkan oleh suatu mesin. Apabila sistem tidak bekerja dengan baik dan tepat maka dapat mengganggu kelancaran pembakaran sehingga tenaga yang dihasilkan oleh mesin berkurang.

6. Sumber Informasi dan Referensi

Pulkrabek, Willard W. 2013. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Edinburgh: Pearson

SAE. Engineering Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Net Power Rating. SAE J1349. Society of Automotive Engineers. 2011.

Stone, Richard dan Jeffrey K. Ball. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals*. Warrendale: SAE International

_____. 1992. *Introduction to Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Hampshire: The MacMillan Publishing LTD

Turns, Stephen R. 2012. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Boston: McGraw Hill

Williams, Forman A. 1985. *Combustion Theory*. Massachusetts: The Benjamis/Cummings Publishing Company, Inc.

C. Penilaian

1. **Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
2. **Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
3. **Keterampilan** : Mampu menjelaskan terkait cara kerja motor bensin, proses pembakaran yang terjadi pada motor bensin

Kegiatan Pembelajaran 5 :

5. Motor Bakar Diesel

A. Deskripsi

Mesin diesel ditemukan oleh Rudolph Diesel pada tahun 1890-an. Perbedaan utama antara motor bensin dan motor diesel adalah pada sistem penyalanyaannya. Jika pada motor bensin dipicu oleh percikan bunga api karena busi maka pada motor diesel disebabkan oleh bahan bakar yang bereaksi dengan udara murni yang dimampatkan. Motor diesel sering disebut motor penyalan kompresi (*compression ignition engines – CI engines*).

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

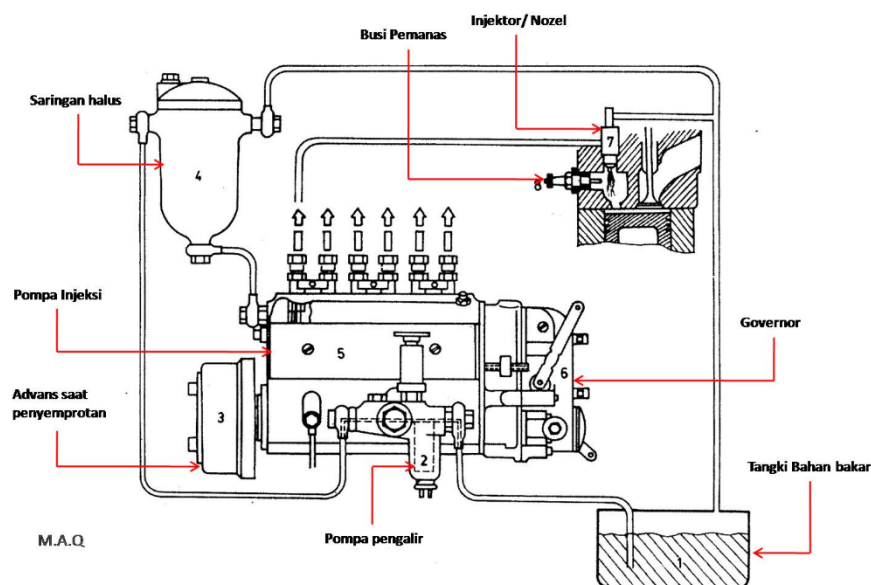
Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Memahami dan menjelaskan definisi motor diesel,
- b. Memahami dan menjelaskan kerja motor diesel dua langkah dan empat langkah

2. Uraian Materi

Motor diesel adalah motor yang dalam proses penyalanyaannya terjadi karena udara murni dikompresi sehingga suhunya naik dan bertemu dengan kabut solar dan akhirnya terbakar. Untuk diesel *indirect* menggunakan panas kompresi yang diperoleh dari pemijar (pemanas) yang dipasang di ruang pembakaran. Berbeda dengan motor bensin, motor diesel tidak menggunakan busi sebagai pemicu penyalan bahan bakar yaitu dengan adanya percikan bunga api pada busi. Pada

motor diesel, udara masukan oleh torak ke dalam ruang bakar berupa udara murni. Udara tersebut kemudian dikompresi hingga mencapai suhu dan tekanan tertentu. Pada saat bersamaan dengan gerakan torak menuju titik mati atas (TMA), bahan bakar solar diinjeksi (disemprotkan) ke dalam ruang bakar melalui sebuah *nozzle* melalui pipa tekanan tinggi yang dipompa oleh sebuah injektor dan terjadilah ledakan atau usaha untuk menggerakkan poros engkol. Komponen yang turut membantu terjadinya proses pembakaran dalam ruang bakar antara lain injektor dan pompa injeksi. Proses terjadinya ledakan akibat proses tersebut disebut *self-combustion engine* (pembakaran sendiri). Skema sistem bahan bakar motor diesel dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Skema Sistem Bahan Bakar Motor Diesel

a) Sistem bahan bakar

Sistem bahan bakar atau dikenal dengan istilah injeksi pada motor diesel. Sistem injeksi bahan bakar yang baik dan tepat akan menghasilkan tenaga mesin yang optimal. Sebaliknya sistem injeksi bahan bakar yang kurang baik dan kurang tepat dapat menyebabkan tenaga mesin diesel kurang optimal. Adapun diagram alir sistem bahan bakar diesel disajikan pada Gambar 30 berikut.



Gambar 30. Diagram Alir Bahan Bakar

Sistem injeksi bahan bakar mesin diesel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30 mencakup rangkaian komponen-komponen yang berhubungan dengan bahan bakar, berfungsi mengisap bahan bakar dari tangki bahan bakar, memompa bahan bakar sampai bahan bakar tersebut diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk memperoleh tenaga. Fungsi sistem injeksi bahan bakar diesel, yaitu:

- (1) Menyimpan bahan bakar,
- (2) Menyaring bahan bakar,
- (3) Memompa atau menginjeksi bahan bakar ke ruang silinder mesin,
- (4) Mengabutkan bahan bakar ke dalam ruang bakar silinder mesin,
- (5) Mengatur kecepatan motor sesuai dengan bebannya melalui pengaturan penyaluran bahan bakar,
- (6) Mengembalikan kelebihan bahan bakar ke dalam tangki bahan bakar.

Sistem injeksi bahan bakar mesin diesel harus memenuhi syarat antara lain:

- (1) Memberikan bahan bakar sesuai dengan jumlah yang ditentukan. Sistem injeksi bahan bakar harus setiap saat tertentu memberikan sejumlah tertentu bahan bakar ke tiap-tiap silinder mesin diesel,
- (2) Menepatan saat penginjeksian bahan bakar. Bahan bakar harus diinjeksikan ke dalam silinder tepat pada saat kemungkinan mesin diesel mampu menghasilkan tenaga yang maksimum. Bahan bakar yang diinjeksikan terlalu cepat atau terlalu lambat selama langkah usaha menyebabkan terjadinya kerugian tenaga,

- (3) Mengendalikan kecepatan pengiriman bahan bakar. Kerja mesin diesel yang halus pada tiap-tiap silinder tergantung pada lama waktu yang diperlukan untuk menginjeksikan bahan bakar. Kecepatan mesin yang lebih tinggi harus dicapai dengan pemasukan bahan bakar yang lebih cepat,
- (4) Mengabutkan bahan bakar. Bahan bakar harus memenuhi campuran yang tepat dengan udara untuk pembakaran yang sempurna. Dalam hal ini bahan bakar harus dikabutkan menjadi partikel-partikel yang halus. Penginjeksian bahan bakar ke dalam silinder harus tepat baik jumlah maupun waktu.

Komponen-komponen sistem injeksi bahan bakar mesin diesel antara lain:

(1) Tangki bahan bakar

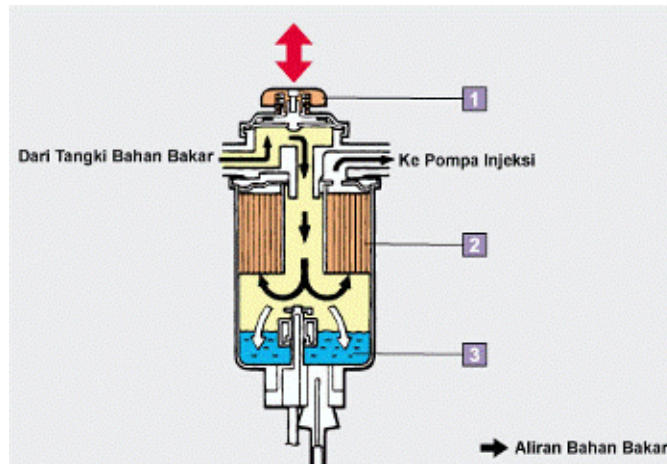
Tangki bahan bakar berfungsi menyimpan atau menampung bahan bakar. Kapasitas tangki harus cukup untuk suatu jarak tempuh tertentu atau cukup untuk digunakan dalam jangka waktu tertentu. Bentuk dan ukuran tangki tergantung pada ketersediaan tempat serta kapasitas yang dikehendaki. Tangki bahan bakar harus tertutup untuk mencegah masuknya kotoran, mempunyai lubang pernafasan (*ventilation*).

(2) Pompa penyalur bahan bakar

Pompa penyalur bahan bakar berfungsi untuk mengalirkan bahan bakar dengan cara memompa bahan bakar dari tangki bahan bakar dan mengalirkannya ke pompa injeksi bahan bakar.

(3) Saringan bahan bakar

Saringan bahan bakar biasanya ada dua buah, yaitu pada bagian sebelum pompa penyalur yang dilengkapi dengan pemisah air. Fungsi komponen ini untuk membersihkan bahan bakar solar dari kotoran-kotoran yang terbawa pada saat pengisian di tangki bahan bakar, dan untuk menjaga kualitas bahan bakar agar selalu bersih dan tidak menghambat aliran bahan bakar. Gambar 31 berikut ini menunjukkan gambar saringan bahan bakar.



Gambar 31. Saringan Bahan Bakar

(4) Pompa injeksi bahan bakar

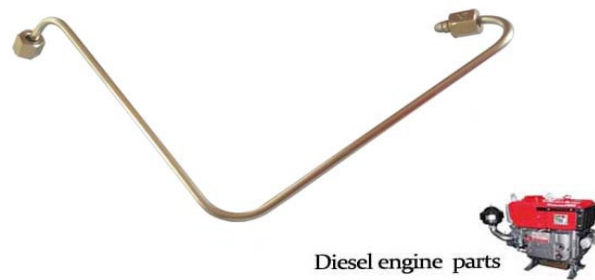
Pompa injeksi bahan bakar berfungsi untuk mensuplai bahan bakar ke ruang bakar melalui *nozzle* dengan tekanan tinggi. bahan bakar yang diinjeksikan dengan tekanan tinggi tersebut akan membentuk kabut sehingga mudah bercampur dengan udara. Pompa injeksi untuk mesin diesel dapat dilihat pada Gambar 32.



