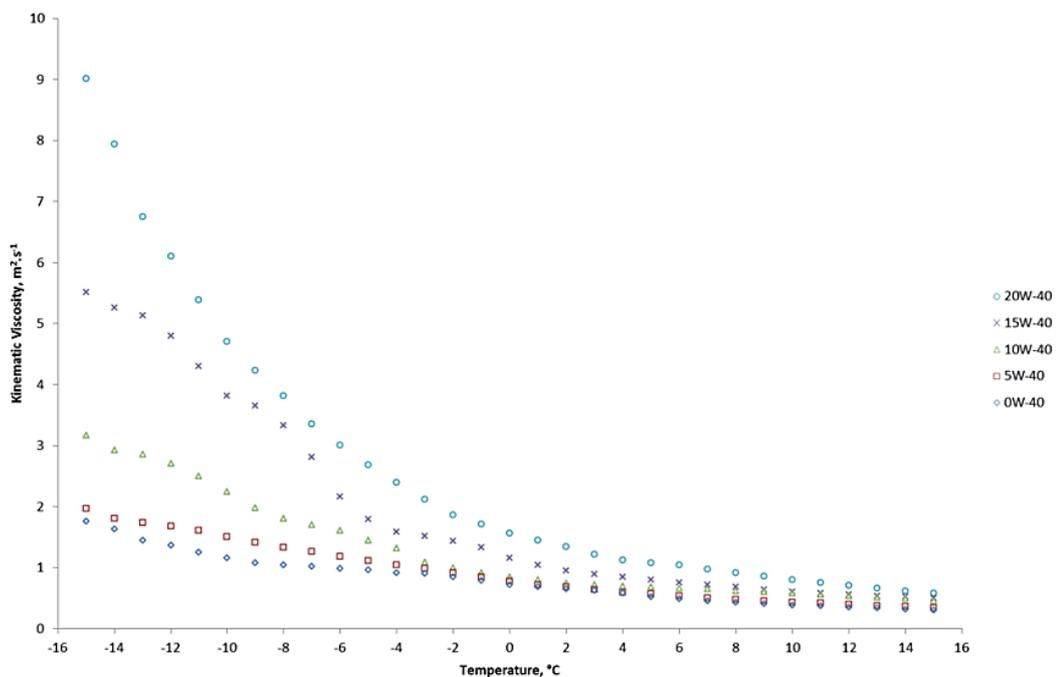


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kumbár dan Sabaliauskas (2013) dalam penelitiannya membandingkan tentang perilaku lima oli mesin sintetis dengan viskositas yang berbeda terhadap kenaikan temperatur. Merek oli mesin yang digunakan yaitu Mobile 1 New Life SAE 0W-40, Carlson Millenium SYNTH SAE 5W-40, Castrol Magnatec SAE 10W-40, MOL Dynamic Gas Eco+ SAE 15W-40, dan Mogul M7ADS III SAE 20W-40. Pada penelitian tersebut, oli mesin didinginkan sampai di bawah temperatur nol derajat celsius dan di bawah pengaturan temperatur yang terkontrol. Viskositas kinematik diukur pada kisaran temperatur -15°C dan $+15^{\circ}\text{C}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa viskositas kinematik semua oli mesin mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur.



Gambar 2.1 Grafik perubahan viskositas kinematik terhadap kenaikan temperatur (Kumbár dan Sabaliauskas, 2013)

Effendi dan Adawiyah (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh kenaikan temperatur terhadap penurunan nilai viskositas beberapa minyak pelumas. Dalam penelitian tersebut menggunakan enam merek minyak pelumas yang berbeda antara lain SGO SAE 20W-50, MPX1 SAE 10W-30, Yamalube SAE 20W-40, Shell Helix HX5 SAE 15W-50, Castrol Active SAE 20W-50, dan Top One Prostar SAE 20W-40. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa minyak pelumas tersebut mengalami perubahan viskositas secara signifikan pada kenaikan temperatur 70°C. Rata-rata persentase penurunan viskositas minyak pelumas relatif sama yaitu SGO SAE 20W-50 62%, MPX1 SAE 10W-30 76%, Yamalube SAE 20W-40 69%, Shell Helix HX5 SAE 15W-50 76%, Castrol Active SAE 20W-50 66%, dan Top One Prostar SAE 20W-40 73%.

Tabel 2.1 Persentase Penurunan Viskositas Minyak Pelumas pada Temperatur 70°C (Effendi dan Adawiyah, 2014)

Merek Pelumas	Pengujian										Rerata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SGO SAE 20w-50	63%	60%	71%	67%	54%	65%	59%	63%	62%	63%	62%
AHM Oil MPX1 SAE 10w-30	82%	70%	81%	80%	68%	80%	75%	70%	70%	80%	76%
Yamalube SAE 20w-40	71%	66%	66%	69%	68%	80%	70%	66%	71%	63%	69%
Shell Helix HX5 SAE 15w-50	73%	72%	82%	83%	72%	69%	71%	78%	83%	77%	76%
Castrol Active SAE 20w-50	73%	64%	52%	65%	71%	66%	67%	61%	72%	67%	66%
Top One Prostar SAE 20w-40	85%	66%	69%	77%	76%	68%	77%	69%	67%	74%	73%

Siskayanti (2015) dalam penelitiannya membandingkan tentang kinerja pelumas mineral dan pelumas sintetis SAE 10W-30 pada uji jalan sampai 6000 km. Berdasarkan hasil uji jalan yang telah dilakukan, terjadi penurunan viskositas yang cukup stabil baik pada pelumas mineral maupun pelumas sintetis. Penurunan viskositas yang cukup stabil terjadi pada temperatur 40°C dan 100°C. Persentase penurunan viskositas pelumas mineral sebesar 33%, tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan pelumas sintetis sebesar 30%. Nilai *Total Base Number (TBN)* pada kedua pelumas cukup stabil dengan penurunan yang kecil sehingga kedua pelumas tersebut mampu menetralkan asam dengan baik.

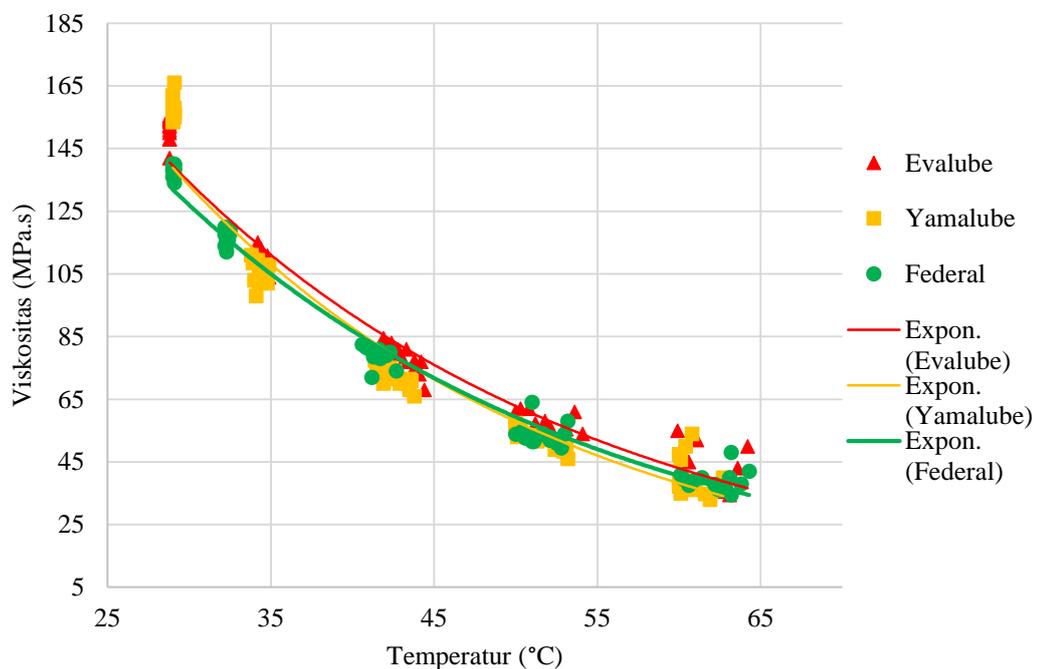
Rahmawan (2016) melakukan penelitian dengan membandingkan karakteristik viskositas dan konduktivitas termal tiga produk minyak pelumas

beserta pengaruhnya terhadap kinerja sepeda motor Suzuki Satria F150. Penelitian tersebut menggunakan tiga jenis minyak pelumas yang berbeda yaitu Mesran Super (*mineral oil*) SAE 20W-50, Shell Advance AX7 (*semi synthetic oil*) SAE 10W-40, dan Top One Evolution (*full synthetic oil*) SAE 10W-30. Dari hasil pengujian daya, minyak pelumas *full synthetic* mampu menghasilkan daya tertinggi sebesar 16,4 HP. Sedangkan minyak pelumas mineral dan *semi synthetic* menghasilkan daya yang sama sebesar 16,2 HP. Pada pengujian konsumsi bahan bakar, jangkauan kendaraan per liter bahan bakar dari minyak pelumas *full synthetic* lebih tinggi dibandingkan dengan minyak pelumas mineral dan *semi synthetic*. Jangkauan kendaraan per liter bahan bakar dari minyak pelumas *full synthetic* sebesar 45 km/liter, minyak pelumas *semi synthetic* sebesar 43 km/liter, dan minyak pelumas mineral hanya mampu menempuh 40 km/liter.

Rais (2017) melakukan analisis tentang pengaruh beberapa minyak pelumas yaitu MPX2, BM1, dan Motul terhadap nilai konduktivitas termal dengan variasi kenaikan temperatur antara *plug* dan *jacket*. Dalam penelitiannya menyatakan bahwa nilai konduktivitas termal mengalami penurunan seiring dengan kenaikan temperatur *plug* dan *jacket*. Nilai konduktivitas termal yang paling tinggi dimiliki oleh minyak pelumas BM1. Sedangkan nilai konduktivitas termal yang paling rendah yaitu pada minyak pelumas MPX2. Pelumas sintesis memiliki nilai konduktivitas termal lebih tinggi dibandingkan pelumas mineral, hal ini terjadi karena adanya campuran bahan kimia berupa *ester* sehingga pelumas sintesis lebih efektif dalam menyerap panas yang disebabkan oleh gesekan antar komponen di dalam mesin sepeda motor. Hal ini yang menjadikan minyak pelumas berfungsi juga sebagai pendingin komponen-komponen mesin.