Gambar 32. Pompa Injeksi Bahan Bakar

(5) Pipa tekanan tinggi

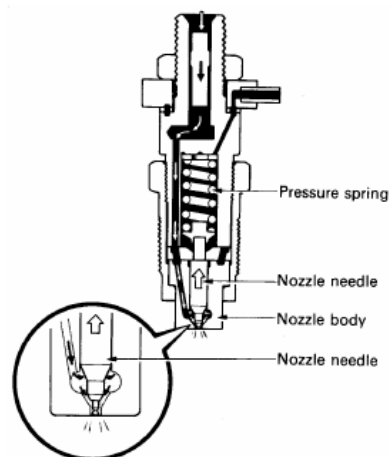
Pipa tekanan tinggi berfungsi sebagai saluran bahan bakar untuk mengalirkan bahan bakar bertekanan tinggi dari pompa injeksi ke *nozzle*. Pipa tekanan tinggi terbuat dari bahan baja. Pipa tekanan tinggi dapat dilihat pada Gambar 33.



Gambar 33. Pipa Tekanan Tinggi

(6) Pengabut (*nozzle*)

Pengabut berfungsi untuk mengabutkan bahan bakar sehingga mudah bercampur dengan oksigen (yang terdapat di udara yang diisap) dan terbakar dalam silinder. Konfigurasi pengabut dapat dilihat pada Gambar 34.



Gambar 34. Pengabut

(7) Governor

Komponen ini terpasang di bagian belakang pompa injeksi. Fungsinya adalah untuk mengatur jumlah injeksi bahan bakar sesuai beban motor.

b) Perbandingan motor bensin dan motor diesel

Selain perbedaan bahan bakar dan sistem penyalan yang digunakan, Tabel 1 berikut menampilkan perbandingan motor bensin dan motor diesel.

Tabel 1. Perbandingan Motor Diesel dan Motor Bensin

Langkah kerja	Motor diesel	Motor bensin
Langkah isap	Hanya udara murni yang diisap masuk ke silinder	Campuran udara dan bahan bakar diisap ke silinder
Langkah kompresi	Piston memampatkan udara murni	Piston memampatkan campuran udara dan bahan bakar
Langkah usaha	10 derajat sebelum TMA terjadi semprotan solar oleh nozzle sehingga menghasilkan tenaga	10 derajat sebelum TMA terjadi loncatan api busi dan menghasilkan tenaga
Langkah buang	Piston mendorong gas buang keluar dari silinder	Piston mendorong gas buang keluar dari silinder
Pengaturan luaran tenaga	Tenaga diatur oleh banyaknya semprotan solar	Tenaga diatur oleh banyaknya campuran udara bahan bakar yang masuk

3. Rangkuman

Motor diesel adalah motor yang dalam proses penyalanya terjadi karena udara murni dikompresi sehingga suhunya naik dan bertemu dengan kabut solar dan akhirnya terbakar. Untuk diesel *indirect* menggunakan panas kompresi yang diperoleh dari pemijar (pemanas) yang dipasang di ruang pembakaran. Berbeda dengan motor bensin, motor diesel tidak menggunakan busi sebagai pemacu penyalan bahan bakar yaitu dengan adanya percikan bunga api pada busi. Pada motor diesel, udara masukan oleh torak ke dalam ruang bakar berupa udara murni. Udara tersebut kemudian dikompresi hingga mencapai suhu dan tekanan tertentu. Pada saat bersamaan dengan gerakan torak menuju titik mati atas (TMA), bahan bakar solar diinjeksi (disemprotkan) ke dalam ruang bakar melalui sebuah nozzle melalui pipa tekanan tinggi yang dipompa oleh sebuah injektor dan terjadilah ledakan atau usaha untuk menggerakkan poros engkol. Komponen yang turut membantu terjadinya proses pembakaran dalam ruang bakar antara lain injektor dan pompa injeksi. Proses terjadinya ledakan akibat proses tersebut disebut *self cumbustion engine* (pembakaran sendiri).

Sistem bahan bakar atau dikenal dengan istilah injeksi pada motor diesel. Sistem injeksi bahan bakar yang baik dan tepat akan menghasilkan tenaga mesin yang optimal. Sebaliknya sistem injeksi bahan bakar yang kurang baik dan kurang tepat dapat menyebabkan tenaga mesin diesel kurang optimal. Sistem injeksi bahan bakar mesin diesel mencakup rangkaian komponen-komponen yang berhubungan dengan bahan bakar, berfungsi mengisap bahan bakar dari tangki bahan bakar, memompa bahan bakar sampai bahan bakar tersebut diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk memperoleh tenaga. Fungsi sistem injeksi bahan bakar diesel, yaitu:

- (1) Menyimpan bahan bakar,
- (2) Menyaring bahan bakar,
- (3) Memompa atau menginjeksi bahan bakar ke ruang silinder mesin,
- (4) Mengabutkan bahan bakar ke dalam ruang bakar silinder mesin,
- (5) Mengatur kecepatan motor sesuai dengan bebannya melalui pengaturan penyaluran bahan bakar,
- (6) Mengembalikan kelebihan bahan bakar ke dalam tangki bahan bakar

Komponen-komponen sistem injeksi bahan bakar diesel antara lain tangki bahan bakar, pompa penyalur bahan bakar, saringan bahan bakar, pompa injeksi bahan bakar, pipa tekanan tinggi, pengabut, dan governor.

4. Soal Latihan

- 1) Jelaskan bagaimana proses penyalaan pada motor diesel!
- 2) Jelaskan fungsi pompa injeksi bahan bakar!
- 3) Apa saja syarat sistem injeksi bahan bakar mesin diesel?
- 4) Jelaskan fungsi pompa penyalur bahan bakar!
- 5) Jelaskan fungsi dari pipa tekanan tinggi!

5. Kunci Jawaban

- 1) Motor diesel adalah motor yang dalam proses penyalaannya terjadi karena udara murni dikompresi sehingga suhunya naik dan bertemu dengan kabut

solar dan akhirnya terbakar. Untuk diesel *indirect* menggunakan panas kompresi yang diperoleh dari pemijar (pemanas) yang dipasang di ruang pembakaran. Berbeda dengan motor bensin, motor diesel tidak menggunakan busi sebagai pemacu penyalan bahan bakar yaitu dengan adanya percikan bunga api pada busi. Pada motor diesel, udara masukan oleh torak ke dalam ruang bakar berupa udara murni. Udara tersebut kemudian dikompresi hingga mencapai suhu dan tekanan tertentu. Pada saat bersamaan dengan gerakan torak menuju titik mati atas (TMA), bahan bakar solar diinjeksi (disemprotkan) ke dalam ruang bakar melalui sebuah *nozzle* melalui pipa tekanan tinggi yang dipompa oleh sebuah injektor dan terjadilah ledakan atau usaha untuk menggerakkan poros engkol.

- 2) Pompa injeksi bahan bakar berfungsi untuk mensuplai bahan bakar ke ruang bakar melalui *nozzle* dengan tekanan tinggi. bahan bakar yang diinjeksikan dengan tekanan tinggi tersebut akan membentuk kabut sehingga mudah bercampur dengan udara.
- 3) Syarat sistem injeksi bahan bakar mesin diesel yaitu:
 - a. Memberikan bahan bakar sesuai dengan jumlah yang ditentukan. Sistem injeksi bahan bakar harus setiap saat tertentu memberikan sejumlah tertentu bahan bakar ke tiap-tiap silinder mesin diesel,
 - b. Menepatan saat penginjeksian bahan bakar. Bahan bakar harus diinjeksikan ke dalam silinder tepat pada saat kemungkinan mesin diesel mampu menghasilkan tenaga yang maksimum. Bahan bakar yang diinjeksikan terlalu cepat atau terlalu lambat selama langkah usaha menyebabkan terjadinya kerugian tenaga,
 - c. Mengendalikan kecepatan pengiriman bahan bakar. Kerja mesin diesel yang halus pada tiap-tiap silinder tergantung pada lama waktu yang diperlukan untuk menginjeksikan bahan bakar. Kecepatan mesin yang lebih tinggi harus dicapai dengan pemasukan bahan bakar yang lebih cepat,

- d. Mengabutkan bahan bakar. Bahan bakar harus memenuhi campuran yang tepat dengan udara untuk pembakaran yang sempurna. Dalam hal ini bahan bakar harus dikabutkan menjadi partikel-partikel yang halus. Penginjeksian bahan bakar ke dalam silinder harus tepat baik jumlah maupun waktu.
- 4) Pompa penyalur bahan bakar berfungsi untuk mengalirkan bahan bakar dengan cara memompa bahan bakar dari tangki bahan bakar dan mengalirkannya ke pompa injeksi bahan bakar.
- 5) Pipa tekanan tinggi berfungsi sebagai saluran bahan bakar untuk mengalirkan bahan bakar bertekanan tinggi dari pompa injeksi ke nozzle. Pipa tekanan tinggi terbuat dari bahan baja.

6. Sumber Informasi dan Referensi

Pulkrabek, Willard W. 2013. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Edinburgh: Pearson

SAE. Engineering Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Net Power Rating. SAE J1349. Society of Automotive Engineers. 2011.

Stone, Richard dan Jeffrey K. Ball. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals*. Warrendale: SAE International

_____. 1992. *Introduction to Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Hampshire: The MacMillan Publishing LTD

Turns, Stephen R. 2012. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Boston: McGraw Hill

Williams, Forman A. 1985. *Combustion Theory*. Massachusetts: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

C. Penilaian

1. **Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
2. **Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
3. **Keterampilan** : Mampu menjelaskan terkait cara kerja motor diesel, proses pembakaran yang terjadi pada motor diesel

Kegiatan Pembelajaran 6 :

6. Motor Listrik

A. Deskripsi

Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar *impeller* pompa, kipas, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, maupun kerja lainnya. Motor listrik digunakan juga di rumah (*mixer*, bor listrik, kipas angin) dan di industri. Pada era industri modern saat ini, kebutuhan terhadap alat produksi yang tepat guna sangat diperlukan untuk dapat meningkatkan efisiensi waktu dan biaya. Sebagian besar alat industri menggunakan tenaga listrik sebagai energi penggerak utamanya, dan di berbagai perindustrian banyak menggunakan mesin-mesin dengan penggerak utamanya adalah motor AC 1 fase contohnya pada mesin produksi seperti mesin bubut, mesin bor, dan sebagainya. Faktor yang menyebabkan hal tersebut karena motor induksi memiliki beberapa kelebihan antara lain: harga lebih murah, mudah dalam perawatan, konstruksi sederhana. Meskipun demikian, motor induksi juga memiliki kekurangan antara lain: motor induksi memiliki nilai slip (perbedaan kecepatan putar medan stator terhadap kecepatan medan rotor) yang sangat besar, dan motor induksi sulit dalam pengendalian kecepatan putarnya.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti kuliah ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Menjelaskan definisi motor listrik,
- b. Menjelaskan jenis-jenis motor listrik, dan
- c. Menghitung efisiensi motor listrik.