Raharjo (2017) meneliti tentang perubahan viskositas pelumas terhadap kenaikan temperatur dengan menggunakan beberapa jenis pelumas yaitu Evalube Runner (*mineral oil*), Yamalube Gold (*semi synthetic oil*), dan Federal Racing (*full synthetic oil*). Perubahan viskositas pelumas diamati dengan menggunakan alat Viskometer Digital tipe NDJ-8S. Variasi temperatur kerja yang digunakan yaitu pada temperatur kamar, 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa nilai viskositas pelumas Evalube Runner pada temperatur kamar lebih tinggi

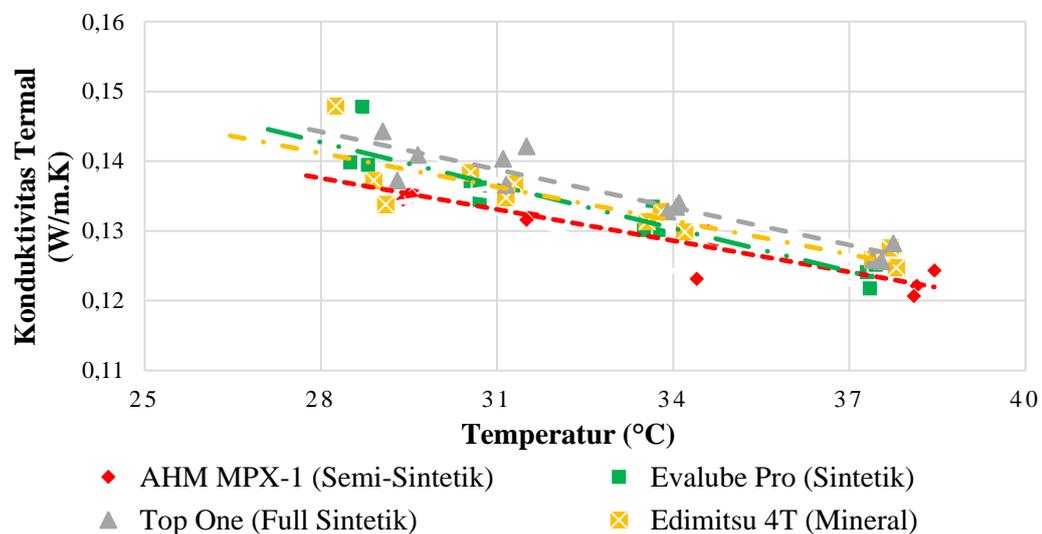
dibandingkan pelumas Yamalube Gold dan Federal Racing. Nilai viskositas pelumas Evalube Runner pada temperatur kamar sebesar 155,4 mPa.s, Yamalube Gold sebesar 155 mPa.s, dan Federal Racing sebesar 140,2 mPa.s. Pada batas temperatur maksimum, nilai viskositas ketiga jenis pelumas mengalami penurunan yang cukup signifikan. Nilai viskositas pelumas Evalube Runner turun menjadi 34,5 mPa.s, Yamalube Gold turun menjadi 33 mPa.s, dan Federal Racing turun menjadi 34,5 mPa.s. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa ketiga jenis pelumas mengalami penurunan viskositas seiring dengan kenaikan temperatur. Penurunan viskositas paling kecil yaitu pada pelumas Federal Racing (*full synthetic*). Hal ini menunjukkan bahwa pelumas *full synthetic* lebih unggul dibandingkan pelumas lainnya karena memiliki ketahanan viskositas yang baik. Selain itu, terdapat zat berupa *ISO Polymerized Synthetic Base Oil* dalam pelumas *full synthetic* yang berfungsi untuk menjaga kekentalan pelumas pada kondisi kerja agar tetap stabil.



Gambar 2.2 Grafik perubahan viskositas terhadap kenaikan temperatur (Raharjo, 2017)

Waskita (2017) melakukan penelitian tentang perubahan konduktivitas termal beberapa jenis minyak pelumas dengan SAE 10W-30 terhadap temperatur. Jenis

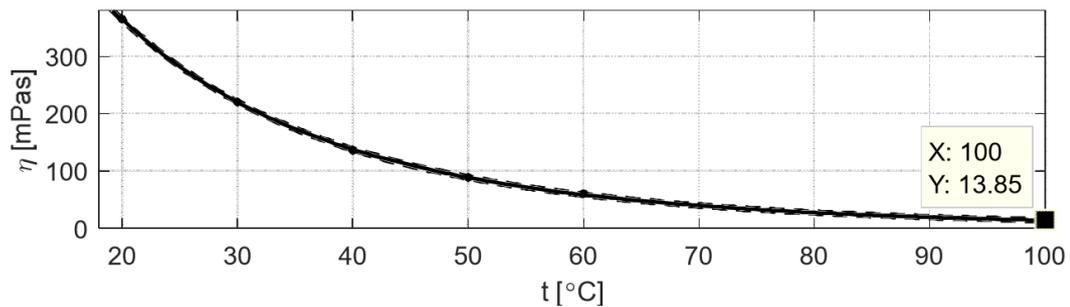
minyak pelumas yang digunakan yaitu Idemitsu 4T (*mineral oil*), Evalube Pro (*synthetic oil*), MPX1 (*semi synthetic oil*), dan Top One (*full synthetic oil*). Metode yang digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas termal minyak pelumas yaitu menggunakan alat *Thermal Conductivity of Liquid and Gases Unit P.A. Hilton LTD H111H* dengan variasi tegangan dan temperatur. Gambar 2.3 menunjukkan bahwa minyak pelumas *full synthetic* memiliki nilai konduktivitas termal yang paling tinggi dibandingkan minyak pelumas lainnya. Selain itu, minyak pelumas *full synthetic* mempunyai kestabilan dalam menjaga viskositasnya sehingga saat mesin bekerja pada temperatur tinggi maka viskositas tetap stabil. Pada minyak pelumas *synthetic*, nilai konduktivitas termalnya cukup baik tetapi mengalami penurunan yang signifikan seiring dengan kenaikan temperatur. Nilai konduktivitas termal minyak pelumas mineral pada saat temperatur dinaikkan lebih baik dibandingkan minyak pelumas *synthetic*. Nilai konduktivitas termal yang paling rendah adalah minyak pelumas jenis *semi synthetic*.



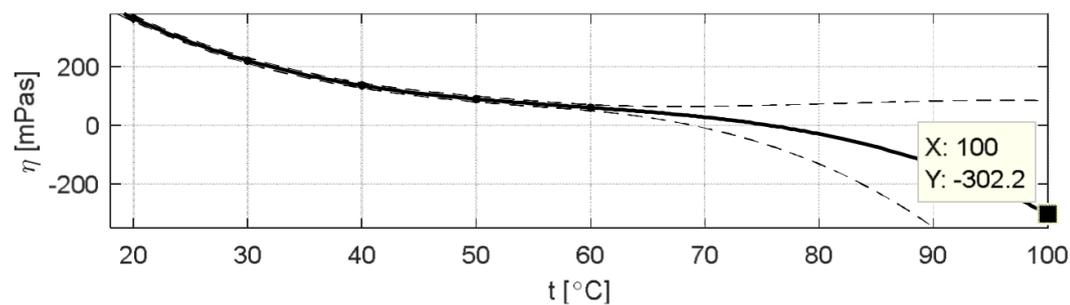
Gambar 2.3 Grafik perubahan konduktivitas termal terhadap kenaikan temperatur (Waskita, 2017)

Zahariea dan Husaru (2017) melakukan analisis tentang hubungan viskositas-temperatur untuk pelumas dengan SAE 10W-60. Dalam penelitiannya menggunakan alat Rheometer RheolabQC untuk menentukan sifat reologi pelumas

dalam rentang temperatur 20 - 100°C. Hasil eksperimen diperoleh dengan kesalahan relatif sebesar 1,29%. Hubungan viskositas terhadap temperatur dimodelkan menggunakan model Arrhenius dan polinomial derajat ke-3. Hasil menunjukkan bahwa viskositas mengalami penurunan nilai seiring dengan kenaikan temperatur.



Gambar 2.4 Kurva dengan batas prediksi, tingkat kepercayaan 95%-model Arrhenius (Zahariea dan Husaru, 2017)



Gambar 2.5 Kurva dengan batas prediksi, tingkat kepercayaan 95%-model polinomial derajat ke-3 (Zahariea dan Husaru, 2017)

Adityaji (2018) melakukan analisis tentang pengaruh karakteristik beberapa minyak pelumas dengan SAE 10W-40 terhadap jangkauan kendaraan per liter bahan bakar dari sepeda motor Yamaha Vega ZR 115 cc berbahan bakar *pertalite*. Dalam penelitiannya menggunakan empat jenis minyak pelumas yaitu Yamalube Sport, Eneos Touring, Castrol Power 1, dan Enduro 4T Racing. Pengujian yang dilakukan menggunakan metode *road test* dengan jarak tempuh 4 km dan kecepatan sepeda motor kurang lebih 40 km/jam. Data yang diperoleh kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk tabel. Tabel 2.2 menunjukkan bahwa rata-rata jangkauan kendaraan per liter bahan bakar antara minyak pelumas satu dengan yang lain tidak jauh berbeda. Hal ini dikarenakan keempat minyak pelumas tersebut menggunakan

standar SAE yang sama yaitu SAE 10W-40. Dari hasil pengujian menyatakan bahwa rata-rata jangkauan kendaraan per liter bahan bakar pada minyak pelumas Castrol Power 1 lebih tinggi dibandingkan minyak pelumas lain yaitu sebesar 60,92 km/liter, sedangkan minyak pelumas dengan rata-rata jangkauan kendaraan per liter bahan bakar paling rendah yaitu Enduro 4T Racing sebesar 56,56 km/liter.

Tabel 2.2 Hasil Perhitungan Jangkauan Kendaraan Per Liter Bahan Bakar (Adityaji, 2018)

Sampel Oli	Jangkauan Kendaraan Per Liter Bahan Bakar (km/liter)	Rata-Rata Jangkauan Kendaraan Per Liter Bahan Bakar (km/liter)
<i>Yamalube Sport</i>	60,48	59,84
	59,76	
	61,49	
	59,50	
	57,96	
<i>Eneos Touring</i>	58,81	58,99
	60,84	
	59,68	
	58,64	
	56,98	
<i>Castrol Power 1</i>	60,21	60,92
	61,96	
	61,40	
	60,84	
	60,21	
<i>Enduro 4T Racing</i>	57,47	56,56
	58,13	
	56,82	
	55,72	
	54,67	

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Minyak Pelumas

2.2.1.1 Pengertian Minyak Pelumas

Minyak pelumas atau yang biasa dikenal dengan oli adalah cairan kimia yang diberikan diantara dua komponen mesin untuk mengurangi gesekan. Minyak pelumas merupakan bagian penting yang tidak terpisahkan dari suatu mesin atau kendaraan. Minyak pelumas terbentuk melalui proses destilasi minyak bumi pada kisaran temperatur 105-135°C. Komposisi minyak pelumas secara umum yaitu terdiri dari minyak mentah 90% dan zat aditif 10%. Salah satu penggunaan minyak pelumas yang paling utama yaitu sebagai oli mesin pada mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Untuk memenuhi hal tersebut dibutuhkan minyak pelumas dengan kualitas terbaik. Minyak pelumas dengan kualitas rendah akan mudah terdekomposisi dan rusak di dalam mesin sehingga daya lumasnya menjadi berkurang.



Gambar 2.6 Berbagai macam merek minyak pelumas (Waskita, 2017)

Menurut Environmental Protection Agency (EPA's), ada beberapa tahap dalam proses pembuatan minyak pelumas yaitu:

1. Distilasi
2. Deasphalting, yaitu proses untuk menghilangkan kandungan aspal dalam minyak
3. Hidrogenasi, yaitu proses untuk menaikkan kualitas dan viskositas

4. Pencampuran katalis untuk menaikkan temperatur pelumas parafin dan menghilangkan kandungan lilin
5. Clay/Hidrogen finishing untuk meningkatkan kualitas, stabilitas, dan warna minyak pelumas

2.2.1.2 Fungsi Minyak Pelumas

Tidak hanya berfungsi untuk mengurangi gesekan antar komponen mesin, minyak pelumas juga berfungsi sebagai pelindung karat, pendingin, dan pemindah panas ruang bahan bakar ke bagian mesin yang lebih dingin. Untuk lebih jelas terkait fungsi minyak pelumas pada kendaraan bermotor adalah sebagai berikut:

1. Melumasi bagian atau komponen-komponen mesin yang saling bersinggungan sehingga minyak pelumas dapat meredam gesekan yang timbul dan mengurangi terjadinya keausan
2. Mendinginkan bagian atau komponen-komponen mesin yang saling bersinggungan dengan cara mengalir melalui celah dari komponen-komponen yang bersinggungan tersebut
3. Meningkatkan tenaga mesin saat bekerja karena adanya lapisan minyak pelumas yang mampu mengatasi gesekan yang terjadi antar komponen mesin
4. Meredam atau mengurangi getaran yang timbul pada komponen-komponen yang menerima beban hantakan seperti pada bantalan tetap dan bantalan jalan dari poros engkol
5. Sebagai perapat antara ring piston dengan dinding silinder sehingga dapat mengurangi kebocoran dan gas *blowby* pada silinder.

Arisandi (2012) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa minyak pelumas yang digunakan pada mesin sepeda motor atau mobil harus memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Mengurangi koefisien gesek

Salah satu fungsi dari minyak pelumas yaitu melumasi bagian-bagian mesin yang bergerak untuk mencegah terjadinya keausan akibat dua benda yang bergesekan. Minyak pelumas akan membentuk lapisan film di antara bagian-bagian

yang bergerak sehingga dapat mencegah terjadinya kontak langsung antar komponen mesin.