2. Uraian Materi

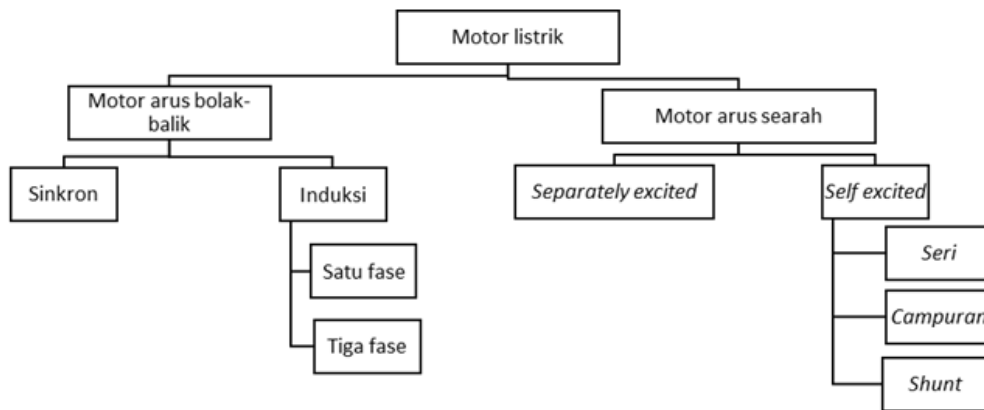
Secara umum, mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor adalah sama. Arus listrik dalam medan magnet memberikan gaya, jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/*loop*, kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan. Pasangan gaya ini yang akan menghasilkan tenaga putar (torsi) untuk memutar kumparan. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamanya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnet yang dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

Beban pada motor mengacu kepada keluaran tenaga putar/torsi sesuai dengan kecepatan yang diperlukan dan biasanya dikategorikan ke dalam tiga kelompok, yaitu:

- (a) **Beban torsi konstan** yaitu beban dengan permintaan luaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasi namun torsinya tidak bervariasi. Contohnya adalah konveyor, pompa *displacement* konstan, dan *rotary kilns*.
- (b) **Beban dengan torsi variabel** yaitu beban dengan torsi yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contohnya adalah pompa sentrifugal dan kipas (torsi bervariasi dengan kuadrat kecepatan).
- (c) **Beban dengan energi konstan** yaitu beban dengan permintaan torsi yang berubah dan berbanding terbalik dengan kecepatan. Contohnya adalah peralatan-peralatan mesin.

a) Jenis Motor Listrik

Motor listrik biasanya terdiri atas dua jenis yaitu motor arus searah (DC) dan motor arus bolak-balik (AC). Gambar 35 berikut menunjukkan pembagian motor listrik secara umum.

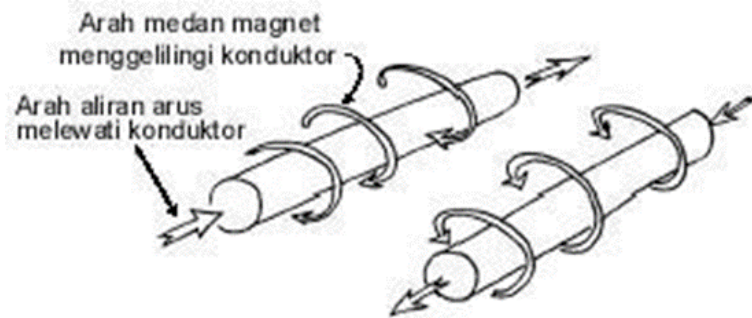


Gambar 35. Klasifikasi Jenis Motor Listrik

1) Motor DC

Motor jenis ini menggunakan arus langsung yang tidak langsung/*directundirectional*. Motor DC digunakan pada penggunaan khusus yang memerlukan penyalaan torsi yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas.

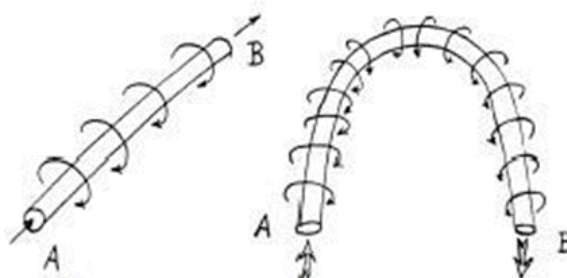
Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor DC disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam medan magnet maka akan timbul tegangan yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik. Prinsip kerja dari arus searah adalah membalik fase tegangan dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan komutator sehingga arus yang berbalik arah dengan kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub- kutub magnet permanen. Contoh cara kerja motor DC dapat dilihat pada Gambar 36 berikut ini.



Gambar 36. Medan Magnet Membawa Arus Mengelilingi Konduktor

Catu tegangan DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan pada Gambar 36 di atas disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet.

Jika arus lewat pada suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor. Aturan Genggaman Tangan Kanan bisa dipakai untuk menentukan arah garis fluks di sekitar konduktor. Genggam konduktor dengan tangan kanan dengan jempol mengarah pada arah aliran arus, maka jari-jari anda akan menunjukkan arah garis fluks. Gambar 37 menunjukkan medan magnet yang terbentuk di sekitar konduktor berubah arah karena bentuk U.



Gambar 37. Medan Magnet Membawa Arus yang Mengelilingi Konduktor Berbentuk U

Medan magnet hanya terjadi di sekitar sebuah konduktor jika ada arus mengalir pada konduktor tersebut. Pada motor listrik konduktor berbentuk U disebut angker dinamo. Jika konduktor berbentuk U (angker dinamo) diletakkan di antara kutub utara dan selatan yang kuat medan magnet konduktor akan berinteraksi dengan medan magnet kutub. Lingkaran bertanda A dan B merupakan ujung

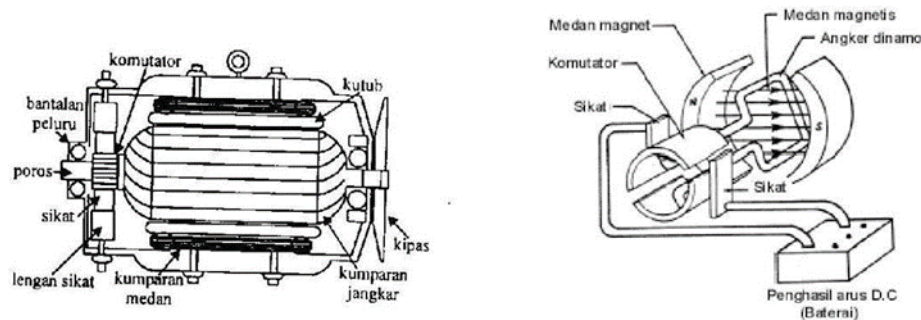
konduktor yang dilengkungkan (*looped conductor*). Arus mengalir masuk melalui ujung A dan keluar melalui ujung B. Medan konduktor A yang searah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di bawah konduktor. Konduktor akan berusaha bergerak ke atas untuk keluar dari medan kuat ini. Medan konduktor B yang berlawanan arah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di atas konduktor. Konduktor akan berusaha untuk bergerak turun agar keluar dari medan yang kuat tersebut. Gaya-gaya tersebut akan membuat angker dinamo berputar searah jarum jam.

Motor DC memiliki tiga komponen utama, yaitu:

- (a) Kutub medan. interaksi dua kutub magnet akan menyebabkan perputaran pada motor DC. Motor DC memiliki kutub medan yang stasioner dan dinamo yang menggerakkan *bearing* pada ruang di antara kutub medan. Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan: kutub utara dan kutub selatan. Garis magnetik energi membesar melintasi bukaan di antara kutub-kutub dari utara ke selatan. Untuk motor yang lebih besar atau lebih kompleks terdapat satu atau lebih elektromagnet. Elektromagnet menerima listrik dari sumber daya dari luar sebagai penyedia struktur medan.
- (b) Dinamo. Bila arus masuk menuju dinamo maka arus ini akan menjadi elektromagnet. Dinamo yang berbentuk silinder, dihubungkan ke as penggerak untuk menggerakkan beban. Untuk motor DC yang kecil, dinamo berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub-kutub, sampai kutub utara dan selatan magnet berganti lokasi. Jika hal ini terjadi, arusnya berbalik untuk merubah kutub-kutub utara dan selatan dinamo.
- (c) Komutator. Kegunaan komponen ini adalah untuk membalikkan arah arus listrik dalam dinamo. Komutator juga membantu dalam transmisi arus antara dinamo dan sumber daya.

Motor DC tersedia dalam banyak ukuran meskipun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa penggunaan berkecepatan rendah, penggunaan daya rendah hingga sedang seperti peralatan mesin dan *rolling mills*.

Hal ini disebabkan sering terjadinya masalah dengan perubahan arah arus listrik mekanis pada ukuran yang lebih besar. Motor dibatasi penggunaannya pada area yang bersih dan tidak berbahaya karena adanya resiko percikan api. Motor DC relatif lebih mahal daripada motor AC. Motor DC dapat dilihat pada Gambar 36 berikut.



Gambar 38. Motor DC

Terdapat beberapa jenis motor DC, antara lain:

- (a) Motor DC sumber daya terpisah/*Separately Excited* yang berarti arus medan berasal dari sumber daya terpisah
- (b) Motor DC daya sendiri/*Self Excited: motor shunt*

Pada motor *shunt*, gulungan medan disambungkan secara paralel dengan gulungan dinamo (A). Oleh karena itu, total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus dinamo. Berikut tentang kecepatan motor shunt:

- i. Kecepatannya konstan tidak tergantung pada beban (hingga torque tertentu setelah kecepatannya berkurang,) sehingga cocok untuk penggunaan komersial dengan beban awal yang rendah, seperti peralatan mesin.
- ii. Kecepatan dapat dikendalikan dengan cara memasang tahanan dalam susunan seri dengan dinamo (kecepatan berkurang) atau dengan memasang tahanan pada arus medan (kecepatan bertambah).

(c) Motor seri

Dalam motor seri, gulungan medan (medan *shunt*) dihubungkan secara seri dengan gulungan dinamo (A). Oleh karena itu, arus medan sama dengan arus dinamo.

(d) Motor listrik DC kompon/gabungan

Motor Kompon DC merupakan gabungan motor seri dan *shunt*. Pada motor kompon, gulungan medan (medan *shunt*) dihubungkan secara paralel dan seri dengan gulungan dinamo. Hal ini menyebabkan motor kompon memiliki torsi penyalan awal yang bagus dan kecepatan yang stabil. Makin tinggi persentase penggabungan (yakni persentase gulungan medan yang dihubungkan secara seri), makin tinggi pula torsi penyalan awal yang dapat ditangani oleh motor ini. Contoh, penggabungan 40-50% menjadikan motor ini cocok untuk alat pengangkat *hoist* dan derek, sedangkan motor kompon yang standar (12%) tidak cocok.

Adapun hubungan antara kecepatan, fluks medan, dan tegangan dinamo dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$E = K\Phi N$$

$$T = K\Phi I_a$$

Keterangan:

E : gaya elektromagnetik yang ada pada terminal dinamo (volt)

Φ : fluks medan yang berbanding lurus dengan arus medan

N : kecepatan (RPM)

T : torsi elektromagnet

I_a : arus dinamo

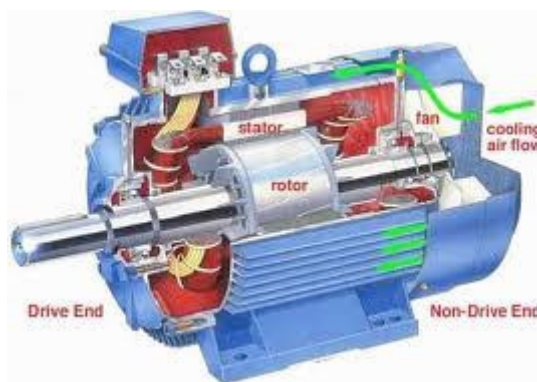
K : konstanta persamaan

2) Motor AC

Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik memiliki dua buah

bagian dasar listrik yaitu stator dan rotor. Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor. Keuntungan utama motor DC dibandingkan dengan motor AC adalah kecepatan motor AC lebih sulit dikendalikan. Untuk mengatasi kekurangan ini, motor AC dapat dilengkapi dengan penggerak frekuensi variabel untuk meningkatkan kendali kecepatan sekaligus menurunkan daya. Motor induksi merupakan motor yang paling populer di industri karena keandalannya dan lebih mudah perawatannya. Motor induksi AC cukup murah dibanding motor DC dan juga memberikan rasio daya terhadap berat yang cukup tinggi (sekitar dua kali motor DC).

Motor sinkron adalah motor AC, bekerja pada kecepatan tetap pada sistim frekuensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torsi awal yang rendah. Oleh karena itu, motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekuensi dan generator motor. Gambar 39 berikut menunjukkan gambar motor sinkron.



Gambar 39. Motor Sinkron

Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan banyak listrik.

Komponen utama motor sinkron antara lain:

- (a) 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.

- (b) Stator. Stator menghasilkan medan magnet berputar yang sebanding dengan frekuensi yang dipasok.
- (c) Kumparan medan. Dikenal juga dengan kumparan penguat untuk menghasilkan medan magnet pada kutub utama.
- (d) *Bearing* atau bantalan. Komponen ini berfungsi untuk memperlancar gerak poros, mengurangi gesekan putaran, serta penstabil poros terhadap gaya horizontal dan vertikal.
- (e) Tutup rangka mesin. Fungsinya adalah sebagaiudukan bantalan poros, titik tengah antara rotor dan rumah stator, dan pelindung bagian dalam motor.

Persamaan untuk motor sinkron dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$N_s = 120 \frac{f}{p}$$

Keterangan:

f : frekuensi dari pasokan frekuensi

p : jumlah kutub

Motor induksi adalah jenis motor yang paling umum digunakan pada berbagai peralatan industri. Kelebihan motor jenis ini adalah rancangan yang sederhana, murah dan mudah didapat, dan bisa langsung disambungkan ke sumber daya AC. Adapun Gambar 40 berikut menunjukkan gambar motor induksi 3 fase.



Gambar 40. Motor Induksi 3 Fase

Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama yaitu:

- (a) Rotor. Terdapat dua jenis rotor yang digunakan dalam motor induksi yaitu rotor kandang tupai yang 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. Selain itu adalah lingkaran rotor yang memiliki gulungan tiga fase. 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.
- (b) 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° .

Klasifikasi motor induksi. Motor induksi terdiri dari motor induksi satu fase dan tiga fase. Motor induksi satu fase hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini, motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 HP. Sedangkan pada motor induksi tiga fase, medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fase yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai), dan penyalan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri

menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, *belt conveyor*, jaringan listrik, dan grinder. Ukuran motor mulai dari 1/3 hingga ratusan HP.

Motor induksi bekerja dengan prinsip berikut:

- (a) Listrik dipasang ke stator yang akan menghasilkan medan magnet.
- (b) Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor.
- (c) Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar.

Meskipun demikian, pada praktiknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron melainkan 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 geser/ slip ring, dan motor tersebut dinamakan “motor cincin geser/*slip ring motor*”. Persamaan di bawah ini untuk menghitung persentase geseran yang terjadi.

$$\% \text{ slip} = \frac{N_s - N_b}{N_s} \times 100$$

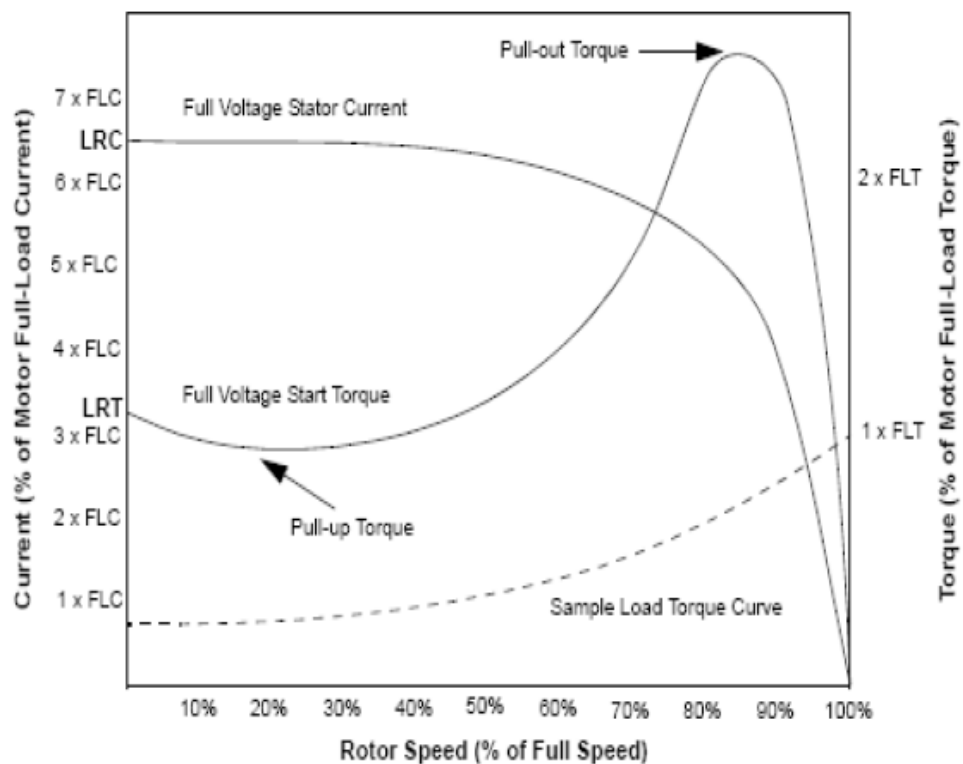
Keterangan:

N_s : kecepatan sinkron (RPM)

N_b : kecepatan dasar (RPM)

b) Hubungan antara beban, kecepatan, dan torsi

Hubungan antara beban, kecepatan, dan torsi dapat dilihat pada Gambar 41 berupa grafik hubungan antara ketiganya. Secara sederhana, dapat dikatakan bahwa jika motor mulai menyala ternyata terdapat arus nyala awal yang tinggi dan torsi yang rendah (*pull-up torque*). Ketika mencapai 80% kecepatan penuh, torsi berada pada tingkat tertinggi (*pull-out torque*) dan arus mulai turun. Dan pada kecepatan penuh atau kecepatan sinkron, arus torsi dan stator turun menjadi nol.



Gambar 41. Grafik Hubungan Antara Beban, Kecepatan, dan Torsi

c) Efisiensi motor listrik

Efisiensi motor dapat didefinisikan sebagai perbandingan keluaran daya motor yang digunakan terhadap keluaran daya totalnya. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi adalah:

- Usia motor. Motor baru akan lebih tinggi efisiensi kerjanya
- Kapasitas. Efisiensi motor semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kapasitas motor
- Kecepatan. Motor dengan kecepatan yang lebih tinggi akan lebih efisien
- Jenis. Motor dengan jenis rotor kandang tupai lebih efisien daripada motor cincin-geser
- Suhu. Motor yang didinginkan dengan kipas dan tertutup total akan lebih efisien daripada motor *screen protected drip-proof* (SPDP)

- (f) Penggulungan ulang motor dapat mengakibatkan penurunan efisiensi
- (g) Beban. Terdapat hubungan yang jelas antara efisiensi motor dan beban. Pabrik motor membuat rancangan motor untuk beroperasi pada beban 50-100% dan akan paling efisien pada beban 75%. Tetapi, jika beban turun dibawah 50% efisiensi turun dengan cepat. Mengoperasikan motor dibawah laju beban 50% memiliki dampak pada faktor dayanya. Efisiensi motor yang tinggi dan faktor daya yang mendekati 1 sangat diinginkan untuk operasi yang efisien dan untuk menjaga biaya rendah untuk seluruh pabrik, tidak hanya untuk motor.