2. Pencegah korosi

Minyak pelumas juga berperan sebagai pencegah terjadinya korosi. Saat mesin sedang bekerja, minyak pelumas akan melapisi bagian mesin dengan lapisan pelindung yang mengandung zat aditif untuk menetralkan zat yang bersifat korosif.

3. Pendingin (*cooling*)

Minyak pelumas akan mengalir melalui celah-celah antar komponen yang bergerak sehingga panas yang timbul akibat gesekan akan diserap dan diradiasikan oleh minyak pelumas.

4. Penyerap tegangan

Minyak pelumas mampu menyerap dan meredam tekanan pada komponen yang dilumasi. Selain itu juga melindungi komponen-komponen mesin agar tidak menjadi tajam akibat gesekan yang terjadi antar komponen mesin.

5. Perapat (*sealing*)

Minyak pelumas yang mengalir pada komponen-komponen mesin yang presisi akan berfungsi juga sebagai perapat, yaitu mencegah terjadinya kebocoran gas seperti pada bagian antara piston dan dinding silinder.

6. Pembersih (*cleaning*)

Geram atau kotoran yang timbul akibat gesekan akan dibawa oleh minyak pelumas menuju *crank case* kemudian akan diendapkan di bagian bawah dan ditarik oleh magnet pada dasar *crank case*. Untuk mencegah kotoran ikut mengalir ke bagian-bagian mesin yang lain maka dipasang filter oli. Hal ini bertujuan untuk mencegah kerusakan yang timbul akibat masuknya kotoran ke komponen-komponen mesin.

2.2.1.3 Klasifikasi Minyak Pelumas

Klasifikasi minyak pelumas dapat dibedakan menjadi tiga yaitu berdasarkan standar JASO (*Japanese Automotive Standards Organisation*), API (*American Petroleum Institute*), dan SAE (*Society of Automotive Engineer*). Sebagai contoh, minyak pelumas untuk sepeda motor dengan kopling basah akan berbeda dengan

minyak pelumas untuk sepeda motor dengan kopling kering. Hal ini sudah diatur dalam standar khusus yang bernama JASO. Adapun klasifikasi minyak pelumas adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan JASO (*Japanese Automotive Standards Organisation*)

JASO merupakan standarisasi dari Jepang terkait oli mana saja yang boleh digunakan untuk melumasi bagian mesin kendaraan. Sertifikasi standar JASO terbagi menjadi dua yaitu JASO MA dan JASO MB. JASO MA digunakan untuk jenis kendaraan semi otomatis seperti motor bebek dan motor sport. Kopling kendaraan jenis ini ikut mendapatkan pelumasan dari oli sehingga biasa disebut dengan kopling basah. Adapun JASO MB digunakan untuk jenis oli yang hanya boleh melumasi transmisi saja, tidak bisa melumasi kopling. Jenis kendaraan yang menggunakan standar JASO MB adalah kendaraan jenis matic. Kopling kendaraan jenis ini tidak ikut mendapatkan pelumasan dari oli sehingga disebut dengan kopling kering.

Minyak pelumas pada mesin motor yang memenuhi standar JASO T 903: 2006 dapat diklasifikasikan menjadi empat kelas antara lain: JASO MA, JASO MA1, JASO MA2, dan JASO MB. Klasifikasi ini berdasarkan data hasil uji coba sistem kopling JASO T 904: 2006. Agar minyak pelumas pada mesin motor memenuhi standar JASO yang disebutkan di atas, setidaknya harus ada salah satu dari tingkat kualitas berikut:

- a. API SG, SH, SJ, SL, SM
- b. ILSAC GF-1, GF-2, GF-3
- c. ACEA A1/B1, A3/B3, A3/B4, A5/B5, C2, C3

2. Berdasarkan API (*American Petroleum Institute*)

Klasifikasi ini dilakukan berdasarkan standar valid yang diberikan oleh API (*American Petroleum Institute*). Klasifikasi ini dibedakan dengan penandaan pada minyak pelumas menggunakan huruf yang berbeda antara pelumas untuk motor bensin dan pelumas untuk motor diesel. Untuk kendaraan motor bensin atau gasoline menggunakan kode S (*Spark*) sedangkan motor diesel menggunakan kode C (*Compression*). Huruf yang dipakai pada motor bensin dimulai dari SA sampai SN, sedangkan untuk pelumas motor diesel dimulai dari huruf CA sampai CK.

Minyak pelumas dengan klasifikasi SA adalah minyak pelumas yang memiliki kemampuan pelumasan paling rendah, sedangkan minyak pelumas dengan klasifikasi SN adalah minyak pelumas terbaru dan terbaik untuk mesin bensin dengan kandungan yang lebih unggul dibandingkan klasifikasi sebelumnya.

Klasifikasi masing-masing huruf tersebut menandakan kemampuan minyak pelumas yang bersangkutan. Selanjutnya akan dijelaskan secara singkat terkait masing-masing klasifikasi minyak pelumas menurut API. Adapun klasifikasi minyak pelumas untuk motor bensin adalah sebagai berikut:

- a. SA merupakan klasifikasi minyak pelumas yang tidak mengandung zat aditif kecuali "*pour depressant* dan *foam depressant*" yang tidak boleh digunakan kecuali disarankan oleh pabrik pembuat kendaraan yang bersangkutan. Namun minyak pelumas jenis ini tidak akan digunakan pada motor bensin yang digunakan untuk menggerakkan mobil. Minyak pelumas jenis ini juga tidak cocok digunakan pada mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1930. Penggunaan pada mesin modern dapat menyebabkan penurunan kinerja dan kerusakan komponen mesin.
- b. SB merupakan klasifikasi minyak pelumas yang khusus melayani motor-motor jenis tua dan bekerja pada keadaan yang sangat ringan. Minyak pelumas jenis ini mengandung bahan tambahan yaitu anti *scuff* dan anti oksidan yang tidak boleh digunakan pada kendaraan lain kecuali disarankan oleh pabrik pembuat kendaraan yang bersangkutan. Minyak pelumas jenis ini juga tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1951. Penggunaan pada mesin modern dapat menyebabkan penurunan kinerja dan kerusakan komponen mesin. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- c. SC merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1964-1967. Kendaraan tersebut berupa kendaraan bertenaga bensin baik untuk mobil penumpang maupun untuk truk. Minyak pelumas jenis ini mengandung bahan yang dapat mengendalikan timbulnya deposit pada temperatur rendah maupun temperatur tinggi dan mencegah terbentuknya korosi pada motor bensin. Minyak pelumas ini tidak cocok

digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1967. Penggunaan pada mesin modern dapat menyebabkan penurunan kinerja dan kerusakan komponen mesin. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.

- d. SD merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1968-1971. Kendaraan tersebut berupa kendaraan bertenaga bensin baik untuk mobil penumpang maupun untuk truk. Minyak pelumas jenis ini memiliki kandungan yang sama seperti SC, yaitu dapat mengendalikan timbulnya deposit, keausan, maupun korosi. Namun kandungan SD lebih baik dibandingkan kandungan SC. Minyak pelumas ini kurang cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1971. Penggunaan pada mesin modern dapat menyebabkan penurunan kinerja dan kerusakan komponen mesin. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- e. SE merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1972-1979. Kendaraan tersebut berupa kendaraan bertenaga bensin baik untuk mobil penumpang maupun untuk truk. Minyak pelumas jenis ini memiliki kemampuan pelumasan yang lebih baik dibandingkan dengan minyak pelumas klasifikasi SC maupun SD. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1979. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- f. SF merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1980-1988. Minyak pelumas jenis ini memiliki kemampuan pelumasan yang lebih baik dibandingkan minyak pelumas klasifikasi SC, SD, maupun SE, di mana kekentalannya tidak mudah berubah terhadap kenaikan temperatur. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1988. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- g. SG merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1989-1993. Minyak pelumas jenis ini dapat digunakan pada kendaraan dengan putaran mesin yang tinggi. Minyak pelumas ini tidak

cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1993 karena perlindungan terhadap oksidasi dan keausan mesin kurang memadai. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.

- h. SH merupakan klasifikasi minyak pelumas yang memenuhi persyaratan untuk kendaraan buatan tahun 1994-1996. Kandungan minyak pelumas jenis SH lebih baik dibandingkan kandungan SG yang banyak mengandung oksidan. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin otomotif bertenaga bensin yang dibuat setelah tahun 1996. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- i. SJ merupakan klasifikasi minyak pelumas untuk kendaraan buatan tahun 1997 sampai 2001. Kandungan minyak pelumas jenis SJ lebih baik dibandingkan kandungan SH karena adanya penambahan 0,1% fosfor dan penguapan pelumas menjadi lebih rendah. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.
- j. SL merupakan klasifikasi minyak pelumas yang ditujukan untuk kendaraan keluaran tahun 2001-2004. Minyak pelumas ini tentunya memiliki kandungan yang lebih baik dibandingkan klasifikasi API sebelumnya. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.
- k. SM merupakan klasifikasi minyak pelumas untuk kendaraan keluaran tahun 2010. Minyak pelumas jenis ini fluidanya terlalu encer dibandingkan jenis lainnya sehingga kemungkinan terjadinya 'selip' antar komponen lebih besar. Hal ini dikarenakan adanya kandungan zat anti *friction* yang terlalu tinggi. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.
- l. SN merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada bulan Oktober 2010. Minyak pelumas jenis ini dibuat untuk memberikan perlindungan deposit suhu tinggi yang lebih baik untuk piston dan pengendalian endapan yang lebih maksimal. Selain itu klasifikasi jenis ini diklaim mampu menghemat bahan bakar, melindungi *turbocharger*, dan melindungi mesin yang beroperasi pada bahan bakar dengan kandungan etanol hingga E85. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.

Sedangkan klasifikasi minyak pelumas untuk motor diesel adalah sebagai berikut:

- a. CA merupakan klasifikasi minyak pelumas untuk kendaraan keluaran tahun 1940-1959. Minyak pelumas jenis ini digunakan pada mesin diesel dengan operasi beban ringan yang mengandung anti oksidan, deterjen-dispersen, dll. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 1959. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- b. CB merupakan klasifikasi minyak pelumas untuk kendaraan keluaran tahun 1949-1961. Minyak pelumas jenis ini digunakan pada mesin diesel dengan operasi beban sedang yang mengandung anti oksidan, deterjen-dispersen, dll. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 1961. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- c. CC merupakan klasifikasi minyak pelumas untuk kendaraan keluaran tahun 1961-1990. Minyak pelumas jenis ini digunakan pada mesin diesel *turbo charged* dan dapat juga digunakan pada mesin bensin dengan pelayanan kondisi mesin operasi temperatur sedang. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 1990. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- d. CD merupakan klasifikasi minyak pelumas yang digunakan pada mesin diesel *turbo charged* dengan kandungan sulfur kecil. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 1994. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- e. CE merupakan pengganti klasifikasi CC dan CD karena karakter mesin diesel memiliki putaran mesin tinggi dan beban tenaga yang cukup besar sehingga perlu adanya pengontrolan terhadap keausan. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 1994. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- f. CF merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 1994. Minyak pelumas jenis ini cocok digunakan untuk mesin diesel *off road* dan

- mesin diesel lainnya termasuk yang menggunakan bahan bakar dengan sulfur di atas 0,5%. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
- g. CF-2 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 1994 untuk mesin 2 langkah. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 2009. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
 - h. CF-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 1994 untuk mesin *turbo charged* dengan putaran tinggi. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 2009. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
 - i. CG-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 1995. Minyak pelumas jenis ini dibuat sebagai pengganti klasifikasi CD, CE, CF-4, yaitu untuk mesin putaran tinggi dan berat kandungan sulfur kurang dari 0,5%. Minyak pelumas ini tidak cocok digunakan pada sebagian besar mesin bertenaga diesel yang dibuat setelah tahun 2009. Klasifikasi jenis ini sudah tidak beredar di pasaran.
 - j. CH-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 1998. Minyak pelumas jenis ini dibuat sebagai pengganti klasifikasi CD, CE, CF-4, dan CG-4 yang ditujukan untuk mesin empat langkah berkecepatan tinggi dan dirancang untuk memenuhi standar emisi knalpot 1998. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.
 - k. CI-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 2002. Minyak pelumas jenis ini dibuat untuk memperbaharui klasifikasi CD, CE, CF-4, CG-4, dan CH-4 yang ditujukan untuk mesin empat langkah berkecepatan tinggi dan dirancang untuk memenuhi standar emisi knalpot 2004. Minyak pelumas ini diformulasikan untuk mempertahankan daya tahan mesin di mana re-sirkulasi gas buang digunakan. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.
 - l. CJ-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 2010. Minyak pelumas jenis ini ditujukan untuk mesin diesel empat langkah berkecepatan tinggi dan dirancang untuk memenuhi standar emisi knalpot 4-jalur Tier 4. Minyak pelumas ini diformulasikan untuk dapat digunakan pada

semua bahan bakar diesel dengan kisaran kandungan belerang 500 ppm (0,05% berat). Namun, penggunaan minyak pelumas pada bahan bakar dengan kandungan belerang lebih dari 15 ppm (0,0015%) akan mempengaruhi ketahanan sistem *aftertreatment* dan interval pembuangan. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.