Motor mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menangani beban tertentu. Efisiensi motor ditentukan oleh kehilangan dasar yang dapat dikurangi hanya oleh perubahan pada rancangan motor dan kondisi operasi. Kehilangan dapat bervariasi dari kurang lebih dua persen hingga 20 persen. Tabel berikut menunjukkan jenis kehilangan pada motor induksi.

Tabel 2. Jenis Kehilangan Pada Motor Induksi

Jenis kehilangan	Persentase kehilangan total (100 %)
Kehilangan tetap atau kehilangan inti	25
Kehilangan variabel: kehilangan stator I^2R	34
Kehilangan variabel: kehilangan rotor I^2R	21
Kehilangan gesekan dan penggulungan ulang	15
Kehilangan beban yang menyimpang	5

d) Beban motor

Karena sulit untuk mengkaji efisiensi motor pada kondisi operasi yang normal, beban motor dapat diukur sebagai indikator efisiensi motor. Dengan meningkatnya beban, faktor daya dan efisiensi motor bertambah sampai nilai optimumnya pada sekitar beban penuh. Persamaan berikut digunakan untuk menentukan beban motor.

$$Beban = \frac{P_i \times \eta}{HP \times 0.7457}$$

Keterangan:

η : efisiensi operasi motor (%)

HP : *nameplate* untuk HP

$Beban$: daya yang keluar sebagai % laju daya

P_i : daya tiga fase (kW)

Terdapat tiga metode untuk menentukan beban motor bagi motor yang beroperasi secara individu, antara lain:

- (a) Pengukuran daya masuk. Metode ini menghitung beban sebagai perbandingan antara daya masuk (diukur dengan alat analisis daya) dan nilai daya pada pembebanan 100%.
- (b) Pengukuran jalur arus. Beban ditentukan dengan membandingkan amper terukur (diukur dengan alat analisis daya) dengan laju amper. Metode ini digunakan bila faktor daya tidak diketahui dan hanya nilai ampere yang tersedia. Juga direkomendasikan untuk menggunakan metode ini bila persen pembebanan kurang dari 50%.
- (c) Metode Slip. Beban ditentukan dengan membandingkan slip yang terukur bila motor beroperasi dengan slip untuk motor dengan beban penuh. Ketelitian metode ini terbatas namun dapat dilakukan dengan hanya penggunaan tachometer (tidak diperlukan alat analisis daya).

Pengukuran daya masuk ditentukan dengan rumus berikut ini.

$$P_i = \frac{V \times I \times PF \times \sqrt{3}}{1,000}$$

Keterangan:

P_i : daya tiga fase (kW)

V : RMS (akar kuadrat rata-rata) tegangan, nilai tengah garis ke garis 3 fase

I : RMS arus, nilai tengah 3 fase

PF : faktor daya (desimal)

Alat analisis daya dapat mengukur nilai daya secara langsung. Industri yang tidak memiliki alat analisis daya dapat menggunakan multi-meter atau tong-tester untuk mengukur tegangan, arus dan faktor daya untuk menghitung daya yang masuk. Selanjutnya, tentukan nilai daya dengan mengambil *nameplate* atau dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$P_r = hp \times \frac{0.7457}{\eta_r}$$

Keterangan:

P_r : daya masuk pada beban penuh (kW)

hp : nilai HP pada *nameplate*

η_r : efisiensi pada beban penuh

$$Beban = \frac{P_i}{P_r} \times 100\%$$

Keterangan:

Beban : daya keluar (% nilai daya)

P_i : daya tiga fase terukur (kW)

P_r : daya masuk pada beban penuh (kW)

3. Rangkuman

Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar *impeller* pompa, kipas, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, maupun kerja lainnya. Motor listrik digunakan juga di rumah (*mixer*, bor listrik, kipas angin) dan di industri. Secara umum, mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor adalah sama. Arus listrik dalam medan magnet memberikan gaya, jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/*loop*, kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan. Pasangan gaya ini yang akan menghasilkan tenaga putar (torsi) untuk memutar kumparan. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamanya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnet yang dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

Jenis motor listrik antara lain motor arus searah (DC) dan motor arus bolak-balik (AC). Motor jenis ini menggunakan arus langsung yang tidak langsung/*directundirectional*. Motor DC digunakan pada penggunaan khusus yang memerlukan penyalan torsi yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas. Motor DC tersedia dalam banyak ukuran meskipun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa penggunaan berkecepatan rendah, penggunaan daya rendah hingga sedang seperti peralatan mesin dan *rolling mills*. Hal ini disebabkan sering terjadinya masalah dengan perubahan arah arus listrik mekanis pada ukuran yang lebih besar. Motor dibatasi penggunaannya pada area yang bersih dan tidak berbahaya karena adanya resiko percikan api. Motor DC relatif lebih mahal daripada motor AC. Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik memiliki dua buah bagian dasar listrik yaitu stator dan rotor. Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor.

4. Soal Latihan

- 1) Apa yang dimaksud dengan motor listrik?
- 2) Jelaskan dan berikan contoh pembagian beban pada motor!
- 3) Sebutkan pembagian motor arus bolak-balik!
- 4) Sebutkan pembagian motor arus searah!
- 5) Jelaskan fungsi kerja kutub medan pada motor DC!

5. Kunci Jawaban

- 1) Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar *impeller* pompa, kipas, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, maupun kerja lainnya.
- 2) Beban pada motor terbagi atas tiga kelompok, antara lain:
 - a. **Beban torsi konstan** yaitu beban dengan permintaan luaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasi namun torsiya tidak bervariasi. Contohnya adalah konveyor, pompa *displacement* kontan, dan *rotary kilns*.

- b. **Beban dengan torsi variabel** yaitu beban dengan torsi yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contohnya adalah pompa sentrifugal dan kipas (torsi bervariasi dengan kuadrat kecepatan)
- c. **Beban dengan energi konstan** yaitu beban dengan permintaan torsi yang berubah dan berbanding terbalik dengan kecepatan. Contohnya adalah peralatan-peralatan mesin.
- 3) Motor arus bolak-balik terdiri atas motor sinkron dan motor induksi.
- 4) Motor arus searah terdiri atas motor *separately excited* dan *self excited*.
- 5) Interaksi dua kutub magnet akan menyebabkan perputaran pada motor DC. Motor DC memiliki kutub medan yang stasioner dan dinamo yang menggerakkan *bearing* pada ruang di antara kutub medan. Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan: kutub utara dan kutub selatan. Garis magnetik energi membesar melintasi bukaan di antara kutub-kutub dari utara ke selatan. Untuk motor yang lebih besar atau lebih kompleks terdapat satu atau lebih elektromagnet. Elektromagnet menerima listrik dari sumber daya dari luar sebagai penyedia struktur medan.

6. Sumber Informasi dan Referensi

Zuhal. 2000. Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama

C. Penilaian

- 1. **Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
- 2. **Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
- 3. **Keterampilan** : Mampu menjelaskan terkait cara kerja motor listrik, klasifikasi motor listrik, dan penghitungan efisiensi motor listrik

Kegiatan Pembelajaran 7 :

7. Pendinginan dan Pelumasan

A. Deskripsi

Selama berlangsung proses kompresi, pembakaran, ekspansi, dan akhirnya pembuangan gas dengan temperatur tinggi ($\pm 2,500\text{ }^{\circ}\text{C}$) akan memanasi dinding silinder, katup serta bagian-bagian lain dari motor. Sebagian dari minyak pelumas, terutama yang melapisi dinding silinder akan menguap dan akhirnya terbakar bersama-sama dengan bahan bakar. Oleh karena itu, bagian tersebut perlu mendapat pendinginan yang cukup agar temperaturnya tetap berada dalam batas aman untuk operasional motor. Pendinginan merupakan suatu proses pembuangan panas yang dihasilkan dari proses pembakaran.

Tidak semua kerja yang dihasilkan dari gerak bolak-balik torak di dalam silinder tersedia di proses penggerak untuk penggunaan nyata. Bagian dari kerja yang tidak tersedia ini disebut **kerja friksi**. Sebagian dari daya yang diperoleh poros engkol hilang karena adanya friksi. Untuk mengurangi kerja friksi ini memerlukan sistem pelumasan.

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Memahami dan menjelaskan definisi sistem pendinginan,
- b. Memahami dan menjelaskan definisi sistem pelumasan,
- c. Memahami dan menjelaskan komponen sistem pendinginan,
- d. Memahami dan menjelaskan komponen sistem pelumasan.

2. Uraian Materi

a) Sistem pendinginan

Sistem pendinginan adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menjaga supaya temperatur mesin dalam kondisi yang ideal. Panas hasil pembakaran tidak semuanya terkonversi menjadi energi, sebagian terbuang melalui saluran

pembuangan dan sebagian terserap oleh material disekitar ruang bakar. Mesin dengan efisiensi tinggi memiliki kemampuan untuk konversi panas hasil pembakaran menjadi energi yang diubah menjadi gerakan mekanis, dengan hanya sebagian kecil panas yang terbuang. Mesin selalu dikembangkan untuk mencapai efisiensi tertinggi, tetapi juga mempertimbangkan faktor ekonomis, daya tahan, keselamatan serta ramah lingkungan.

Motor perlu didinginkan karena bila terlalu panas (*over heating*) maka akan menimbulkan beberapa gangguan, antara lain:

- (1) Menurunkan kekuatan material (misalnya paduan aluminium sebagai bahan torak akan kehilangan kekuatannya pada suhu tinggi),
- (2) Gerakan antarkomponen akan terganggu jika terjadi pemuaian material karena panas (pemuaian torak lebih besar dibanding silinder),
- (3) Temperatur terlalu tinggi mengakibatkan penampang silinder tidak lagi bulat akibat **deformasi termal** sehingga cincin torak akan patah dan torak menjadi macet,
- (4) Pada suhu tinggi maka pelumas akan membentuk karbon sehingga mengakibatkan macetnya cincin torak,
- (5) Proses pembakaran menjadi tidak sempurna. Pada motor bensin cenderung akan terjadi ketukan sehingga temperatur akan semakin tinggi pada torak dan menimbulkan penyalaan dini (*pre-ignition*).

Meskipun demikian, di sisi lain jika motor terlalu dingin maka akan muncul persoalan yang juga tidak menguntungkan, di antaranya:

- (1) Bahan bakar sukar menguap (pada motor bensin), sehingga campuran menjadi kaya. Akibatnya, pembakaran menjadi tidak sempurna. Pada motor diesel, udara yang dikompresi dingin akan mengeluarkan asap putih pada gas buang dan menimbulkan ketukan dan mesin sulit dihidupkan,
- (2) Pelumas menjadi kental. Hal ini menyebabkan motor mendapat tambahan tekanan,

- (3) Uap yang dikandung dalam gas pembakaran akan berkondensasi pada temperatur ± 50 °C pada tekanan atmosfer dan menghasilkan titik-titik air yang menempel pada dinding silinder. Hal ini akan mempercepat keausan silinder dan cincin torak. Peristiwa ini disebut dengan keausan karena korosi pada temperatur rendah.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kerugian kalor ke dinding silinder di antaranya:

- (1) **Temperatur pembakaran.** Temperatur pembakaran dipengaruhi kualitas bahan bakar, rasio kompresi, dan beban motor. Semakin tinggi temperatur pembakaran, semakin besar kerugian kalor yang terjadi.
- (2) **Bentuk ruang bakar.** Bentuk ruang bakar berpengaruh besar terhadap kerugian kalor. Kerugian kalor akan berkurang dengan semakin kecilnya rasio permukaan terhadap volume ruang bakar.
- (3) **Ukuran silinder.** Dengan memperbesar ukuran silinder akan mengurangi rasio permukaan terhadap silinder, tetapi akan memperpanjang jarak perjalanan nyala api sehingga pembakaran berlangsung lebih lama.
- (4) **Timing pengapian/injeksi.** Pengaturan *timing* pengapian adalah istilah untuk mesin bensin. Sedangkan pada mesin diesel istilahnya adalah *timing* injeksi. *Timing* yang tepat akan menghasilkan pembakaran yang cepat dan kerugian kalor terkecil pada dinding silinder.

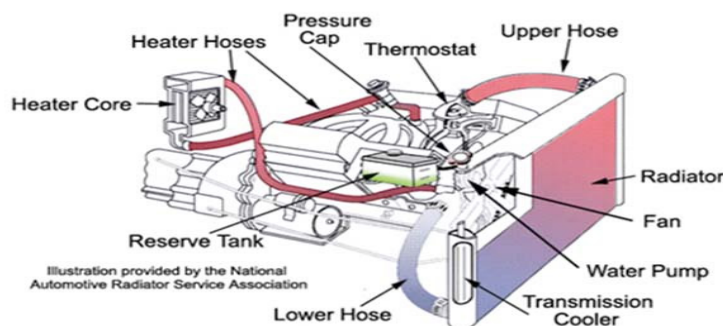
Suhu pembakaran yang terjadi di dalam silinder dapat mencapai 3,000 K. Proses pembakaran ini terjadi secara berulang-ulang. Hal ini akan menyebabkan komponen-komponen mesin menjadi panas. Agar kondisi mesin tetap dapat bekerja secara normal, kepala silinder, blok silinder, torak, mekanisme katup, katup, dan kelengkapannya perlu mendapat pendinginan yang cukup. Berdasarkan fluida pendingin yang digunakan, sistem pendinginan mesin yang umum digunakan ada dua jenis, yaitu sistem pendinginan air dan sistem pendinginan udara. Adapun konduktivitas termal material yang digunakan dalam mesin dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Konduktivitas Termal Beberapa Material

Material	Konduktivitas (W/mK) pada 27 °C
Besi tuang	58
Baja	55
<i>Stainless steel</i> (18/8)	14
Aluminium	202
Paduan aluminium ringan	194
Tembaga	386
Kuningan (63/37)	113
Air	0.614
Udara	0.026
Karbon	3.45

1) Sistem pendinginan air

Pada sistem pendinginan air, sebagian besar panas dari ruang bakar diserap oleh dinding silinder dan kepala silinder. Untuk mendinginkan silinder pada blok motor dan kepala silinder, di dalam blok silinder dan kepala silinder dibuat saluran air pendinginan yang biasa disebut mantel air (*water jacket*). Mantel air pendingin ini dihubungkan dengan radiator oleh slang radiator. Slang bagian atas untuk mengalirkan air pendingin dari mantel air pendingin ke radiator dan selang bagian bawah mengalirkan air pendingin dari radiator ke mantel pendingin. Gambar 42 berikut menunjukkan sistem pendinginan air.



Gambar 42. Skema Sistem Pendingin Cairan Pada Motor

Air yang telah panas dalam mantel air pendingin dialirkan ke radiator untuk didinginkan. Pendinginan air pada radiator dilakukan oleh udara yang mengalir dalam kisi-kisi radiator. Udara yang masuk melalui kisi-kisi radiator tadi diisap oleh kipas radiator dan mengambil panas sebanding dengan jumlah udara yang mengalir per satuan waktu serta perbedaan suhu antara udara tersebut dengan dengan kisi-kisi itu sendiri. Pada saat kendaraan berjalan maka jumlah aliran udara yang melalui kisi-kisi akan ikut bertambah. Komponen utama dari sistem pendinginan air adalah radiator, selang karet, termostat, pompa air, dan kipas radiator.

(a) Radiator

Radiator merupakan suatu penukar kalor sarang lebah dengan media pendingin yang panas mengalir dari atas ke bawah menukar energi dengan udara lebih dingin yang mengalir dari depan ke belakang. Aliran udara terjadi karena gerakan maju kendaraan yang dibantu oleh kipas yang ditempatkan di belakang radiator dan digerakkan secara elektrik maupun putaran poros engkol motor.

Motor berpendingin air biasanya hanya menggunakan air sebagai fluida pendingin di dalam mantel air, namun memiliki beberapa kelemahan. Titik beku air 0 °C tidak memungkinkan untuk digunakan pada lokasi yang memiliki suhu udara di bawah 0 °C. Oleh karena itu, digunakan campuran air dan etilen glikol dengan komposisi 50:50.

Terdapat dua metode sirkulasi air pendingin yang digunakan pada radiator yaitu sirkulasi gravitasi dan sirkulasi paksa. Sirkulasi gravitasi (sirkulasi termosifon) didasarkan pada kenyataan bahwa ketika air dipanaskan akan mengalami penurunan kerapatan dan cenderung bergerak ke atas. Partikel yang lebih dingin bergerak turun untuk menggantikan tempat partikel yang bergerak ke atas. Sirkulasi diperoleh jika air dipanaskan pada suatu titik dan didinginkan pada titik ayang lain. Sirkulasi paksa membutuhkan pompa air. Kelebihan sirkulasi ini adalah mudah untuk mengendalikan temperatur mantel air.

(b) Termostat

Termostat adalah suatu katup kendali suhu sistem pendingin yang dirancang untuk menutup saluran cairan pendingin ke radiator saat motor beroperasi di bawah suhu kerja. Hal ini untuk mempercepat pemasan motor selama cairan pendingin di dalam air tidak dapat mengalir ke radiator.

Saat motor mencapai suhu kerja, termostat membuka ketika suhu cairan pendingin sekitar 80 – 90 °C dan cairan pendingin yang bersuhu tinggi mengalir ke radiator, mencegah motor mengalami *overheating*. Termostat ditempatkan di antara mesin dan radiator untuk memastikan bahwa cairan pendingin tetap di atas suhu tertentu yang telah ditetapkan.

(c) Pompa air

Agar jumlah panas yang dapat diserap tiap satuan waktu lebih besar, sirkulasi cairan pendingin dipercepat menggunakan pompa air. Pompa air adalah perangkat sederhana untuk menggerakkan cairan pendingin selama motor beroperasi. Impeler pompa memanfaatkan gaya sentrifugal untuk menarik cairan pendingin yang masuk dari selang radiator bawah dan mengirimkannya dengan tekanan ke dalam blok mesin.

(d) Kipas radiator

Kipas radiator berfungsi untuk menjaga aliran udara melalui radiator saat kendaraan diperlambat atau berhenti dengan kondisi mesin masih menyala. Kipas radiator ada yang digerakkan secara mekanis dengan poros engkol dan adapula yang digerakkan oleh motor listrik yang menempel pada kipas radiator tersebut. Kipas dipasang di belakang radiator di sisi paling dekat dengan mesin dilengkapi pengarah aliran udara.

(e) Tutup radiator

Tutup radiator berfungsi untuk mempertahankan tekanan udara pada sistem pendingin sesuai dengan titik didih cairan pendingin dan untuk pengisian cairan pendingin. Katup vakum pada tutup radiator menyalurkan udara atau

cairan pendingin dari tangki ekspansi (*reservoir*) kembali ke radiator saat sistem pendingin masih dalam keadaan dingin.

Ketika tekanan sistem pendingin mencapai titik di mana tutup radiator ini perlu melepaskan tekanan, sejumlah kecil cairan pendingin dialirkan ke tangki ekspansi (*reservoir*).

(f) Tangki ekspansi

Tangki ekspansi berupa container plastic yang berfungsi sebagai tangki cadangan untuk kelebihan cairan pendingin. Tangki ekspansi dihubungkan ke sistem pendingin dengan slang karet di tutup radiator.

Saat sistem pendingin mengalami kenaikan suhu hingga terasa hangat, setiap cairan pendingin yang melewati katup radiator dipindahkan ke tangki ekspansi. Saat suhu sistem pendingin mengalami penurunan, kekurangan cairan pendingin akan diambil kembali dari tangki ekspansi.

2) Sistem pendinginan udara

Sistem pendingin ini mengandalkan perpindahan udara panas dari ruang bakar ke udara bebas. Panas yang dihasilkan pembakaran gas di dalam silinder sebagian merambat melalui dinding dan blok silinder. Selanjutnya, panas tersebut bergerak menuju strip pendingin dan diserap oleh udara luar yang temperaturnya jauh lebih rendah. Konstruksi dan jumlah sirip pendingin bergantung pada besar-kecilnya mesin dan kecepatan perpindahan kalor dari sirip pendingin.

Udara yang menyerap panas dari sirip pendingin harus mengalir agar temperatur udara di sekitar sirip tetap rendah. Oleh karena itu, untuk mesin stasioner aliran udara dibuat dengan menambahkan *blower*.

Keuntungan sistem pendingin udara adalah:

- (a) Konstruksi mesin lebih sederhana,
- (b) Berat mesin lebih ringan dibandingkan dengan sistem pendingin air untuk daya yang sama,
- (c) Temperatur kerja mesin lebih cepat tercapai, dan
- (d) Cocok untuk ukuran motor kecil.

b) Sistem pelumasan

Motor bakar dalam menggunakan komponen logam yang bergerak satu terhadap yang lain pada kecepatan sangat tinggi. Kondisi ini menciptakan gesekan atau friksi yang menciptakan panas. Gesekan tersebut akan menyebabkan sebagian tenaga hilang dan komponen menjadi cepat aus. Oleh sebab itu, motor dilengkapi sistem pelumasan yang fungsinya untuk mensirkulasikan minyak pelumas atau oli ke bagian-bagian yang bergesekan tersebut. Secara umum, bagian-bagian yang perlu dilumasi yaitu antara torak dan dinding silinder, antara poros dan bantalan poros, antara roda-roda gigi, klep, dan bagian-bagian lain yang sejenis.