- m. CK-4 merupakan klasifikasi minyak pelumas yang diperkenalkan pada tahun 2017. Minyak pelumas jenis ini ditujukan untuk mesin diesel empat langkah berkecepatan tinggi dan dirancang untuk memenuhi standar emisi knalpot Tier 4 *non-road*. Minyak pelumas ini diformulasikan untuk dapat digunakan pada semua bahan bakar diesel dengan kisaran kandungan belerang 500 ppm (0,05% berat). Namun, penggunaan minyak pelumas pada bahan bakar dengan kandungan belerang lebih dari 15 ppm (0,0015%) dapat mempengaruhi ketahanan sistem *aftertreatment* dan interval pengeringan minyak. Minyak pelumas dengan standar API CK-4 ini diciptakan untuk dapat memberikan perlindungan terbaik terhadap kehilangan viskositas akibat gesekan, oksidasi dan aerasi minyak, serta memberikan perlindungan terhadap penghambatan filter partikulat, degradasi suhu rendah/tinggi, dll. Klasifikasi jenis ini tersedia di pasaran.

3. Berdasarkan SAE (*Society of Automotive Engineer*)

Minyak pelumas dikelompokkan berdasarkan tingkat kekentalan atau viskositasnya. Hal ini sudah diatur dalam standarisasi khusus yang dikenal dengan istilah SAE (*Society of Automotive Engineers*). Standarisasi minyak pelumas untuk kendaraan bermotor pertama kali dilakukan oleh SAE pada 1911 dengan kode SAE J300. Dalam setiap kemasan minyak pelumas terdapat kode khusus yang menunjukkan tingkat kekentalannya, contoh SAE 40, SAE 50, dll. Semakin tinggi angkanya maka tingkat kekentalan minyak pelumas juga semakin tinggi. Selain itu ada juga kode SAE *multi grade* seperti SAE 10W-30. Angka sebelum huruf W (W = *Winter*) menunjukkan tingkat kekentalan sama seperti SAE 10 pada suhu dingin dan SAE 30 pada suhu panas.

2.2.1.4 Jenis-jenis Minyak Pelumas

Minyak pelumas terbagi menjadi beberapa jenis diantaranya yaitu minyak pelumas mineral (*mineral oil*), minyak pelumas semi sintetis (*semi synthetic oil*), minyak pelumas sintetis (*synthetic oil*), dan minyak pelumas *full synthetic*.

1. Minyak pelumas mineral (*mineral oil*)

Minyak pelumas mineral atau oli mineral terbuat dari bahan dasar (*base oil*) yang diambil dari minyak bumi yang telah diolah dan disempurnakan lalu ditambahkan dengan zat-zat aditif untuk meningkatkan fungsi dan kemampuannya. Pada mesin berteknologi lama atau keluaran lama dengan celah antar komponen mesin yang lebih renggang maka lebih disarankan untuk menggunakan oli jenis mineral. Beberapa pakar/ahli mesin memberikan saran apabila menggunakan oli mineral selama bertahun-tahun maka jangan langsung menggantinya dengan oli sintetis karena oli sintetis dapat mengikis sisa komponen dan partikel yang ditinggalkan oli mineral sehingga sisa partikel tersebut terangkat dan mengalir ke celah-celah mesin sehingga dapat mengganggu performa mesin (Wikipedia, 2018).



Gambar 2.7 Contoh minyak pelumas mineral

Beberapa keunggulan minyak pelumas mineral sebagaimana dijelaskan oleh Siskayanti (2015) adalah sebagai berikut:

- a. Memiliki kekentalan yang sangat stabil baik pada suhu rendah maupun tinggi
- b. Tidak menyebabkan selip pada kopling
- c. Tidak mudah teroksidasi dan tergradasi oleh radiasi panas dari mesin
- d. Menjaga kebersihan mesin dan mencegah terbentuknya deposit pada piston
- e. Melindungi secara optimal mesin dari korosi dan menjaga komponen mesin dari keausan
- f. Mampu meningkatkan akselerasi
- g. Komponen vital motor seperti kopling dan rangkaian *gear* pada transmisi menjadi lebih awet dan tahan lama

2. Minyak pelumas semi sintetis (*semi synthetic oil*)

Minyak pelumas semi sintetis merupakan campuran antara minyak pelumas jenis mineral dan sintetis. Minyak pelumas ini tidak murni hasil dari minyak bumi, melainkan sudah ditambah dengan zat tertentu. Kadar minyak pelumas sintetis yang terdapat di dalamnya 10% hingga 25%. Kelebihan dari minyak pelumas semi sintetis ini adalah kualitasnya diklaim lebih baik dibandingkan minyak pelumas mineral, kekentalan/viskositasnya berada di tengah antara minyak pelumas mineral dan sintetis, tingkat penguapan berada di atas minyak pelumas mineral dan di bawah minyak pelumas sintetis, harganya relatif lebih murah, dan lebih cocok untuk kendaraan keluaran terbaru (Otorider, 2017).



Gambar 2.8 Contoh minyak pelumas semi sintetis

3. Minyak pelumas sintetis (*synthetic oil*)

Minyak pelumas sintetis merupakan hasil campuran *polyalphaolifins* dengan oli mineral. Dalam kandungan oli sintetis tidak terdapat bahan karbon aktif yang sangat tidak baik untuk oli karena akan menghasilkan asam (*acid*) ketika senyawa tersebut bergabung dengan oksigen. Pada dasarnya, oli jenis sintetis didesain untuk menghasilkan kinerja yang lebih unggul dan efektif dibandingkan dengan oli mineral. Oli sintetis lebih direkomendasikan untuk mesin teknologi baru seperti mesin turbo, *supercharged*, DOHC (*Double Over Head Camshaft*) di mana mesin tersebut membutuhkan pelumasan yang lebih baik karena celah komponen mesin lebih kecil (Wikipedia, 2018).



Gambar 2.9 Contoh minyak pelumas sintetis

Beberapa keunggulan minyak pelumas sintetis sebagaimana dijelaskan oleh Siskayanti (2015) adalah sebagai berikut:

- a. Memiliki umur pemakaian yang lebih lama karena meningkatkan stabilitas termal dan tahan terhadap oksidasi
- b. Memiliki spesifikasi yang dibutuhkan pemakai
- c. Pemakain filter lebih awet karena oli yang digunakan lebih sedikit
- d. Volatilitas lebih rendah dan densitas lebih tinggi sehingga akan mengurangi konsumsi oli

- e. Karakteristik produk seragam sehingga sifat-sifat dari oli dapat diprediksi
 - f. Pengoperasian lebih aman karena *flash point*-nya lebih tinggi sehingga ongkos perawatan lebih rendah
4. Minyak pelumas *full synthetic*

Minyak pelumas *full synthetic* merupakan minyak pelumas dengan kandungan bahan aditif 100% yang terdiri dari campuran dua jenis bahan dasar yaitu *Polyalphaolefins* (PAOs) dan *Ester*. Dalam kandungan PAOs terdapat struktur molekul ditambah *Ethylene* dengan prosentase tertentu untuk melicinkan *engine* secara menyeluruh. Minyak pelumas jenis ini sangat dianjurkan pada kendaraan dengan mesin modern karena kadar molekul yang cukup baik dan menjadikan minyak ini *vapourised*. Cocok juga digunakan pada kendaraan tipe *sport* karena aliran pelumas yang sangat baik, tahan terhadap suhu tinggi maupun rendah, *sound engine* yang halus, dan sangat cocok untuk berkendara dengan jarak yang jauh (Waskita, 2017).



Gambar 2.10 Contoh minyak pelumas *full synthetic*

2.2.1.5 Sifat Penting Minyak Pelumas

Dalam penelitian Arismunandar (1988) menyatakan bahwa ada beberapa sifat penting yang perlu diperhatikan agar minyak pelumas dapat bekerja secara maksimal yaitu sebagai berikut:

1. Kekentalan

Minyak pelumas harus sesuai dengan fungsinya yaitu mencegah keausan permukaan yang saling bergesekan, terutama pada beban yang besar dan pada putaran mesin rendah. Minyak pelumas yang terlalu kental akan sulit untuk mengalir, di samping itu dapat menyebabkan kerugian berupa daya mesin yang menjadi terlalu besar. Minyak pelumas yang baik tidak terlalu sensitif terhadap perubahan temperatur sehingga dapat berfungsi sebagaimana mestinya, baik pada temperatur rendah maupun tinggi.

2. Titik tuang

Pada temperatur tertentu, minyak pelumas akan membentuk jaringan kristal yang menyebabkan minyak pelumas tersebut sulit mengalir. Oleh karena itu, minyak pelumas yang digunakan sebaiknya memiliki titik tuang yang serendah-rendahnya untuk menjamin agar pelumas dapat mengalir pada keadaan operasi.

3. Stabilitas

Beberapa minyak pelumas pada temperatur tinggi, tingkat stabilitasnya akan berubah sehingga terjadi endapan yang mengakibatkan cincin torak/*ring piston* melekat pada alurnya. Dalam beberapa hal, minyak pelumas dapat membentuk lumpur apabila bercampur dengan air dan beberapa komponen hasil pembakaran.

4. Kemampuan pelumasan

Minyak pelumas harus memiliki sifat pelumasan yang cukup baik, yaitu dapat melumasi permukaan logam pada komponen-komponen mesin. Sifat ini sangat penting untuk melindungi permukaan mesin agar tidak terjadi keausan.

2.2.1.6 Analisis Minyak Pelumas

Dalam penelitiannya, Mobley (2008) menyatakan bahwa analisis yang dilakukan pada sampel minyak pelumas adalah sebagai berikut:

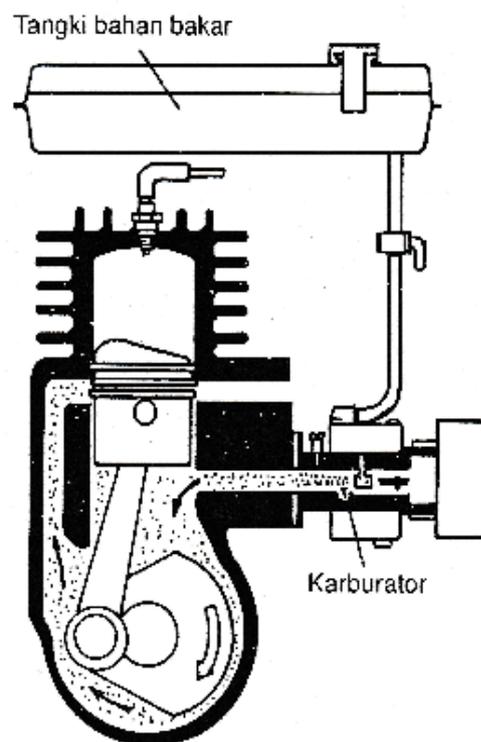
1. Nilai viskositas merupakan sifat yang paling penting dari minyak pelumas. Viskositas yang rendah akan mengurangi kekuatan lapisan minyak pelumas sehingga kemampuan minyak pelumas untuk mencegah terjadinya gesekan menjadi lemah. Viskositas yang tinggi dapat menghambat aliran minyak pelumas untuk melumasi bagian yang sempit dalam komponen mesin.
2. Kontaminasi antara minyak pelumas dengan air/*coolant* dapat menyebabkan masalah serius pada sistem pelumasan
3. Pengenceran minyak pelumas di dalam mesin akan melemahkan kekuatan film dan kemampuan penyegelan suatu minyak pelumas. Hal tersebut dapat disebabkan oleh operasi minyak pelumas yang tidak benar, kebocoran pada sistem bahan bakar, masalah pengapian tidak tepat waktu, dll.
4. Padatan konten adalah padatan yang ada pada sistem minyak pelumas yang dapat secara langsung meningkatkan keausan pada bagian yang dilumasi
5. Jelaga bahan bakar minyak merupakan indikator yang dapat digunakan untuk menganalisis minyak pelumas pada mesin berbahan bakar minyak. Jelaga bahan bakar selalu ada dalam proses pembakaran.
6. Oksidasi minyak pelumas dapat menyebabkan endapan, korosi logam, atau penebalan minyak pelumas
7. *Total Acid Number* merupakan ukuran dari jumlah asam atau *acidlike* materi dalam sampel minyak pelumas
8. *Total Base Number* (TBN) merupakan kemampuan suatu minyak pelumas untuk menetralkan keasaman. Semakin tinggi nilai TBN maka akan semakin besar kemampuannya untuk menetralkan keasaman.
9. Kandungan partikel merupakan analisis penghitungan partikel yang menjadi bagian dari analisis minyak pelumas. Dalam tes ini, jumlah partikel yang tinggi mengindikasikan bahwa suatu mesin dalam pemakaian yang normal.

2.2.1.7 Jenis-jenis Pelumasan

Menurut Daryanto (2004), ada beberapa jenis sistem pelumasan yaitu sebagai berikut:

1. Pelumasan kabut

Pelumasan kabut merupakan jenis pelumasan di mana suatu minyak pelumas dan bensin dicampurkan dengan perbandingan tertentu dan dimasukkan ke dalam tangki bensin. Campuran bensin dan minyak pelumas ini dimasukkan melalui karburator ke dalam ruang pemutar mesin dalam bentuk kabut sehingga oli tersebut dapat memberi pelumasan kepada mesin-mesin yang berputar akibat pembakaran. Cara lainnya yaitu memakai pompa minyak pelumas yang menekan minyak pelumas tersebut ke dalam aliran udara. Jumlah minyak pelumas yang dimasukkan/diinjeksikan dikontrol oleh katup.



Gambar 2.11 Contoh pelumasan kabut (Daryanto, 2004)

Sistem pelumasan kabut ini dipakai pada mesin dua langkah, yaitu:

- a. Mesin pemotong rumput
- b. Kapal boat

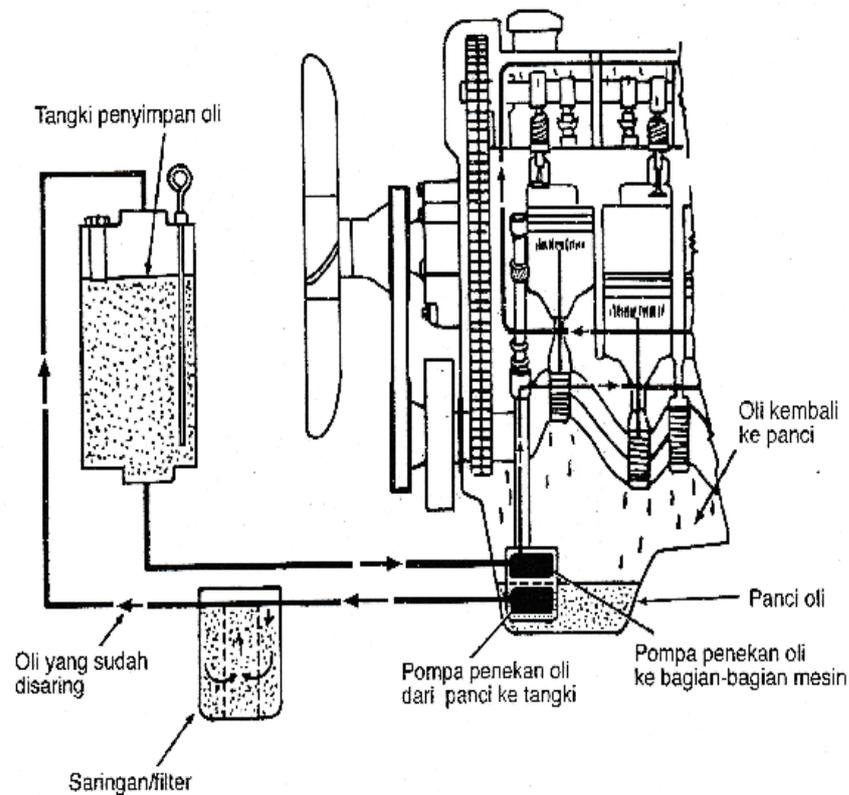
- c. Generator
- d. Kompresor
- e. Sepeda motor dua langkah. Contohnya yaitu pada motor vespa di mana sistem pelumasan bercampur dengan bahan bakar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.

2. Pelumasan kering

Minyak pelumas akan ditempatkan pada tangki atau tempat pelumas yang berada di luar mesin, kemudian minyak pelumas tersebut dialirkan dengan tekanan pompa dan dialirkan ke bagian-bagian mesin yang bergerak melalui pipa atau alur-alur yang terdapat di dalam blok mesin. Setelah seluruh komponen diberi minyak pelumas maka minyak pelumas tersebut akan jatuh ke tempat penampungan di bagian bawah pompa tempat minyak pelumas tersebut dinaikkan lalu dialirkan lagi seperti tadi (bersirkulasi). Contoh sistem pelumasan tipe kering dapat dilihat seperti pada gambar 2.12.

Sistem pelumasan kering jarang digunakan pada kendaraan bermotor, tetapi beberapa kendaraan besar seperti truk masih menggunakan pelumasan tipe kering. Pelumasan kering banyak digunakan pada:

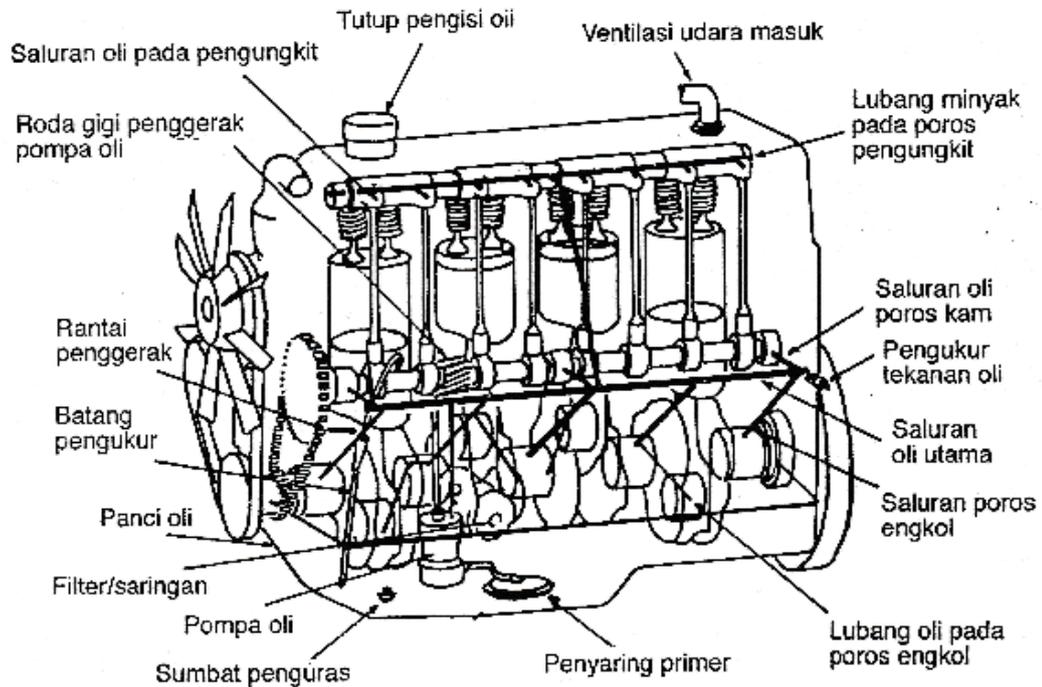
- a. Traktor penggali tanah
- b. Mesin-mesin tak bergerak (*stationer*), contohnya generator



Gambar 2.12 Sistem pelumasan kering (Daryanto, 2004)

3. Pelumasan basah

Sistem pelumasan ini sering digunakan pada kendaraan bermotor dan mobil-mobil modern. Minyak pelumas akan ditempatkan pada tangki oli yang terdapat di bagian bawah dari ruang mesin penggerak (poros engkol), kemudian minyak pelumas dialirkan ke bagian mesin yang bergerak dengan kombinasi penyemprotan dan tekanan. Ketika poros engkol dari mesin berputar, ujung dari poros batang torak akan tercelup ke dalam minyak pelumas yang terdapat di dasar ruang mesin lalu menyiramkan minyak pelumas tersebut ke seluruh komponen yang terdapat di dalam mesin. Terkadang pada ujung dari poros batang torak terdapat penggaruk minyak pelumas yang berfungsi membantu pengambilan minyak pelumas. Jika putaran mesin meningkat tinggi maka minyak pelumas berubah menjadi kabut lembut sehingga minyak pelumas tersebut bisa masuk ke bagian bawah mesin. Contoh sistem pelumasan basah dapat dilihat pada gambar 2.13.

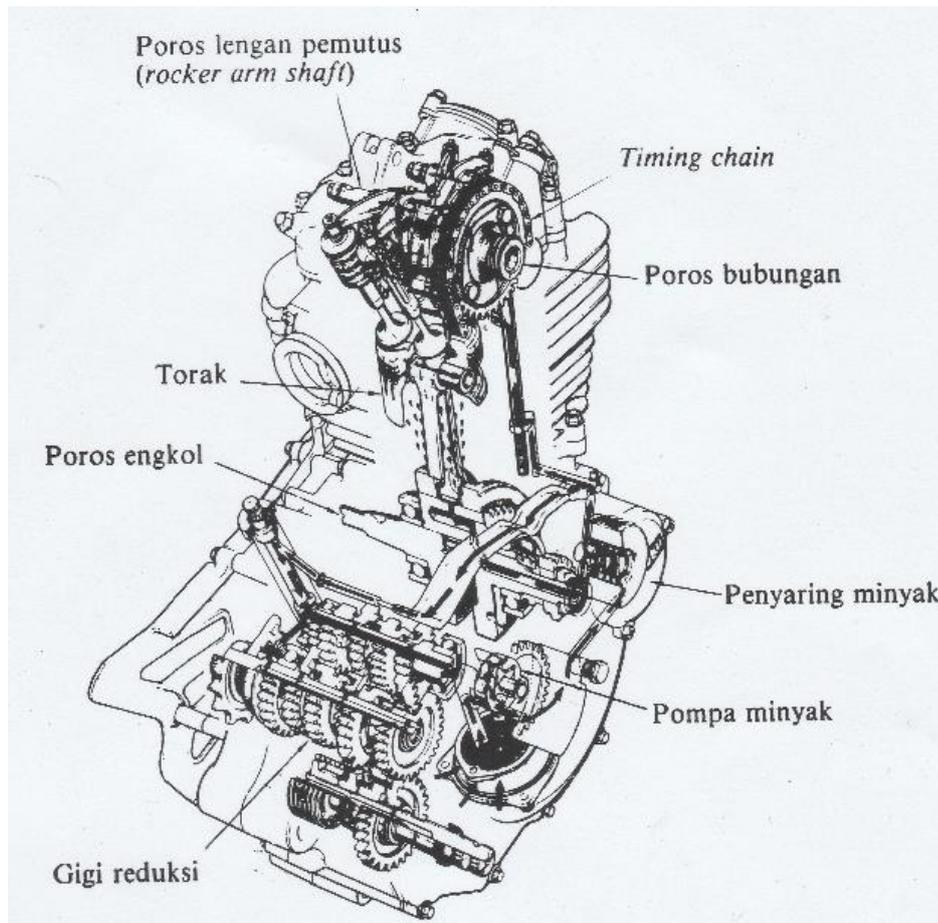


Gambar 2.13 Sistem pelumasan basah (Daryanto, 2004)

4. Sistem pelumasan motor 4 langkah

Minyak pelumas motor ini disimpan pada tangki oli kemudian dialirkan ke bagian yang berputar di dalam mesin motor menggunakan pompa oli. Saluran dan sistem pengaliran minyak pelumas tiap-tiap motor berbeda, tetapi umumnya seperti yang terlihat pada gambar 2.14 dengan menggunakan tiga cara yaitu:

- Minyak pelumas mengalir melalui bantalan utama dari poros engkol menuju ke kepala batang torak lalu minyak pelumas tersebut disemprotkan untuk melumasi torak dan *silinder head*
- Minyak pelumas mengalir melalui saluran yang terdapat di dalam silinder kemudian melalui poros penghubung lalu pelumas tersebut disemprotkan untuk melumasi lengan pemutus dan porosnya
- Minyak pelumas dipompakan oleh kedua poros yang terdapat pada rumah transmisi kemudian setelah minyak pelumas melumasi roda gigi, minyak pelumas tersebut mengalir kembali melalui celah antar poros yang pada akhirnya melumasi kopling



Gambar 2.14 Sistem pelumasan motor 4 langkah (Daryanto, 2004)

2.2.2 Viskositas

2.2.2.1 Pengertian Viskositas

Nugroho (2012) menjelaskan bahwa viskositas merupakan suatu kekentalan gesekan internal fluida. Viskositas juga merupakan tahanan fluida untuk mengalir dari suatu sistem yang mendapatkan tekanan. Semakin kental suatu cairan maka gaya yang dibutuhkan untuk membuatnya mengalir juga semakin besar. Viskositas pada umumnya terbagi dalam dua zat yaitu zat cair dan gas. Viskositas pada zat cair merupakan zat fluida yang secara visual dapat dilihat reaksi kekentalannya dan mengalir pada satu tempat ke tempat lainnya dengan gaya kohesi antarmolekul. Sedangkan viskositas pada gas berpengaruh pada suhu di mana ketika suhu meningkat aktivitas molekulernya juga meningkat.

2.2.2.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi Viskositas

Rana (2015) menjelaskan beberapa faktor yang mempengaruhi viskositas adalah sebagai berikut:

1. Temperatur

Pengaruh temperatur terhadap viskositas pada zat cair dan gas akan berbeda. Pada zat cair, jika temperatur naik maka viskositasnya akan menurun. Sedangkan pada zat gas, jika temperaturnya naik maka viskositasnya juga akan naik.

2. Tekanan

Tekanan akan berpengaruh terhadap viskositas zat cair, sedangkan viskositas gas tidak dipengaruhi oleh tekanan.

3. Ukuran dan berat molekul

Viskositas akan naik seiring dengan bertambahnya ukuran molekul. Jika ikatan rangkap antarmolekul semakin banyak maka viskositas akan mengalami kenaikan.

4. Konsentrasi larutan

Konsentrasi larutan berbanding lurus dengan viskositas. Suatu larutan dengan konsentrasi tinggi akan memiliki viskositas yang tinggi pula karena konsentrasi larutan menyatakan bahwa banyaknya partikel zat yang terlarut tiap satuan volume. Semakin banyak partikel yang terlarut maka gesekan antar partikel semakin tinggi dan viskositasnya semakin tinggi pula.

5. Kehadiran zat lain

Adanya zat aditif akan menaikkan viskositas minyak pelumas. Penambahan air pada minyak atau gliserin menyebabkan viskositasnya menurun karena minyak ataupun gliserin akan semakin encer pada waktu alirannya cepat.

6. Kekuatan antar molekul

Adanya ikatan molekul hidrogen mengakibatkan naiknya viskositas zat cair. Viskositas molekul CPO dengan gugus OH pada *trigliserida* naik dalam keadaan yang sama.

2.2.2.3 Alat Ukur Viskositas

Nilai viskositas suatu zat dapat diukur menggunakan alat yang bernama viskometer. Ada beberapa tipe viskometer yang sering digunakan yaitu sebagai berikut:

1. Viskometer kapiler

Pada viskometer kapiler atau biasa disebut viskometer ostwald, viskositas cairan ditentukan dengan cara mengukur waktu yang dibutuhkan oleh cairan tersebut untuk melewati dua tanda melalui pipa kapiler. Waktu alir dari cairan yang diuji akan dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan bagi suatu zat yang viskositasnya sudah diketahui (biasanya air) untuk melewati dua tanda tersebut.

Adapun cara penggunaannya adalah sebagai berikut:

- a. Memastikan bahwa viskometer yang akan digunakan sudah bersih
- b. Memasukkan cairan ke dalam viskometer menggunakan pipet
- c. Cairan akan dihisab oleh *pushball* sampai melewati 2 batas
- d. Menyiapkan *stopwatch*, kemudian cairan dinaikkan sampai batas pertama lalu memulai penghitungan



Gambar 2.15 Viskometer kapiler

- e. Mencatat hasil, kemudian melakukan penghitungan menggunakan rumus
- f. Saat melakukan penghitungan diusahakan menggenggam bagian lengan yang tidak berisi cairan

2. Viskometer Hoppler

Berdasarkan hukum *stokes*, pada kecepatan bola maksimum akan terjadi keseimbangan sehingga gaya gesek = gaya berat. Prinsip kerjanya yaitu bola (yang terbuat dari kaca) menggelinding melalui tabung gelas berisi zat cair yang akan diselidiki. Kecepatan jatuhnya bola merupakan fungsi dari *resiprok* sampel. Adapun cara penggunaannya adalah sebagai berikut:

- a. Mengukur diameter bola
- b. Menimbang massa bola
- c. Mengukur panjang tabung viskometer dari batas atas sampai batas bawah
- d. Menentukan massa jenis masing-masing cairan
- e. Mengukur temperatur alat viskositas *Hoppler*
- f. Mengisi tabung dengan *aquades* dan dimasukkan bola
- g. Pada saat bola diatas, *stopwatch* dihidupkan
- h. Pada saat bola dibawah, *stopwatch* dimatikan



Gambar 2.16 Viskometer Hoppler

- i. Mencatat waktu bola jatuh dari batas atas sampai batas bawah
- j. Membalikkan tabung
- k. Mengulangi prosedur 3–6 sebanyak tiga kali berturut-turut pada temperatur lain dan cairan yang berbeda

3. Viskometer *Cup* dan *Bob*

Prinsip kerjanya yaitu sampel dimasukkan ke dalam ruangan antara dinding luar *rotor* dan dinding mangkuk (*cup*) yang sesuai dengan *rotor* tersebut. Kelemahan viskometer ini adalah terjadinya aliran sumbat yang disebabkan oleh geseran yang tinggi di sepanjang keliling bagian *tube* sehingga menyebabkan penurunan konsentrasi. Penurunan konsentrasi ini menyebabkan bagian tengah zat yang ditekan keluar memadat. Hal ini disebut sebagai aliran sumbat.



Gambar 2.17 Viskometer Cup dan Bob

4. Viskometer *Cone* dan *Plate*

Cara pemakaiannya yaitu sampel ditempatkan di tengah-tengah papan, kemudian dinaikkan hingga posisi di bawah kerucut. Kerucut digerakkan oleh motor dengan variasi kecepatan kemudian sampel digeser ke dalam ruang semi transparan yang diam lalu kerucut yang berputar. Ada beberapa parameter yang mempengaruhi akurasi viskometer ini yaitu sebagai berikut:

- a. Ukuran sampel
- b. Waktu yang dibutuhkan untuk menstabilkan sampel pada pelat sebelum terbaca

- c. Kebersihan kerucut dan pelat
- d. Jenis bahan, tinggi atau rendahnya viskositas, dan ukuran partikel
- e. Tipe *cone*
- f. *Shear rate*

Adapun prosedur kalibrasi untuk viskometer *Cone* dan *Plate* yaitu:

- a. Mengatur jarak antara *cone spindle* dengan *plate* sesuai dengan instruksi manual
- b. Memilih viskositas standar yang akan memberikan nilai pembacaan antara 10% hingga 100% dari *Full Scale Range* (FSR). Sebaiknya memilih standar dengan nilai yang mendekati 100% FSR
- c. Memasukkan sampel ke dalam *cup* dan membiarkannya selama 15 menit untuk mencapai suhu *setting*
- d. Melakukan pengukuran dan mencatat hasilnya baik % *Torque* dan cP

Catatan:

- a) *Spindle* harus berputar minimum 5 putaran sebelum pengukuran diambil
- b) Penggunaan standar pada rentang 5 cP s.d. 5.000 cP dianjurkan untuk *instrument cone/plate*. Jangan menggunakan viskositas standar di atas 5.000 cP.



Gambar 2.18 Viskometer *Cone* dan *Plate*

2.2.2.4 Jenis-jenis Viskositas Minyak Pelumas

Menurut Shigley (2004), viskositas minyak pelumas terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. Viskositas dinamis (absolut)

Viskositas dinamis atau absolut adalah rasio tegangan geser yang dihasilkan ketika fluida mengalir. Dalam satuan SI diukur dalam *pascal*-detik atau Newton detik per meter persegi, akan tetapi satuan *centimeter*-gram-detik (cgs) lebih diterima secara luas.

$$1 \text{ centipoise (cP)} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

Centipoise merupakan satuan viskositas yang digunakan dalam perhitungan berdasarkan persamaan *Reynolds* dan berbagai persamaan pelumasan *elastohydro dynamic*.

2. Viskositas kinematis

Viskositas kinematis adalah hasil bagi viskositas dinamis dengan kepadatan. Dalam unit SI yaitu meter persegi per detik, akan tetapi satuan cgs lebih diterima secara luas.

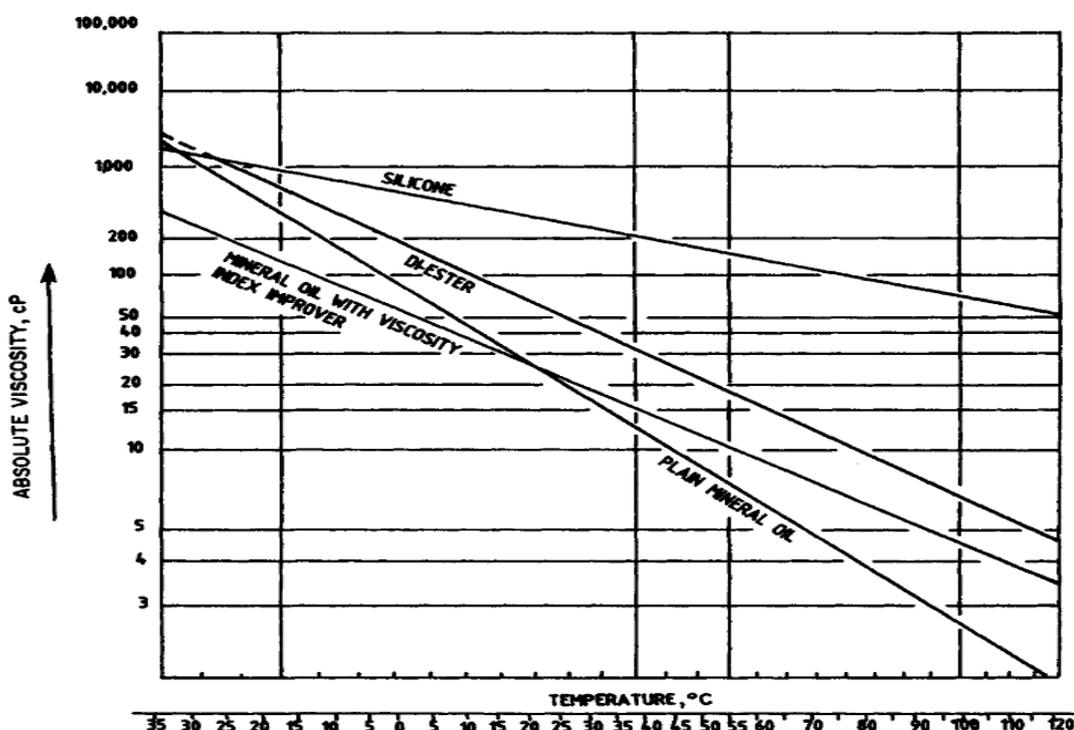
$$1 \text{ centistoke (cSt)} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Centistoke merupakan unit yang paling sering dikutip oleh pemasok dan pengguna minyak pelumas. Dalam praktiknya, perbedaan antara viskositas kinematis dan dinamis tidak terlalu penting untuk minyak pelumas karena kepadatan pada suhu operasi biasanya terletak antara 0,8 dan 1,2. Namun, untuk beberapa minyak pelumas sintesis (*fluorinated*) dengan kepadatan tinggi dan untuk gas, perbedaannya bisa sangat signifikan. Viskositas dari minyak pelumas kebanyakan adalah antara 10 dan 600 (cSt) pada suhu operasi, dengan angka rata-rata sekitar 90 cSt. Beberapa ciri viskositas yang berkisar pada suhu operasi ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 *Typical Operating Viscosity Ranges* (Shigley, 2004)

Lubricant	Viscosity range, cSt
Clocks and instrument oils	5-20
Motor oils	10-50
Roller bearing oils	10-300
Plain bearing oils	20-1500
Medium-speed gear oils	50-150
Hypoid gear oils	50-600
Worm gear oils	200-1000

Indeks viskositas mendefinisikan hubungan antara viskositas dan temperatur minyak pelumas pada skala tinggi dibandingkan dengan dua minyak pelumas standar. Gambar 2.19 menunjukkan perubahan viskositas terhadap temperatur untuk beberapa minyak pelumas yang khas. Sebuah grafik presentasi jenis ini adalah cara yang paling berguna untuk menampilkan informasi ini, akan tetapi jauh lebih umum untuk mengutip indeks viskositas.



Gambar 2.19 Grafik indeks viskositas dengan temperatur (Shigley, 2004)

Perhitungan indeks viskositas sampel minyak pelumas dapat dilihat pada persamaan 2.1.

$$VI = \frac{100(L-U)}{L-H} \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

VI : indeks viskositas (*viscosity index*)

L : viskositas kinematis (cSt) pada 40°C dari minyak pelumas dengan indeks viskositas = 0 yang mempunyai viskositas kinematis pada 100°C sama dengan minyak pelumas yang indeks viskositasnya dicari

U : viskositas sampel di *centistokes* 40°C

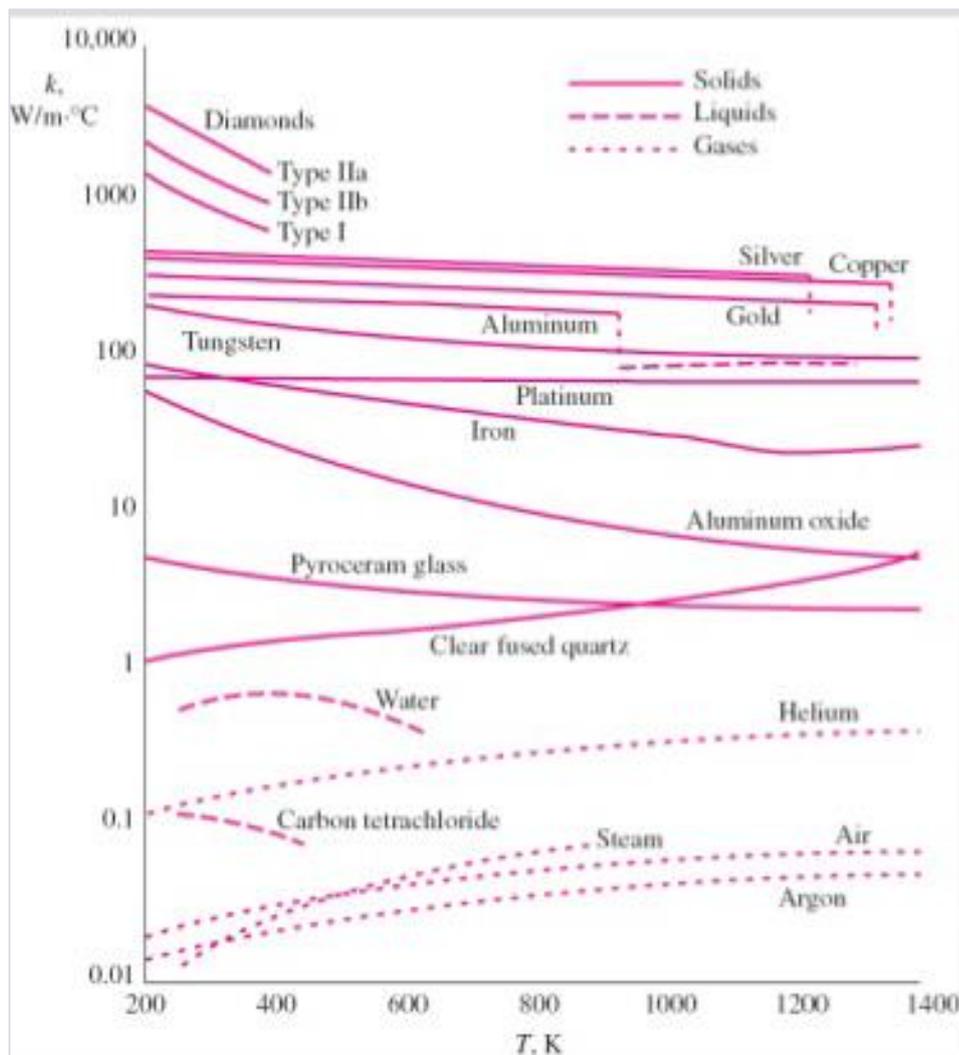
H : viskositas kinematis (cSt) pada 40°C dari minyak pelumas dengan indeks viskositas = 100 yang mempunyai viskositas kinematis pada 100°C sama dengan minyak pelumas yang indeks viskositasnya dicari

2.2.3 Konduktivitas Termal Fluida

2.2.3.1 Perpindahan Kalor

Menurut Nurcahyadi (2016), perpindahan kalor merupakan suatu perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur. Perpindahan kalor dapat terjadi dengan tiga mekanisme: konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi adalah perpindahan kalor yang terjadi tanpa adanya gerakan makroskopis dari mediumnya. Konduksi tidak hanya terjadi pada medium padat saja. Konduksi juga dapat terjadi pada medium cair atau gas asalkan kedua medium tersebut dalam kondisi diam. Masing-masing jenis medium memiliki kemampuan memindahkan kalor secara konduksi yang berbeda-beda. Kemampuan suatu medium untuk memindahkan kalor secara konduksi disebut sebagai konduktivitas termal.

Gambar 2.20 di bawah merupakan data konduktivitas termal dari suatu benda (padat, cair, dan gas) yang dijelaskan oleh Yunus A. Cengel dalam bukunya berjudul “*Heat Transfer A Practical Approach*”. Dalam buku tersebut juga terdapat rumus dan data spesifik untuk menghitung laju perpindahan kalor konduksi.



Gambar 2.20 Variasi konduktivitas termal berbagai jenis benda pada berbagai temperatur (Cengel, 2003)

Holman (1993) menjelaskan bahwa terdapat tiga jenis perpindahan kalor yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Berikut merupakan metode perpindahan kalor yang terjadi:

1. Perpindahan kalor konduksi

Holman (1993) menyatakan apabila suatu benda terdapat gradien suhu (*temperature gradient*), akan terjadi perpindahan energi dari suhu tinggi menjadi suhu rendah. Maka energi akan berpindah secara konduksi dan laju perpindahan kalor berbanding lurus dengan gradien suhu normal. Berdasarkan daya hantarnya, perpindahan kalor konduksi memiliki dua zat yaitu:

a. Konduktor yaitu zat yang mudah menghantarkan kalor

Contoh: baja

b. Isolator yaitu zat yang sulit menghantarkan kalor

Contoh: kayu

Untuk menghitung laju perpindahan kalor konduksi dapat menggunakan persamaan 2.2.

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

\dot{Q}_{cond} : laju perpindahan kalor konduksi (W)

k : konduktivitas termal (W/m.K)

A : luas penampang (m²)

ΔT : perubahan suhu (K)

L : panjang (m)

2. Perpindahan kalor konveksi

Holman (1993) menyatakan bahwa suatu pelat logam panas akan menjadi lebih cepat dingin apabila diletakkan di depan kipas angin dibandingkan dengan terkena udara bebas. Perpindahan panas yang disebabkan adanya gerakan pencampuran dari bagian panas ke bagian dingin dinamakan konveksi. Perpindahan kalor konveksi dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Konveksi alami, merupakan perpindahan kalor melalui zat yang disertai dengan perpindahan partikel zat akibat perbedaan massa jenis. Contoh: proses pemanasan air.

b. Konveksi Paksa, merupakan perpindahan kalor melalui zat yang disertai dengan perpindahan partikel zat akibat perbedaan temperatur. Contoh: pendinginan mesin mobil.

Untuk menghitung laju perpindahan kalor konveksi dapat menggunakan persamaan 2.3.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

\dot{Q}_{conv} : laju perpindahan kalor konveksi (W)

h : koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m².K)

A_s : luas permukaan (m²)

ΔT : perubahan suhu (K)

3. Perpindahan kalor radiasi

Perpindahan kalor yang terjadi secara langsung atau tanpa memerlukan bahan perantara dinamakan radiasi. Umumnya perpindahan kalor ini berupa pancaran seperti pancaran sinar matahari atau api unggun yang mengenai kulit manusia. Holman (1993) menyatakan bahwa perpindahan kalor konduksi dan konveksi terjadi melalui bahan perantara, sedangkan pengecualian untuk perpindahan kalor radiasi. Untuk menghitung laju perpindahan kalor radiasi dapat menggunakan persamaan 2.4.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

\dot{Q}_{rad} : laju perpindahan kalor radiasi (W)

ε : emisivitas permukaan benda

σ : konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K⁴)

A_s : luas permukaan (m²)

T_s : temperatur permukaan benda (K)

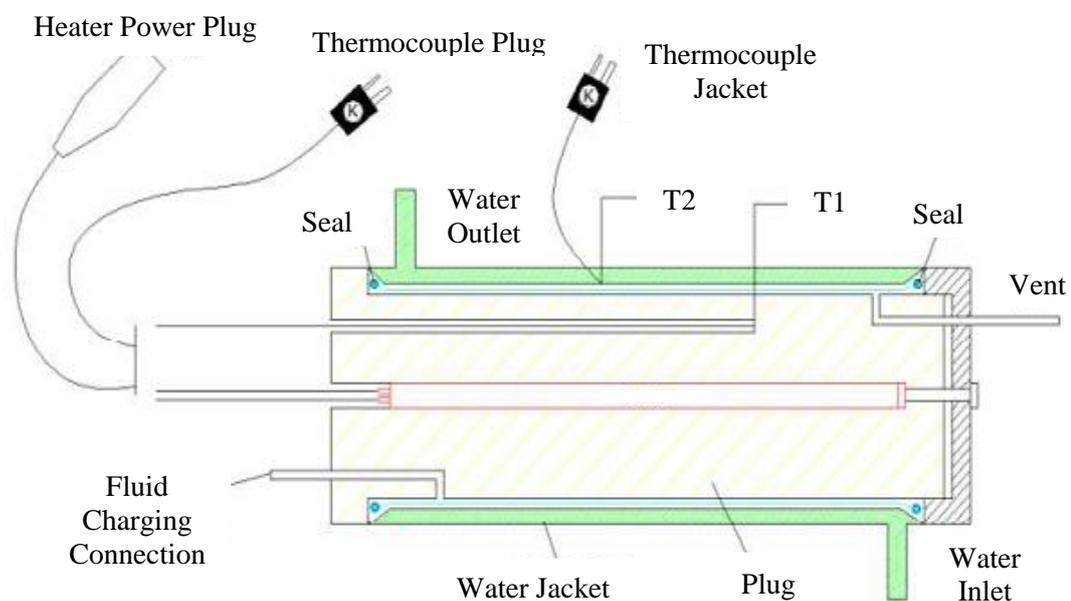
T_{surr} : temperatur lingkungan (K)

2.2.3.2 Pengukuran Konduktivitas Termal

Pengukuran konduktivitas dapat dilakukan dengan metode *steady state cylindrical cell*. Dasar dari pengukuran konduktivitas termal ini berdasarkan pada perbedaan temperatur dari sampel fluida dalam sebuah ruang sempit berbentuk 'annular' (*radial clearance*). Sampel fluida yang konduktivitas termalnya akan diukur harus mengisi ruang kecil di antara sebuah *plug* yang dipanaskan dan sebuah selubung (*jacket*) yang didinginkan oleh air. *Plug* tersebut dipanaskan dengan menggunakan sebuah pemanas bernama *catridge* yang dihasilkan oleh daya yang

dikendalikan melalui *voltmeter* dan *amperemeter* standar yang terpasang pada panel.

Plug merupakan suatu komponen dari bahan alumunium untuk mengurangi konduktivitas termal dan variasi temperatur yang mengandung elemen pemanas berbentuk silinder yang resistensinya dalam suhu kerja (*working temperature*) dengan pengukuran akurat. Ruang bebas tersebut cukup kecil untuk mencegah terjadinya konveksi secara alamiah (*natural convection*) dalam sampel fluida tersebut. Karena *radial clearance* yang relatif kecil, sampel fluida di dalam ruang tersebut dapat digambarkan sebagai lapisan tipis (*lamina*) dari area permukaan (*face area*) l dan ketebalan r terhadap perpindahan panas yang berasal dari *plug* menuju ke selubung. Perhitungan yang diperlukan untuk mengukur konduktivitas termal adalah temperatur *plug* (T_1) dan *jacket* (T_2) dengan menyesuaikan variabel *transformer* (Irawansyah dan Kamal, 2016).



Gambar 2.21 Skema alat konduktivitas termal (Santosa dan Nurcahyadi, 2016)

Adapun rumus untuk perhitungan konduktivitas termal dapat dilihat pada persamaan 2.5 – 2.8.

1. *Elemen heat input*

$$Q_e = V \cdot I \dots\dots\dots (2.5)$$

2. *Temperature different*

$$\Delta t = T1 - T2 \dots\dots\dots (2.6)$$

3. *Conduction heat transfer rate*

$$Q_c = Q_e - Q_i \dots\dots\dots (2.7)$$

4. *Thermal Conductivity*

$$k = \frac{Q_c \cdot \Delta r}{A \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

Q_e : *element heat input (W)*V : *voltage (V)*I : *current (A)* Δt : *temperature different (K)*T₁ : *temperatur plug (°C)*T₂ : *temperatur jacket (°C)*Q_c : *conduction heat transfer rate (W)*Q_i : *incidental heat transfer rate (W)*k : *thermal conductivity (W/m.K)* Δr : *radial clearance, jarak antara plug dan jacket sebesar 0,34 mm*A : *luas efektif antara plug dan jacket sebesar 0,0133 m²***2.2.4 Pengujian Unjuk Kerja Mesin****2.2.4.1 Torsi**

Torsi merupakan ukuran kemampuan suatu mesin untuk melakukan kerja. Torsi termasuk besaran turunan yang digunakan untuk menghitung energi yang di hasilkan oleh benda yang berputar pada porosnya. Torsi atau momen putar motor oleh (Arends & Berenschot, 1980) dirumuskan pada persamaan 2.9.

$$T = F \times r \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

T : *torsi (N.m)*F : *gaya sentrifugal dari benda yang berputar (N)*R : *jarak panjang lengan (m)*

2.2.4.2 Daya

Pengertian daya menurut (Arends & Berenschot, 1980) adalah besarnya kerja motor selama kurun waktu tertentu. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan dinamometer dan tachometer. Untuk menghitung besarnya daya (dalam satuan Watt) pada motor 4 langkah dapat menggunakan persamaan 2.10.

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

P : daya (W)

n : putaran mesin (rpm)

T : torsi (N.m)

2.2.4.3 Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar merupakan ukuran dari suatu bahan bakar yang dikonsumsi oleh motor untuk menghasilkan tenaga mekanis. Laju pemakaian bahan bakar tiap detiknya dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.11.

$$\dot{M}_f = \frac{M_b}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

\dot{M}_f : konsumsi bahan bakar (kg/dt)

M_b : massa bahan bakar (kilogram)

Δt : waktu saat kendaraan diakselerasi (detik)

2.2.4.4. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Konsumsi bahan bakar spesifik merupakan parameter unjuk kerja mesin yang berhubungan dengan nilai ekonomis mesin karena jumlah bahan bakar yang dibutuhkan dapat dihitung. Adapun rumus konsumsi bahan bakar spesifik dapat dilihat pada persamaan 2.12.

$$SFC = \frac{\dot{M}_f}{P} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

SFC : konsumsi bahan bakar spesifik (kg/W.dt)

\dot{M}_f : konsumsi bahan bakar (kg/dt)

P : daya poros efektif (W)

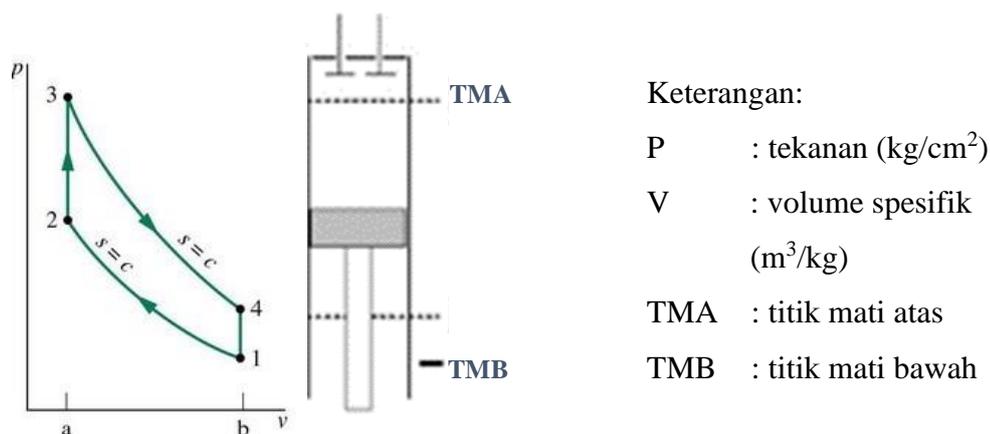
2.2.5 Siklus Termodinamika

Proses termodinamika dan kimia yang terjadi di dalam motor bakar torak sangat menarik untuk dianalisis. Untuk mempermudah proses analisis tersebut perlu diberikan gambaran tentang suatu keadaan yang ideal. Untuk menganalisis motor bakar digunakan siklus udara sebagai siklus yang baik. Di dalam siklus udara terdapat tiga jenis siklus yaitu sebagai berikut:

1. Siklus udara volume konstan (siklus otto)
2. Siklus udara tekanan konstan (siklus diesel)
3. Siklus udara tekanan terbatas (siklus gabungan)

2.2.5.1 Siklus Otto

Siklus otto merupakan siklus yang terjadi pada motor bensin. Siklus ini dapat digambarkan oleh diagram P-V seperti pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Diagram P dan V dari siklus otto (Arismunandar, 1988)

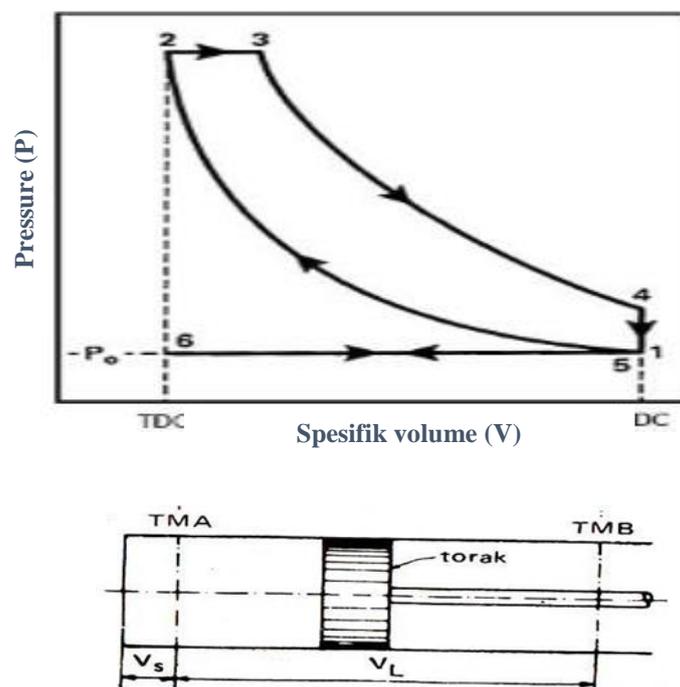
Penjelasan:

1. Langkah 0-1 merupakan langkah hisap, di mana udara dan bahan bakar masuk ke dalam silinder
2. Langkah 1-2 merupakan langkah pemampatan, di mana udara dan bahan bakar ditekan dengan cara adiabatik
3. Langkah 2-3 merupakan langkah pembakaran dengan volume konstan
4. Langkah 3-4 merupakan langkah ekspansi gas dari proses pembakaran
5. Langkah 4-1 merupakan pembuangan gas panas dari proses pembakaran

6. Langkah 1-0 merupakan langkah buang energi panas

2.2.5.2 Siklus Diesel

Siklus diesel merupakan siklus yang terjadi pada mesin diesel atau mesin yang menggunakan bahan bakar solar. Siklus ini digambarkan oleh diagram P-V seperti pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Diagram P dan V dari siklus diesel (Arismunandar, 1988)

Keterangan:

P	: tekanan (kg/cm^2)	V_s	: volume sisa
V	: volume spesifik (m^3/kg)	TMA	: titik mati atas
V_L	: volume langkah piston	TMB	: titik mati bawah

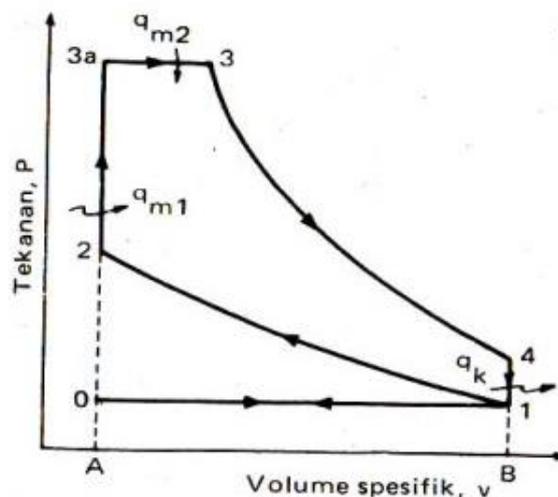
Penjelasan:

1. Fluida yang bekerja merupakan gas ideal dalam kalor spesifik yang konstan
2. Langkah hisap (0-1) adalah proses bertekanan konstan
3. Langkah kompresi (1-2) adalah isentropik
4. Proses terjadinya pembakaran sebagai proses pemasukan volume yang konstan
5. Langkah kerja (2-3) adalah langkah isobar

6. Proses pembuangan (4-1) yang dianggap sebagai proses pembuangan energi panas pada volume yang konstan
7. Langkah buang (1-0) adalah proses tekanan konstan
8. Siklus dianggap tertutup yang artinya siklus ini berlangsung menggunakan fluida yang sama atau gas yang ada di dalam silinder saat langkah buang, tetapi saat langkah hisap berikutnya yang akan masuk adalah sejumlah fluida kerja yang sama.

2.2.5.3 Siklus Gabungan

Siklus gabungan ialah suatu siklus di mana adanya persamaan antara siklus motor bensin dengan siklus motor diesel pada proses pembakaran di dalam silinder. Siklus ini dapat dilihat pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Siklus gabungan (Arismunandar, 1988)

Penjelasan:

1. Langkah 0-1 adalah pemasukan bahan bakar pada tekanan konstan
2. Langkah 1-2 terjadinya kompresi
3. Langkah 2-3 adalah langkah pemasukan kalor
4. Langkah 3-4 terjadinya ekspansi isentropik
5. Langkah 4-1 terjadinya pembuangan kalor pada volume konstan
6. Langkah 1-0 adalah pembuangan gas buang pada tekanan konstan