Fungsi sistem pelumasan adalah:

- (1) Membentuk lapisan pelumasan untuk mencegah kontak langsung logam dengan logam untuk mengurangi gesekan dan mencegah keausan dan panas,
- (2) Sebagai pendingin bagian-bagian yang panas akibat gesekan,
- (3) Sebagai penyekat antara piston dan dinding silinder untuk mencegah kebocoran kompresi,
- (4) Mengeluarkan kotoran dari bagian-bagian mesin, dan
- (5) Mencegah karat.

1) Komponen sistem pelumasan

Adapun komponen sistem pelumasan antara lain:

(a) Bak oli

Bak oli terletak di bagian bawah mesin dan berfungsi sebagai *reservoir* untuk menyimpan minyak pelumas. Oli diisap dan dialirkan ke sekitar mesin dengan pompa oli dan dikembalikan setelah melakukan fungsinya. Bak oli memiliki penyekat berupa plat logam yang membantu mencegah minyak terguncang saat mobil bergerak.

(b) Tongkat kedalaman (dipstik)

Dipstik berfungsi sebagai pengatur ketinggian level oli di bak oli yang memberikan informasi kuantitas oli yang berada di bak oli.

(c) Pompa oli

Pompa oli berfungsi untuk menghisap oli dari bak oli dan mensirkulasikan oli ke komponen-komponen mesin untuk memberikan pelumasan pada bagian-bagian yang bergerak sehingga mencegah keausan akibat gesekan.

(d) Saringan oli

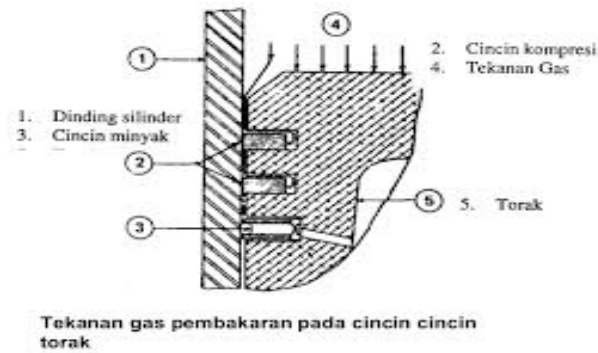
Saringan ini berfungsi untuk menyaring partikel-partikel kotoran yang terbawa masuk oleh oli mesin yang dapat menyebabkan kerusakan mesin.

(e) Sensor tekanan oli

Sensor ini dihubungkan ke *pilot lamp* pada panel *dashboard* dan digunakan untuk mendeteksi jika tekanan oli pelumas turun di bawah tekanan yang diperlukan untuk kerja mesin yang efektif.

2) Mekanisme pelumasan dinding silinder

Kerugian gesekan pada motor bakar torak yang terjadi antara torak dan dinding silinder sekitar 30%. Hal ini menyebabkan konstruksi cincin torak harus merapat pada dinding silinder untuk mencegah masuknya gas dari ruang bakar ke ruang engkol. Akibatnya, lapisan pelumas yang berada di antara torak dan dinding silinder menjadi sangat tipis. Di sisi lain, pelumas juga perlu dijaga agar tidak masuk ke ruang bakar di langkah kompresi. Gas pembakaran dapat melewati alur yang terdapat pada cincin torak kemudian mendesak cincin torak merapat ke dinding silinder sehingga menghalangi masuknya pelumas ke ruang bakar. Jadi, tekanan cincin torak pada dinding silinder bertambah besar dengan semakin besarnya tekanan gas di dalam silinder ruang bakar. Gambar 43 berikut menunjukkan tekanan di ruang bakar.



Gambar 43. Tekanan Gas Pembakaran Terhadap Cincin Torak

Gaya akibat tekanan gas pembakaran yang bekerja di atas kepala torak diimbangi oleh gaya batang penghubung. Karena pada saat motor bekerja, kedudukan batang penggerak membentuk sudut terhadap sumbu silinder maka akan terjadi gaya ke samping pada dinding silinder. Semakin besar tekanan gas di dalam silinder, semakin besar gaya samping pada dinding silinder sehingga menipiskan lapisan pelumas antara cincin torak dengan dinding silinder. Hal ini akan meningkatkan gesekan torak terhadap dinding silinder.

Ketebalan lapisan minyak pelumas antara torak dengan dinding silinder berubah terhadap kecepatan selama siklus motor untuk satu posisi melingkar dari torak. Gaya gesek dari torak sebanding dengan viskositas minyak pelumas, kecepatan motor, dan tekanan efektif rata-rata indikasi. Gaya gesek dapat direduksi dengan memperkecil luas permukaan dinding torak dan menggunakan pelumas dengan viskositas rendah. Gaya gesek yang ditimbulkan akan semakin besar dengan meningkatnya kecepatan. Jadi, besar gesekan torak lebih dipengaruhi oleh kecepatan torak daripada oleh tekanan gas pembakaran atau tekanan efektif rata-ratanya.

3) Minyak pelumas

Minyak pelumas adalah bagian penting sistem pelumasan sehingga harus mampu melumasi semua komponen yang bergerak guna menghindari kontak antar logam. Viskositas (kekentalan) minyak menjadi ukuran, baik dalam kondisi mesin dingin atau panas. Stabilitas viskositas dalam berbagai temperatur menjamin keberhasilan fungsi pelumasan ini. Ketebalan lapisan minyak pelumas tergantung

pada viskositas dan tekanan spesifik bantalan. Kemampuan pelumasan yang baik disebabkan oleh faktor-faktor berikut ini:

- (a) Viskositas minyak harus sesuai dengan jenis operator minyak yang bersangkutan. Viskositas yang terlalu rendah akan mengakibatkan *overheating* pada motor. Sebaliknya, jika viskositas terlalu tinggi maka hambatan gesek akan meningkat dan menyebabkan motor sulit dihidupkan pada kondisi dingin,
- (b) Memiliki daya pelapisan atau pelekatan yang baik pada permukaan logam atau komponen-komponen motor,
- (c) Tidak mudah terkontaminasi material lain,
- (d) Memiliki titik nyala yang tinggi dan sulit menguap sehingga pelumas tidak mudah terbakar pada suhu tinggi,
- (e) Mempunyai koefisien perpindahan panas konduksi yang baik sehingga mudah memindahkan kalor,
- (f) Memiliki titik beku yang rendah agar mampu beroperasi di daerah dingin.

Proses pembakaran di ruang bakar tentu akan mengakibatkan oksidasi pelumas pada suhu tinggi yang dilakukan oleh oksigen yang terdapat di dalam udara. Selain itu, kerak seringkali dijumpai pada kepala torak, cincin torak, katup, dan saluran buang sebagai akibat proses oksidasi. Oksidasi akan dipercepat pada suhu tinggi. Untuk itu, pelumas membutuhkan zat aditif antioksidan yang mampu membersihkan bagian yang teroksidasi pada logam seirama dengan kerja motor sekaligus mencegah terjadinya korosi.

4) Jenis minyak pelumas

Berdasarkan bahan dasar, minyak pelumas dibedakan menjadi dua yaitu pelumas sintetis dan pelumas mineral. Pelumas sintetis dibuat dari unsur-unsur kimia sintetis, baik bahan dasar maupun aditifnya. Bahan kimia yang banyak digunakan sebagai pengganti minyak mentah antara lain *polyalphaolefins*, ester berbasis dua, ester organofosfat, ester silikat, glikol polialkena, silikon atau flor hidrokarbon. Pelumas mineral terbuat dari bahan dasar yang berasal dari minyak mentah dengan tambahan aditif sekitar 10 – 20%.

Pelumas sintetis digunakan pada motor yang beroperasi pada beban berat contohnya pada mobil balap yang harus terus-menerus dipacu pada putaran tinggi, atau pada kondisi *stop and go*, atau jika direkomendasikan oleh pabrikan pembuat motor. Pelumas sintetis juga diperlukan di daerah yang beriklim ekstrem dingin (di daerah sub tropis dan kutub) atau ekstrem panas (di daerah gurun). Pelumas sintetis memiliki rentang viskositas yang sangat luas sehingga lebih mudah beradaptasi pada berbagai perubahan suhu.

Viskositas pelumas berhubungan dengan fungsi pelumas tersebut untuk mencegah keausan permukaan material yang saling bergesekan. Tingkat kekentalan pelumas yang dinyatakan dengan SAE dibedakan menjadi:

- (a) *Monograde*. Contohnya SAE 30, 40, 50. Angka kekentalan dipatok pada angka 30, 40, dan 50. Semakin tinggi angka yang tercantum berarti semakin kental minyak pelumas tersebut.
- (b) *Multigrade*. Contohnya SAE 0W-50, 5W-30, 5W-40, 10W-40, 15W-40, dan 20W-50. Tingkat kekentalan pada pelumas jenis ini bervariasi. Huruf 'W' di belakang angka pertama menyatakan *winter* (bertemperatur rendah). Misalnya pelumas 5W-40 artinya pada kondisi dingin pelumas tersebut memiliki tingkat viskositas SAE-5 sedangkan pada kondisi panas SAE-40.

5) Standar minyak pelumas

Untuk menghasilkan pelumasan yang baik, minyak pelumas terbagi ke dalam beberapa peringkat pelumas berdasarkan standar API (*American Petroleum Institute*) dan disesuaikan dengan penggunaannya (untuk motor bensin atau diesel).

Peringkat ini meliputi berbagai sifat minyak pelumas, di antaranya temperatur penguraian, partikel suspensi, kemampuan pelumasan, dan lain-lain. Huruf **S** menyatakan pelumas untuk motor bensin, sedangkan huruf berikutnya menyatakan tingkatan kualitas pelumas.

Adapun berdasarkan kekentalan, pelumas dibagi menjadi:

- (a) Menurut API (*American Petroleum Institute*)

Untuk motor bensin:

- i. *Service ML (motor light)*
- ii. *Service MM (motor medium)*
- iii. *Service MS (motor severe)*

Untuk motor diesel:

- i. *Service DG (diesel general)*
- ii. *Service DM (diesel medium)*
- iii. *Service DS (diesel severe)*

(b) Menurut SAE (*Society Automotive Engineers*)

- i. SAE 10 untuk oli hidrolisis
- ii. SAE 30 atau 40 untuk oli karter
- iii. SAE 90 untuk oli transmisi
- iv. SAE 140 untuk oli gardan
- v. SAE 140 untuk metal/*bearing*

Waktu penggantian pelumas ditentukan berdasarkan jam kerja dan jarak tempuh.

Cara penggantian pelumas adalah sebagai berikut:

- (a) Buka baut pengeluaran pelumas dan baut pemasukan agar pelumas dapat mengalir dengan lancar;
- (b) Tampung pelumas bekas di dalam kaleng atau plastik dan periksalah dengan tangan, jika ada gram (serbuk logam) yang mencurigakan segera periksa komponen mesin;
- (c) Tutup kembali baut pengeluaran pelumas; dan
- (d) Isi pelumas yang baru sesuai dengan viskositas sampai batas yang dianjurkan.

3. Rangkuman

Pendinginan merupakan suatu proses pembuangan panas yang dihasilkan dari proses pembakaran melalui proses perpindahan kalor. Pada dasarnya kalor hanya dapat berpindah karena adanya perbedaan temperatur.

Motor perlu didinginkan karena jika terlalu panas akan menimbulkan beberapa gangguan. Proses pendinginan membutuhkan fluida pendingin bisa berupa air ataupun udara yang dialirkan ke bagian mesin di luar silinder. Panas yang terjadi di dalam silinder akan memanasi dinding silinder dan selanjutnya panas ini dipindahkan ke fluida pendingin.

Terdapat dua metode umum yang digunakan untuk mendinginkan ruang bakar motor. Blok atau silinder pada motor berpendingin air (*water cooled*) dilingkupi mantel air (*water jacket*) yang berisi fluida pendingin yang disirkulasikan dengan pompa air ke radiator. Motor berpendingin udara (*air cooled*) mempunyai sirip pada permukaan luar blok atau motor untuk mengarahkan aliran udara.

Motor bakar dalam menggunakan komponen logam yang bergerak satu sama lain pada kecepatan yang sangat tinggi. Hal ini menyebabkan munculnya gesekan yang menyebabkan adanya panas karena gesekan tersebut akan menyebabkan sebagian tenaga hilang dan mempercepat keausan komponen. Oleh karena itu, sistem pelumasan pada motor diperlukan untuk mensirkulasikan minyak pelumas (oli) ke bagian-bagian yang bergesekan.

Sebagai bagian dari sistem pelumasan, minyak pelumas harus mampu melumasi semua komponen yang bergerak untuk menghindari kontak antarlogam. Berdasarkan bahan dasarnya, minyak pelumas dibedakan menjadi dua, yaitu pelumas sintetis dan mineral. Pelumas sintetis dibuat dari unsur-unsur kimia sintetis baik bahan dasar maupun aditifnya. Pelumas mineral dibuat dari bahan dasar yang berasal dari minyak mentah dengan tambahan aditif sekitar 10 – 20%.

Untuk menghasilkan pelumasan yang baik, minyak pelumas dibagi ke dalam beberapa peringkat pelumas berdasarkan **grade API (American Petroleum Institute)** yang disesuaikan untuk penggunaannya (motor bensin atau motor diesel) dan **grade SAE (Society of Automotive Engineers)** yang disesuaikan untuk bagian mesin yang memerlukan.

4. Soal Latihan

- 1) Sebutkan beberapa gangguan yang mungkin timbul karena mesin mengalami *overheating*?

- 2) Jelaskan kelebihan motor berpendingin udara dan motor berpendingin air!
- 3) Jelaskan kekurangan motor berpendingin udara dan motor berpendingin air!
- 4) Jelaskan fungsi termostat pada sistem pendingin mesin kendaraan bermotor!
- 5) Jelaskan perbedaan minyak pelumas *monograde* dan minyak pelumas *multigrade*!

5. Kunci Jawaban

- 1) Gangguan akibat mesin yang terlalu panas antara lain:
 - a. Menurunkan kekuatan material (misalnya paduan aluminium sebagai bahan torak akan kehilangan kekuatannya pada suhu tinggi),
 - b. Gerakan antarkomponen akan terganggu jika terjadi pemuaian material karena panas (pemuaian torak lebih besar dibanding silinder),
 - c. Temperatur terlalu tinggi mengakibatkan penampang silinder tidak lagi bulat akibat **deformasi termal** sehingga cincin torak akan patah dan torak menjadi macet,
 - d. Pada suhu tinggi maka pelumas akan membentuk karbon sehingga mengakibatkan macetnya cincin torak,
 - e. Proses pembakaran menjadi tidak sempurna. Pada motor bensin cenderung akan terjadi ketukan sehingga temperatur akan semakin tinggi pada torak dan menimbulkan penyalaan dini (*pre-ignition*).
- 2) Kelebihan motor berpendingin udara adalah konstruksi mesin lebih sederhana, berat mesin lebih ringan dibandingkan sistem pendingin air untuk daya yang sama, temperatur kerja mesin lebih cepat tercapai, dan cocok untuk ukuran motor kecil.

Kelebihan motor berpendingin udara adalah lebih efektif dalam penukaran panas serta cocok untuk digunakan pada motor dan mesin yang kompleks kerjanya.

- 3) Kekurangan motor berpendingin udara adalah tidak cocok untuk digunakan pada mesin yang kompleks dan memiliki panas mesin yang tinggi.

Kekurangan motor berpendingin air adalah konstruksi yang rumit, berat mesin lebih besar dibandingkan sistem pendingin udara untuk daya yang sama, serta memerlukan campuran aditif untuk dapat bekerja di daerah yang memiliki suhu lingkungan di bawah 0 °C.

- 4) Fungsi termostat adalah untuk mempercepat pemasan motor selama cairan pendingin di dalam air tidak dapat mengalir ke radiator.
- 5) Tingkat kekentalan pelumas dibedakan menjadi minyak pelumas monograde dan *multigrade*. Minyak pelumas *monograde* dengan angka semakin tinggi berarti semakin kental minyak pelumas tersebut. Sedangkan minyak pelumas *multigrade* memiliki tingkat kekentalan bervariasi.

Contoh minyak pelumas *monograde* SAE 30, 40, 50. Angka kekentalan dipatok pada angka 30, 40, dan 50. Semakin tinggi angka yang tercantum berarti semakin kental minyak pelumas tersebut.

Contoh minyak pelumas *multigrade* SAE 0W-50, 5W-30, 5W-40, 10W-40, 15W-40, dan 20W-50. Tingkat kekentalan pada pelumas jenis ini bervariasi. Huruf 'W' di belakang angka pertama menyatakan *winter* (bertemperatur rendah). Misalnya pelumas 5W-40 artinya pada kondisi dingin pelumas tersebut memiliki tingkat viskositas SAE-5 sedangkan pada kondisi panas SAE-40.

6. Sumber Informasi dan Referensi

- Kristanto, Philip. 2015. Motor Bakar Torak: Teori dan Aplikasinya. Yogyakarta: Penerbit Andi
- SAE. Engineering Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Net Power Rating. SAE J1349. Society of Automotive Engineers. 2011.
- Stone, Richard dan Jeffrey K. Ball. 2004. Automotive Engineering Fundamentals. Warrendale: SAE International
- _____. 1992. Introduction to Internal Combustion Engines 2nd Edition. Hampshire: The MacMillan Publishing LTD
- Turns, Stephen R. 2012. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. Boston: McGraw Hill

Williams, Forman A. 1985. Combustion Theory. Massachusetts: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

C. Penilaian

- 1. Sikap** : Keikutsertaan dan partisipasi aktif dalam diskusi.
- 2. Pengetahuan** : Kemampuan menjawab pertanyaan dengan benar soal latihan
- 3. Keterampilan** : Mampu menjelaskan tentang sistem pendinginan, tipe sistem pendinginan motor, definisi sistem pelumasan, proses pelumasan yang terjadi pada motor

BAB III.

PENUTUP

Buku ajar ini disusun untuk salah satu bahan acuan mahasiswa dalam mengikuti proses pembelajaran di Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian.

Selain buku ajar ini juga terdapat Buku Panduan Praktikum. Di kedua buku ini terdapat soal latihan untuk mengevaluasi pemahaman teori mahasiswa dan tugas praktik yang wajib dilakukan dalam rangka implementasi materi.

Materi yang disajikan terbatas pada silabus yang telah disusun di Kurikulum Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian. Oleh karena itu, mahasiswa perlu membaca juga buku-buku referensi lainnya untuk memperkaya pengetahuan dan wawasan mahasiswa. Buku-buku referensi dapat dilihat pada buku yang dikutip dalam bahan ajar ini maupun buku lain yang relevan.

Penyusun menyampaikan terima kasih kepada Pusat Pendidikan Pertanian, Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian yang telah memfasilitasi proses penyusunan buku ajar ini dari awal hingga akhir.

Penyusun

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Wiranto. 1994. *Motor Bakar Torak: Penggerak Mula*. Bandung: Penerbit ITB
- Cengel, Yunus A dan Michael A. Boles. 2015. *Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition*. New York: McGraw Hill
- Goering, Carroll E dan Allan C. Hansen. 2004. *Engine and Tractor Power 4th Edition*. St. Joseph. Michigan: ASAE
- Griswold, John. 1996. *Fuel Combustion and Furnaces*. London: Mc. Graw- Hill.
- Ferguson, Colin R dan Allan T. Kirkpatrick. 2001. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences 2nd Edition*. New York: John Willey & Sons INC
- Heisler, H. 1995. *Advanced Engine Technology*.
- Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw Hill
- Kristanto, Philip. 2015. *Motor Bakar Torak: Teori dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Kuo, Kenneth K. 2005. *Principles of Combustion*. New Jersey: John Willey & Sons INC
- Pulkrabek, Willard W. 2013. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Edinburgh: Pearson
- SAE. *Engineering Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Net Power Rating*. SAE J1349. Society of Automotive Engineers. 2011.
- Stone, Richard dan Jeffrey K. Ball. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals*. Warrendale: SAE International
- _____. 1992. *Introduction to Internal Combustion Engines 2nd Edition*. Hampshire: The MacMillan Publishing LTD
- Turns, Stephen R. 2012. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Boston: McGraw Hill

Williams, Forman A. 1985. *Combustion Theory*. Massachusetts: The Benjamis/Cummings Publishing Company, Inc.

Zuhal. 2000. *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama

