

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lingkungan Hidup

Menurut Undang-Undang Pengelolaan Lingkungan Hidup Nomor 23 Tahun 1997, yang dimaksud dengan Lingkungan Hidup adalah kesatuan ruang dengan semua benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup termasuk manusia dan perilakunya yang mempengaruhi perikehidupan dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lain.

Pencemaran lingkungan hidup adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas turun sampai kualitas tertentu yang menyebabkan lingkungan tidak dapat lagi sesuai dengan peruntukannya. Pencemaran lingkungan dapat berbentuk pencemaran air, tanah maupun udara yang semuanya itu akan membawa dampak negatif terhadap manusia. Dampak pencemaran lingkungan tidak hanya berpengaruh dan berakibat kepada lingkungan alam saja, akan tetapi berakibat dan berpengaruh terhadap kehidupan tanaman, hewan dan juga manusia.

2.2 Pencemaran Udara

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara pasal 1, yang dimaksud dengan pencemaran udara adalah masuknya zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam

udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ketinggian tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya.

Perubahan lingkungan udara pada umumnya disebabkan pencemaran udara, yaitu masuknya zat pencemar (berbentuk gas-gas dan partikel kecil/aerosol) ke dalam udara. Masuknya zat pencemaran udara dapat secara alamiah, juga sebagian besar disebabkan oleh kegiatan manusia, misalnya akibat aktivitas transportasi.

Udara di alam tidak pernah ditemukan bersih tanpa polutan sama sekali. Beberapa gas seperti sulfur dioksida (SO_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan karbon monoksida (CO) selalu dibebaskan ke udara sebagai produk sampingan dari proses-proses alami seperti aktivitas vulkanik, pembusukan sampah tanaman, kebakaran hutan, dan sebagainya. Selain disebabkan polutan alami tersebut, polusi udara juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia.

2.2.1 Sumber Pencemar Udara

Pembangunan yang berkembang pesat dewasa ini, khususnya dalam industri dan teknologi, serta meningkatnya jumlah kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil (minyak) menyebabkan udara yang kita hirup disekitar kita menjadi tercemar oleh gas-gas buangan hasil pembakaran.

Sumber polusi yang utama berasal dari transportasi, dengan hasil 60 % dari polutan yang dihasilkan terdiri dari karbon monoksida dan sekitar 15 % terdiri dari hidrokarbon. Polutan yang utama adalah karbon monoksida yang mencapai hampir setengahnya dari seluruh polutan yang ada.

Tabel 2.1 Perkiraan Persentase Komponen Pencemar Udara dari Sumber Pencemar Transportasi di Indonesia.

Komponen Pencemar	Persentase
CO	70.50%
NO _x	8.89%
SO _x	0.88%
HC	18.34%
Partikel	1.33%
Total	100%

(Sumber : Wardhana, 2001)

Pencemaran udara akibat aktivitas manusia (kegiatan antropogenik), secara kuantitatif sering lebih besar. Untuk kategori ini sumber-sumber pencemaran dibagi dalam pencemaran akibat transportasi, industri, dari persampahan, baik akibat proses dekomposisi ataupun pembakaran, dan rumah tangga.

Pencemaran udara akibat kegiatan transportasi yang sangat penting adalah akibat kendaraan bermotor. Kendaraan bermotor merupakan sumber pencemaran udara yaitu dengan dihasilkannya gas CO, NO_x, hidrokarbon, SO₂ dan tetraethyl lead, yang merupakan bahan logam timah yang ditambahkan ke dalam bensin berkualitas rendah untuk meningkatkan nilai oktan untuk mencegah terjadinya letupan pada mesin.

Dalam memperkirakan dan menilai dampak yang timbul terhadap lingkungan udara, sumber (rencana kegiatan) umumnya dikelompokkan dalam beberapa golongan :

1. Sumber titik, yang termasuk di dalam kelompok ini adalah titik cerobong asap industri.

2. Sumber garis, yang merupakan integrasi dari sumber-sumber titik yang tak terhingga banyaknya, sehingga dapat dianggap menjadi sumber garis yang seluruhnya memancarkan pencemar udara contohnya adalah jalan raya yang mengemisikan CO, HC, NO_x, partikulat, SO_x.
3. Sumber area, yang sebenarnya merupakan integrasi dari banyak sumber titik dan sumber garis.

2.2.2 Polutan Udara

Polutan udara dibagi menjadi dua yaitu :

1. Berdasarkan dari kegiatan terbentuknya pencemar terdiri dari :
 - a. Pencemar primer (yang diemisikan langsung oleh sumbernya) yaitu polutan yang mencakup 90% dari polutan udara seluruhnya.
 - b. Pencemar sekunder, yang terbentuk karena reaksi di udara antara berbagai zat.
2. Dilihat dari ciri fisik bahan pencemar dapat berupa :
 - a. Partikel (debu, aerosol, timah hitam)
 - b. Gas (CO, NO_x, H₂S, hidrokarbon)
 - c. Energi (suhu dan kebisingan)

Ada 5 (enam) polutan utama yang ditimbulkan oleh kendaraan bermotor yaitu :

1. Karbon monoksida (CO)
2. Hidrokarbon (HC)
3. Nitrogen oxides (NO_x)
4. Sulfur dioksida (SO_x)

5. Partikel

Toksisitas kelima kelompok polutan tersebut berbeda-beda dan tabel 2.2 menyajikan toksisitas relatif masing-masing kelompok polutan tersebut.

Tabel 2.2 Toksisitas Relatif Polutan Udara.

Polutan	Level Toleransi		Toksisitas Relatif
	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
CO	32.0	10.000	1.00
HC		19.300	2.07
SO _x	0.50	1.430	28.0
NO _x	0.25	514	77.8
Partikel		375	106.7

(Sumber : Fardiaz, 1992)

Ternyata polutan yang paling berbahaya bagi kesehatan adalah partikel-partikel, diikuti berturut-turut dengan NO_x, SO_x, hidrokarbon, dan yang paling rendah toksisitasnya adalah karbon monoksida.

2.3 Ambien dan Emisi Zat Pencemar Udara

2.3.1 Ambien

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara Pasal 1, yang dimaksud dengan udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yuridiksi RI yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan unsur lingkungan hidup lainnya. Baku mutu udara ambien adalah ukuran batas/kadar zat, energi dan/ atau yang seharusnya ada dan/ atau unsur pencemar yang ditanggung keberadaannya dalam udara ambien.

2.3.2 Emisi

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara Pasal 1, yang dimaksud dengan emisi, sumber bergerak, dan ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor adalah sebagai berikut :

1. Emisi adalah zat, energi, dan/ atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan/ atau dimasukkan ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/ atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar.
2. Sumber emisi adalah setiap usaha dan/ atau kegiatan yang mengeluarkan emisi dari sumber bergerak, sumber spesifik, sumber tidak bergerak, maupun bergerak tidak spesifik.
3. Ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor adalah batas maksimum zat atau bahan pencemar yang boleh dikeluarkan langsung dari pipa gas buang kendaraan bermotor.

2.4 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah suatu komponen tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa yang terdapat dalam bentuk gas pada suhu di atas -192°C . komponen ini mempunyai berat sebesar 96.5 % dari berat air dan tidak larut di dalam air.

2.4.1 Sumber Karbon Monoksida

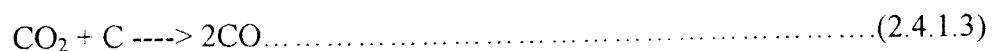
Sumber karbon monoksida yang terdapat di alam terbentuk dari salah satu proses sebagai berikut :

1. Pembakaran tidak lengkap terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon. Oksidasi tidak lengkap terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon terjadi jika jumlah oksigen yang tersedia kurang dari jumlah yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna dimana dihasilkan karbon monoksida. Secara sederhana pembakaran karbon dalam minyak bakar terjadi melalui beberapa tahap sebagai berikut :



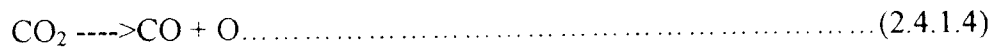
Pencampuran yang tidak rata antara minyak bakar dengan udara menghasilkan beberapa tempat atau area yang kekurangan oksigen. Semakin rendah perbandingan antara udara dan minyak bakar, semakin tinggi jumlah karbon monoksida yang dihasilkan.

2. Reaksi antara monoksida dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi. Reaksi ini dapat menghasilkan karbon monoksida dengan reaksi sebagai berikut :



3. Pada suhu tinggi, karbon dioksida terurai menjadi karbon monoksida dan O. Pada kondisi dimana jumlah oksigen cukup melakukan pembakaran lengkap terhadap karbon kadang-kadang terbentuk juga CO. Keadaan ini disebabkan pada suhu tinggi CO₂ akan terdisosiasi menjadi CO dan O. Karbon dioksida dan CO

terdapat pada keadaan ekuilibrium pada suhu tinggi dengan reaksi sebagai berikut :



2.4.2 Penyebaran Karbon Monoksida

Penyebaran karbon monoksida di udara tergantung pada keadaan lingkungan. Untuk daerah perkotaan yang banyak kegiatan industrinya dan lalu lintasnya padat, udaranya sudah banyak tercemar gas CO. Ternyata tanah yang masih terbuka dimana belum ada bangunan di atasnya, dapat membantu penyerapan gas CO. Hal ini disebabkan mikroorganisme yang ada di dalam tanah mampu menyerap gas CO yang terdapat di udara. Angin dapat mengurangi konsentrasi gas CO pada suatu tempat karena dipindahkan ke tempat lain.

Karena kendaraan bermotor merupakan sumber polutan CO yang utama (sekitar 59,2 %), maka daerah-daerah yang berpendudukan padat dengan lalu lintas sampai memperlihatkan tingkat polusi CO yang tinggi. Konsentrasi CO di udara perwaktu dalam satu hari dipengaruhi oleh kesibukan atau aktivitas kendaraan bermotor yang ada. Konsentrasi CO di udara pada tempat tertentu dipengaruhi oleh kecepatan emisi (pelepasan) CO di udara dan kecepatan dispersi dan pembersihan CO di udara. Pada daerah perkotaan kecepatan pembersihan CO dari udara sangat lambat, oleh karena kecepatan dispersi dan pembersihan CO dari udara sangat menentukan konsentrasi CO di udara. Kecepatan dispersi dipengaruhi langsung oleh faktor-faktor meteorologi seperti kecepatan dan arah angin, turbulen udara, dan stabilitasi atmosfer.

Jika dilihat dari sumber-sumber yang memproduksi CO, maka seharusnya pencemaran CO di udara cukup tinggi. Tetapi ternyata hal ini tidak terjadi, dengan kata lain jumlah pencemaran CO di udara jauh lebih kecil dibandingkan dengan jumlah yang dilepaskan di atmosfer. Mekanisme alami dimana karbon monoksida hilang dari udara telah banyak diteliti, dan pembersihan CO dari udara kemungkinan terjadi karena beberapa proses sebagai berikut :

1. Reaksi atmosfer yang berjalan sangat lambat sehingga jumlah CO yang hilang sangat sedikit.
2. Aktivitas mikroorganisme yang terdapat dalam tanah dapat menghilangkan CO dengan kecepatan relatif tinggi dari udara.

Kecepatan reaksi yang mengubah CO menjadi CO₂ ($2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$) yang terjadi pada atmosfer bawah hanya dapat menghilangkan sekitar 0.1 % dari CO yang ada perjam dengan adanya matahari. Berdasarkan kecepatan ini, CO di atmosfer diperkirakan mempunyai umur rata-rata 3.5 bulan.

Berbagai mikroorganisme yang terdapat di dalam tanah dapat menghilangkan CO dari udara secara cepat. Sebagai contoh suatu percobaan menggunakan pot yang diisi tanah dengan berat 2.8 kg dan yang ditempatkan dalam suatu ruangan tertentu 20 ppm CO, ternyata dalam waktu 3 jam semua CO dapat dihilangkan dari udara. Jika pot berisi tanah tersebut disterilkan terlebih dahulu, ternyata kemampuan untuk membersihkan CO dari udara hilang. Dari penelitian tersebut telah berhasil di isolasi sebanyak 200 organisme, dan ternyata yang aktif dalam pembersihan CO terutama adalah fungi yaitu sebanyak 16 spesies.

Meskipun tanah dengan mikroorganisme di dalamnya dapat berfungsi dalam pembersihan CO di atmosfer, tetapi kenaikan konsentrasi CO di udara masih terjadi. Hal ini disebabkan tanah yang tersedia tidak tersebar rata, bahkan di daerah-daerah dimana produksi CO sangat tinggi kadang-kadang persediaan tanah sangat terbatas.

2.4.3 Pengaruh Karbon Monoksida Terhadap Lingkungan

2.4.3.1 Pengaruh CO Terhadap Tanaman

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemberian CO selama 1 sampai 3 minggu pada konsentrasi sampai pada 100 ppm tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap tanaman tingkat tinggi. Akan tetapi kemampuan akan fiksasi nitrogen oleh bakteri bebas akan terhambat dengan pemberian CO selama 35 jam pada konsentrasi 2000 ppm. Karena konsentrasi CO di udara jarang mencapai 100 ppm, meskipun dalam waktu sebentar, maka pengaruh CO terhadap tanaman biasanya tidak terlihat secara nyata.

2.4.3.2 Pengaruh CO Terhadap Manusia

Gas CO adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau, bersifat mematikan manusia dalam beberapa menit pada kadar lebih dari 5000 ppm. CO bereaksi dengan hemoglobin dalam darah membentuk senyawa *carboxyhemoglobin* (COHb). Hemoglobin lebih reaktif dengan CO dibanding terhadap oksigen, sehingga membentuk COHb efektif sekali pada pengusiran oksigen. Pada COHb kadar 5 sampai 10 %, persepsi visual, keterampilan manual, dan keterampilan belajar akan terganggu. Pada konsentrasi 30 ppm CO dalam waktu 8 jam akan terjadi kadar COHb

7.5 %. Pada kadar 2.5 – 3 % orang akan terkena penyakit jantung, dan tidak akan mampu menampilkan latihan-latihan tertentu sebagaimana yang dapat dilakukan oleh orang yang tidak memiliki COHb. Pada konsentrasi CO 20 ppm dalam waktu 8 jam akan menghasilkan kadar COHb 2.8 %.

Afinitas CO terhadap hemoglobin adalah 200 kali lebih tinggi dari pada afinitas oksigen terhadap hemoglobin, akibatnya jika CO dan SO₂ terdapat bersama-sama di udara akan membentuk COHb dalam jumlah yang lebih banyak daripada O₂Hb. Faktor penting yang menentukan pengaruh CO terhadap tubuh manusia adalah konsentrasi COHb yang terdapat di dalam darah, dimana semakin tinggi persentase hemoglobin yang terikat dalam bentuk COHb, semakin parah pengaruhnya terhadap kesehatan manusia.

Tabel 2.3 Pengaruh Konsentrasi COHb di dalam Darah Terhadap Kesehatan Manusia

Konsentrasi COHb dalam darah (%)	Pengaruh terhadap kesehatan
< 1.0	Tidak ada pengaruh
1.0-2.0	Penampilan agak tidak normal
2.0-5.0	Pengaruhnya terhadap system saraf sentral, reaksi panca indra tidak normal, benda terlihat agak kabur .
≥ 5.0	Perubahan fungsi jantung dan pulmonan
10.0-8.0	Kepala pusing, mual berkunang-kunang, pingsan , sukar bernapas, kematian.

*Stoker dan Seager (1972)
(Sumber : Fardiaz, 1992)

Pada konsentrasi CO tertentu di udara konsentrasi COHb di dalam darah akan mencapai konsentrasi ekuilibrium setelah beberapa waktu tertentu. Secara normal sebenarnya darah mengandung COHb dalam jumlah sekitar 0.5 %. Jumlah ini berasal dari CO yang diproduksi oleh tubuh selama metabolisme pemecahan heme yaitu komponen dari hemoglobin. Persen ekuilibrium COHb di dalam darah manusia yang mengalami kontak dengan CO dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\frac{Co - Hb}{O_2 - Hb} = M \frac{P_{CO}}{P_{O_2}} \dots\dots\dots(2.4.3.2.1)$$

Tabel 2.4 memperlihatkan hasil perhitungan konsentrasi COHb dalam darah menurut rumus tersebut.

Tabel 2.4 Data Ekuilibrium Antara COHb di Dalam Darah Dengan CO di Udara

Konsentrasi CO di udara (ppm)	Konsentrasi ekuilibrium COHb di dalam darah (%)
10	0.99
20	1.96
30	2.91
50	4.76
70	6.54
90	8.25
100	9.09

(Sumber : Fardiaz,1992)

2.5 Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon merupakan ikatan yang tersusun oleh penyusun utamanya adalah karbon ($A_r = 12$) dan atom hydrogen ($A_r = 1$). Ikatan yang dibentuk dapat berupa ikatan-ikatan lurus (ikatan rantai) atau ikatan cincin (ikatan tertutup). Ada dua kemungkinan HC sebagai pencemar udara :

1. HC sebagai emisi akan menjadi bahan pencemar udara apabila HC tidak tercampur rata pada saat pembakaran, sehingga tidak bereaksi dengan oksigen maka HC ini akan keluar dengan gas buangan hasil pembakaran.
2. Kemungkinan lain yang menyebabkan HC menjadi pencemar udara yaitu pada saat HC yang tidak ikut terbakar dengan oksigen mengalami *cracking* akibat suhu yang tinggi dari hasil pembakaran.

Ikatan karbon, jumlah atom karbon dalam senyawa hidrokarbon akan menentukan bentuk hidrokarbon, apakah berupa padat, cair atau gas. Pada suhu kamar umumnya HC suku rendah (jumlah atom C sedikit) akan berbentuk gas, HC suku menengah (jumlah atom C sedang) akan berbentuk cairan dan HC suku tinggi (jumlah atom C banyak) akan berbentuk padatan. Selain berdasarkan bentuk ikatannya (ikatan lurus dan bercabang), hidrokarbon juga dapat dibagi berdasarkan jumlah ikatan rangkap antara lain :

1. ikatan rangkap Satu
2. ikatan rangkap dua dan tiga

Ikatan lurus adalah ikatan yang membentuk rantai dengan pola terbuka. Dan salah satu yang tergolong dalam hidrokarbon ikatan lurus adalah hidrokarbon alifatik. Sedangkan hidrokarbon alisiklik dan aromatik memiliki lingkaran cincin.

Ikatan cincin, rantai lingkaran pada hidrokarbon aromatik berikatan konjungkat, yaitu ikatan tunggal dan rangkap selang-seling. Semua hidrokarbon siklik yang tidak termasuk aromatik digolongkan ke dalam hidrokarbon alisiklik. Hidrokarbon alisiklik dan aromatik mempunyai sifat-sifat yang berbeda nyata. Sifat hidrokarbon alisiklik lebih mirip dengan hidrokarbon alifatik.

Ikatan rangkap dua dan tiga merupakan senyawa kelompok alkena dengan rumus senyawa C_nH_{2n} (untuk ikatan rangkap dua) dan kelompok senyawa alkuna dengan rumus senyawa C_nH_{2n-2} (untuk ikatan rangkap tiga). Kedua ikatan rangkap ini disebut juga ikatan jenuh karena jumlah atom hidrogennya kurang bila dibandingkan dengan senyawa alkana.

Sifat fisis alkena hampir sama dengan alkana. Pada suhu kamar suku-suku rendah berwujud gas, suku-suku sedang berwujud cair, sedangkan suku-suku tinggi terwujud padat. Alkena dapat mengalami polimerisasi untuk membentuk molekul besar dari molekul sederhana. Sifat fisis alkuna sama dengan alkana dan alkena. Reaksi alkuna mirip dengan alkena. Untuk menjenuhkan ikatan rangkapnya, alkuna membutuhkan pereaksi dua kali lebih banyak dibandingkan dengan alkena.

Sifat senyawa hidrokarbon, hidrokarbon dalam bentuk cairan akan membentuk semacam kabut minyak, dalam bentuk padatan akan membentuk asap pekat yang setelah melalui proses pengumpulan akan menjadi debu. Untuk kedua kasus tersebut HC termasuk ke dalam kelompok pencemar partikel. Hidrokarbon yang sering menimbulkan masalah dalam polusi udara adalah yang berbentuk gas pada suhu atmosfer normal atau hidrokarbon yang sangat bersifat volatile (mudah berubah menjadi gas) pada suhu tersebut. Kebanyakan komponen-

komponen tersebut mempunyai struktur yang sederhana, yaitu mengandung 12 atom karbon atau kurang permolekul.

2.5.1 Dampak Pencemaran Hidrokarbon

Pencemaran hidrokarbon memiliki berbagai dampak yang berpengaruh baik itu pada manusia maupun kepada tumbuhan dan hewan. Jumlah hidrokarbon yang menyebabkan polusi udara cukup banyak. Analisa menggunakan khromatografi gas menunjukkan bahwa sekitar 56 hidrokarbon sering terdapat di udara. Jumlah tersebut mungkin dapat lebih banyak lagi jika alat yang digunakan mempunyai sensitifitas lebih tinggi karena beberapa hidrokarbon mungkin terdapat dalam jumlah kecil sekali sehingga sukar dideteksi dengan alat yang ada.

Hidrokarbon merupakan pencemar utama yang diemisikan oleh kendaraan bermotor dari lalu lintas di dalam perkotaan. Di beberapa kota besar, sumber ini merupakan sumber karbon yang paling dominan, sebagai pencemar primer dan yang memberikan kontribusi terbesar dalam pencemaran oksidan fotokimia.

2.5.2 Dampak bagi Manusia

Beberapa penelitian terhadap hewan dan manusia menunjukkan bahwa hidrokarbon alifatik dan alisiklis mempunyai pengaruh yang tidak diinginkan terhadap manusia hanya pada konsentrasi beberapa ratus sampai beberapa ribu kali lebih tinggi dari konsentrasi yang terdapat di atmosfer. Pada konsentrasi kurang dari 500 ppm tidak menunjukkan pengaruh apapun.

Tabel berikut ini akan menunjukkan level toksisitas dari beberapa hidrokarbon aromatik jenuh. Konsentrasi yang berbahaya tersebut jauh di atas rata-rata konsentrasi normal hidrokarbon di daerah perkotaan, yaitu sekitar 3.2 ppm untuk metana dan 0.03 – 0.10 ppm untuk hidrokarbon lainnya.

Tabel 2.5 Level Toksisitas Hidrokarbon Aromatik Jenuh

Hidrokarbon	Konsentrasi (ppm)	Pengaruh
Benzena (C ₆ H ₆)	100	Iritasi membran mukosa
	3000	Lemas setelah ½ - 1 jam
	7500	Pengaruh berbahaya setelah ½ - 1 jam
Toluena (C ₇ H ₈)	20000	Kematian setelah 5 – 10 menit
	200	Sedikit pusing, lemah, dan berkunang-kunang setelah 8 jam
	600	Kehilangan koordinasi, bola mata terbalik setelah 8 jam

(Sumber : Fardiaz,1992)

Hidrokarbon aromatik lebih berbahaya dibandingkan dengan hidrokarbon alifatik dan alisiklis. Uapnya lebih bersifat iritasi pada membran mukosa, dan luka dibagian dalam dapat terjadi jika menghisap uap komponen aromatik. Tetapi pada konsentrasi kurang dari 25 ppm biasanya tidak berpengaruh.

2.5.3 Dampak bagi Tumbuhan dan hewan

Apabila HC berupa gas maka akan tercampur bersama bahan pencemar lainnya. Kalau HC berupa cairan maka HC tersebut akan membentuk kabut minyak (*droplet*) yang keberadaannya di udara akan sangat mengganggu lingkungan. Sedangkan kalau bahan pencemar HC berupa padatan maka udara akan tampak

seperti asap hitam. Seringkali pencemaran udara oleh HC merupakan gabungan dari ketiga macam bentuk HC tersebut.

2.6 Plasma

Plasma adalah kumpulan dari atom-atom dan molekul-molekul gas netra, partikel-partikel bermuatan dalam bentuk ion-ion positif, ion-ion negatif dan elektron-elektron serta foton. Sebagian plasma dihasilkan melalui lintasan arus yang melewati gas netral. Plasma adalah zat keempat disamping zat klasik : padat, cair, dan gas. Plasma ini ditemukan pada tahun 1928 oleh ilmuwan Amerika, Irvinh Langmuir (1881 – 1957) dalam eksperimennya melalui lampu tungsten filament.

Plasma ini sangat mudah dibuat, caranya dengan pemanfaatan tegangan listrik. Contoh : hadapkan dua elektode di udara bebas. Seperti kita ketahui udara adalah isolator, materi yang tidak menghantarkan listrik. Namun, apabila pada dua elektrode tadi diberikan tegangan listrik yang cukup tinggi (10 kV), sifat konduktor akan muncul pada udara tersebut, yang bersamaan dengan itu pula arus listrik mulai mengalir (*electrical discharge*), fenomena ini disebut *eletrical breakdown*.

Mengalirnya arus listrik menunjukkan akan adanya ionisasi yang mengakibatkan terbentuknya ion serta elektron pada udara diantara dua elektrode tadi. Semakin besar tegangan listrik yang diberikan pada elektode, semakin banyak jumlah ion dan elektron yang terbentuk. Aksi-reaksi yang terjadi antara ion dan elektron dalam jumlah banyak ini menimbulkan kondisi udara diantara dua electrode ini netral, inilah plasma. Singkat kata plasma adalah kumpulan dari electron bebas, ion dan atom bebas.

Mengatasi polusi dengan plasma sebenarnya bukan sebuah hal yang baru. Pada tahun 1907 Frederick Cottrel memperkenalkan electrostatic precipitator (EP) untuk mengatasi polusi akibat aerosol (sampah udara) dari asap pabrik hasil pembakaran. EP dapat digunakan untuk mengumpulkan aerosol. Prinsip kerja dari EP adalah perpaduan dari medan electrostatic dan aliran ion yang dihasilkan oleh corona discharge. Mekanisme kerjanya adalah partikel aerosol ditangkap atau dikumpulkan oleh aliran ion, kemudian kumpulan partikel tadi diangkat oleh medan electrostatic lalu dipisahkan. Sekarang EP banyak digunakan untuk mengatasi aerosol dari asap pabrik termasuk diantaranya, di Indonesia. Namun, asap hasil pembakaran dari pabrik maupun kendaraan bermotor tidak hanya mengandung aerosol saja, tetapi didapati juga gas NO_x , SO_x , CO, dan Dioxin yang diketahui sangat berbahaya pada kesehatan. Kita mengenal hujan asam (HNO_3 dan H_2SO_4) yang dapat mengakibatkan kanker. Juga gas CO yang dapat mematikan apabila kita menghirupnya secara langsung. Kita juga dapat merasakan bertambahnya suhu bumi akibat penambahan CO_2 .

Baru-baru ini kita mendengar Dioxin yang muncul dari pembakaran sampah plastik, yang walaupun kadarnya sedikit namun berbahaya bagi kesehatan kita. Hal ini mendorong Dr Seiichi Masuda dari Tokyo University untuk mencari teknologi yang dapat mengatasi gas beracun hasil pembakaran pabrik. Pada tahun 1986 Seiichi Masuda mempublikasikan teknologi plasma sebagai teknologi untuk mengatasi kandungan gas NO_x , SO_x dari asap pembakaran pabrik.

Prinsip dari teknologi plasma dalam mengatasi kandungan gas NO_x atau SO_x sangatlah mudah. Seperti dijelaskan pada penjelasan di atas, plasma terbentuk dari

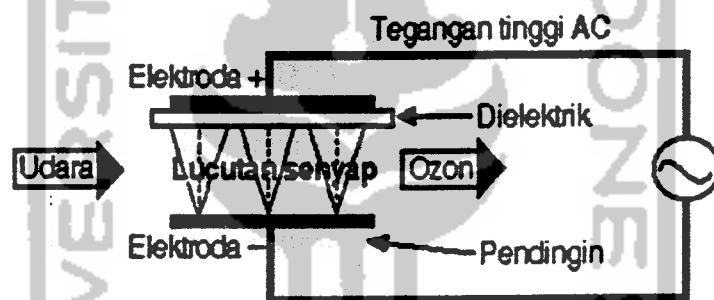
kumpulan electron bebas, ion serta atom. Aksi-aksi pada ion dan electron dalam plasma seperti reaksi ionisasi, excitasi, dan dissociasi dengan udara bebas sekitarnya berlanjut dengan terbentuk species aktif (ion, electron, molekul yang mudah bereaksi) seperti ozone, OH, O, NH₃ yang memiliki sifat radikal sangat mudah bereaksi dengan senyawa-senyawa yang ada sekitarnya. Species aktif yang terbentuk ini kemudian bereaksi dengan gas NO_x dan SO_x kemudian mengubah serta menguraikannya.

Dewasa ini di jepang teknologi plasma berkembang sangat pesat. Dimana teknologi plasma memiliki beberapa kelebihan yaitu pembuatan peralatan dan pemeliharaan (*maintenance*) yang sangat mudah, namun memiliki efektivitas penguraian yang cukup tinggi. Struktur yang mudah dari peralatan teknologi plasma memungkinkan untuk dipasang pada kendaraan bermotor, untuk menguraikan kadar NO_x yang timbul pada asap kendaraan hasil dari pembakaran bensin atau solar. Selain unruk mengatasi NO_x dan SO_x teknologi plasma dapat dipergunakan juga untuk menguraikan berbagai macam senyawa beracun seperti : Dioxin, gas VOC (*Volatile Organic Compounds*) seperti CFC, trichloroethylene, toluene, benzene, serta gas dari hasil pembakaran lainnya.

2.7 Lucutan Senyap (*Silent discharge*)

Lucutan senyap merupakan plasma tak seimbang. Pembagian plasma tak seimbang ke dalam kelompok lucutan tertentu bergantung pada jenis gas kerja, besar tekanan dan geometri elektroda yang dipakai, yang semua ini tentunya akan mempengaruhi karakteristik parameter fisisnya.

Lucutan senyap dicirikan dengan adanya sekurang-kurangnya satu lapis dielektrik yang ditempatkan diantara celah lucutan dan elektroda. Gambar 2.1 memperlihatkan skema konfigurasi lucutan senyap dengan dielektrik yang menutup salah satu elektroda. Adanya dielektrik merupakan kunci fungsi dari keistimewaan lucutan senyap dimana dielektrik dapat berfungsi sebagai sumber filamen arus yang berisi elektron energenik (1 – 10 eV). Lucutan merupakan daerah tenaga ideal untuk terjadinya eksitasi dari partikel atom dan molekul sehingga mampu untuk memisahkan ikatan-ikatan kimia suatu partikel.



Gambar 2.1 Konfigurasi lucutan senyap

Lucutan senyap hanya dapat dioperasikan dengan tegangan tinggi arus bolak-balik (AC) karena arus yang mampu melewati dielektrik hanya dalam bentuk simpangan. Arus bolak-balik menyebabkan elektron berpindah dari satu elektroda ke elektroda yang lain. Elektron yang mencapai kecepatan tertentu cukup mampu untuk memisahkan beberapa molekul oksigen menjadi atom yang radikal.

2.7.1 Dielektrik

Dielektrik merupakan bahan nonkonduktor bermuatan listrik. Semua muatan terikat pada atom atau molekul yang ada di dalam bahan dielektrik. Pada bahan dielektrik medan listrik yang diberikan menyebabkan pergeseran muatan dan bukan aliran muatan. Secara rata-rata elektron-elektron di dalam atom suatu dielektrik dipindahkan terhadap inti oleh suatu medan yang bekerja, sehingga menimbulkan dipol yang mempunyai momen listrik yang searah dengan medan listrik. Tegangan yang dihasilkan di dalam dielektrik disebut polarisasi listrik P dan dirumuskan sebagai berikut.

$$P = D - E\epsilon_0 \dots \dots \dots (2.7.1.1)$$

Dengan

D = pergeseran muatan

E = Kuat medan listrik

ϵ_0 = konstanta elektrik

Medan listrik di dalam dielektrik sama dengan medan listrik di dalam sebuah rongga berbentuk jarum yang terletak di dalam bahan dielektrik dengan syarat sumbu rongga sejajar dengan arah medan listrik.

Intensitas medan maksimum pada sebuah dielektrik yang dapat menahan untuk tidak terjadi dadal (*breakdown*) disebut kekuatan dadal. Setiap bahan dielektrik mempunyai kekuatan dadal tertentu. Ketika medan listrik di dalam melebihi kekuatan dadal maka akan terjadi percikan dan dielektrik dikatakan mengalami dadal (*breakdown*).

Dielektrik dalam lucutan senyap berfungsi untuk membatasi muatan sehingga muatan dapat mengalir melalui masing-masing lucutan mikro dan menyebarluaskan lucutan mikro ke seluruh permukaan luasan elektroda.

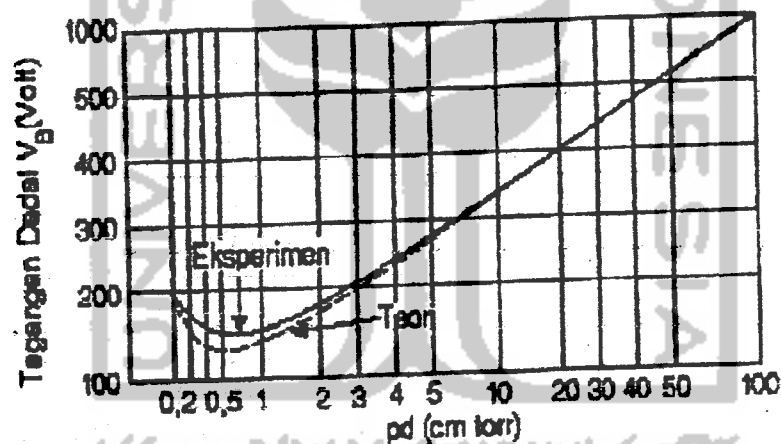
2.7.2 Struktur Lucutan dan Sifat-sifat Lucutan Mikro

Lucutan senyap dicirikan dengan adanya sekurang-kurangnya satu lapis dielektrik yang ditempatkan diantara celah lucutan dan elektroda. Dielektrik ini sangat penting untuk mempengaruhi sifat lucutan. Bila sistem dioperasikan pada tekanan atmosfer dengan gas udara atau oksigen, maka arus total merupakan jumlah lucutan-lucutan mikro yang masing-masing berumur nano detik dan terdistribusi secara statistik. Jarak celah lucutan mempunyai pengaruh yang sangat kuat terhadap lucutan mikro. Pengaruh lain seperti tekanan, komposisi gas, kelembaban, sifat dan tebal dielektrik serta besar tegangan satu daya juga mempunyai pengaruh terhadap lucutan mikro.

Setiap lucutan mikro terdiri dari arus filamen berbentuk silinder dengan jari-jari sekitar $100 \mu\text{m}$ dan menyebar di permukaan bidang lucutan pada dielektrik. Arus filamen dapat mencapai kerapatan arus sebesar 1000 A/cm^2 . walaupun kerapatan arus filamen cukup tinggi, muatan yang dipindahkan sebesar $\pm (10^{-10} - 10^{-9}) \text{ C}$ dan kerapatan tenaga sekitar 10 mJ/cm^2 di dalam lucutan mikro yang berlangsung dalam orde 2 – 5 nano detik (ns). Suhu elektron dapat mencapai sekitar 50.000° K yang setara dengan 5 Ev.

2.7.3 Inisialisasi dan Ekstensi Lucutan Mikro

Dadal elektrik (*brekdown*) gas diantara dua elektroda sejajar diperlihatkan oleh kurva Passchen, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Paschen mengemukakan bahwa persyaratan dadal memenuhi kurva yang unik untuk setiap gas yang hanya bergantung pada perkalian antara tekanan P dan jarak celah d . Pada suhu kamar, tegangan Paschen V_s adalah tegangan konstan terkecil yang diperlukan untuk mengawali dadal di dalam celah. Jika V_s dibagi dengan nd maka medan tereduksi Paschen E/n diperoleh karena diketahui $E = V/d$.



Gambar 2.2 Kurva Paschen

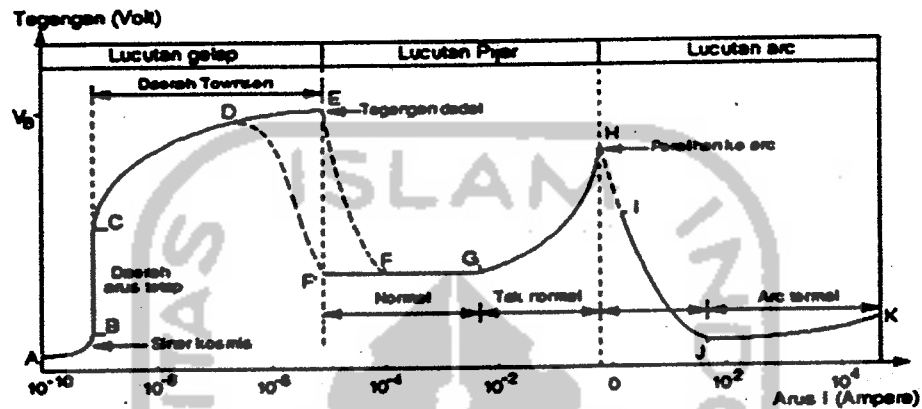
2.7.4 Karakteristik Arus dan Tegangan Dalam Tabung Lucutan

Lucutan listrik plasma dapat dibentuk dalam ruang antara dua lempeng elektroda yang diberi beda tegangan. Jika suatu gas dimasukkan ke dalam tabung tersebut dan dipanaskan dengan cara memperbesar tegangan antar elektroda, maka

elektron akan dipercepat ke arah anoda dan ion positif ke arah katoda sehingga akan terjadi aliran arus listrik.

Tabung lucutan berfungsi sebagai komponen yang impedansinya dapat bervariasi menurut besar tegangan tinggi sumber daya dari luar. Ketika tegangan sumber rendah maka arus yang mengalir rendah karena impedansi tabung nilainya masih besar. Jika tegangan dinaikkan terus berlahan-lahan maka dapat mencapai tegangan dadal, yaitu ketika impedansinya menjadi sangat kecil dan kondisi peralihan ini disebut kondisi dadal (*breakdown*) dari tabung lucutan. Setelah kondisi dadal akan terjadi arus lucutan I yang besarnya berubah-ubah menurut beda tegangan tabung. Selanjutnya jika tegangan dan tahanan luar diatur, maka akan didapat karakteristik hubungan antara arus I dan tegangan V seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. gambar 2.3 menunjukkan bahwa pertama kali arus yang ditimbulkan adalah disebabkan karena adanya radiasi sinar kosmis (A - B). Jika tegangan lucutan terus dinaikkan mulai titik C akan terjadi kenaikan arus. Pada saat tegangan mencapai dadal V_B dititik D, di dalam tabung mulai terjadi ionisasi berantai sehingga arus akan bertambah cepat dengan hampir tidak terjadi perubahan tegangan (D - E). Jika arus bertambah terus, mulailah dalam tabung tampak nyala terang disertai terjadinya penurunan tegangan, pada daerah ini disebut lucutan korona atau lucutan pijar subnormal (D - F' atau E - F). Lucutan senyap terjadi di daerah ini yaitu di daerah arus ($10^{-6} - 10^{-4}$) ampere. Penambahan arus selanjutnya tidak mengubah tegangan elektrodanya, dalam keadaan ini nyala tabung menjadi lebih terang dan daerah ini dinamakan lucutan pijar normal (F' - G). Jika arus terus bertambah maka tegangan akan naik (G - H). Kemudian akan turun kembali (H - J) dan selanjutnya tegangan

akan relatif tetap (J – K). Daerah (G – H) merupakan daerah lucutan pijar tidak normal, (H – J) merupakan daerah peralihan lucutan pijar ke lucutan arc dan (J – K) adalah lucutan arc termal (lucutan bara).



Gambar 2.3 Hubungan antara arus I dan tegangan V dalam tabung lucutan

2.7.5 Tegangan Lucutan

Besaran yang sangat penting untuk mendiskripsikan secara makroskopik lucutan terhalang dielektrik adalah tegangan lucutan V_L . tegangan lucutan merupakan tegangan rata-rata yang menyeberang celah lucutan selama fase lucutan aktif. Fase lucutan aktif terjadi setelah tegangan celah V_C mencapai tegangan lucutan. Selama fase ini, tegangan celah mendekati konstan $V_C = V_L$.

Tegangan lucutan merupakan besaran rata-rata yang sangat bergantung pada komposisi gas, tekanan, dan jarak celah. Disamping itu juga bergantung pada dielektrik, logam elektroda dan tegangan catu daya.

2.8 Teori Pembentukan Lucutan Senyap

Lucutan senyap terdiri dari berbagai filamen arus yang berlangsung selama dalam selang waktu periode tegangan. Filamen lucutan dadal pada tekanan atmosferik dalam konfigurasi lucutan terhalang dielektrik atau lucutan senyap pertama kali ditemukan oleh buss pada tahun 1932. Tiga fenomena terpisah yang terjadi selam silus hidup dari sebuah pola filamen arus adalah :

- a. Pembentukan lucutan dadal elektrik.
- b. Terjadinya pulsa arus atau transport muatan lewat celah lucutan.
- c. Eksitasi secara simultan dari atom dan molekul yang ada yaitu yang mengawali reaksi-reaksi kinetik.

Dengan memperbesar penyedia daya, secara berlahan lucutan mulai terjadi ketika medan dadal Paschen dicapai dan selanjutnya proses mengembang dalam keadaan filamen arus tereksitasi. Besarnya filamen arus dalam jangka waktu lucutan mikro yang bergantung pada jenis gas yang digunakan dan besarnya tekanannya. Keseluruhan arus mengalir dalam filamen dan terjadi penukaran tenaga antara elektron yang dipercepat dengan atom dan atau molekul dalam lucutan mikro. Elektron dan ion yang bertenaga pada lucutan mikro akan menumbuk partikel atom dan partikel lainnya sehingga akan terjadi pembentukkan berbagai proses hasil tumbukan oleh partikel elektron maupun ion.

Pada tekanan rendah diameter filamen-filamen arus bertambah besar dan cenderung menjadi banyak dan menyebar. Apabila tekanan terus diturunkan akan

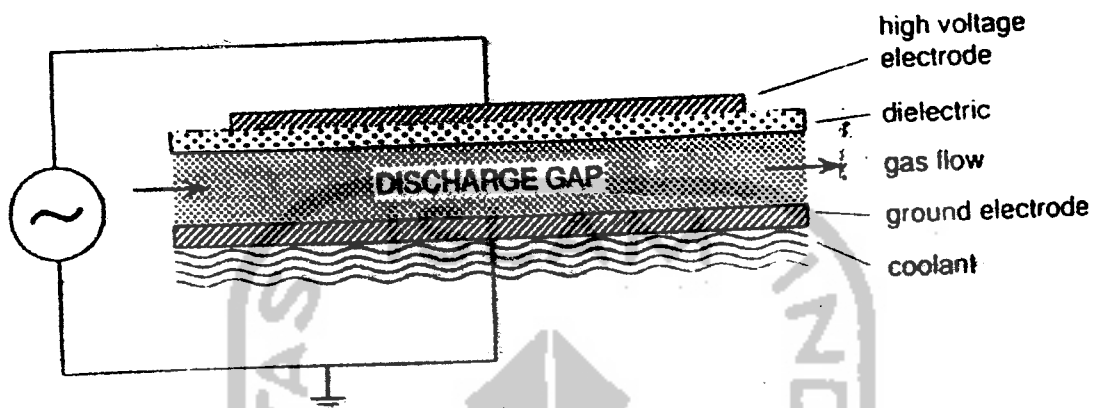
terjadi transisi *continue* dari susunan filamen dan lucutan senyap tampak cenderung menghambur kebentuk lucutan bara. Medan dadal bertambah untuk celah lucutan yang lebih kecil atau kerapatan yang lebih rendah. Keuntungan besar dari lucutan senyap adalah dapat dipengaruhinya tenaga rerata elektron dengan menambah besarnya perkalian *nd*.

2.9 Lucutan Plasma Terhalang Dielektrik (LPTD)

Teknologi plasma non-termal yang bekerja pada temperatur rendah (*non equilibrium*) telah mulai diketahui pada tahun 70-an. Pada teknologi ini, kita dapat menciptakan elektron berenergi tinggi yang bersumber dari sumber listrik tegangan tinggi. Teknologi plasma non-termal dibedakan menjadi dua kelompok dasar yaitu *electron-beam irradiation* atau lebih dikenal sebagai Mesin Berkas Elektron (MBE) dan *electrical corona discharge* (Jang, et al.,-). Karena teknologi plasma selalu berkaitan dengan energi lucutan listrik, maka teknologi plasma selalu disinonimkan dengan kata "lucutan".

Lucutan Plasma Non-Termal (LPNT) atau sinonim dengan lucutan senyap (*silent discharge*). LPNT adalah lucutan plasma tidak seimbang pada tekanan atmosferik yang muncul bila salah satu elektrodanya diberi lapisan dielektrik (isolator). Lucutan pada tekanan ini ditunjukkan oleh munculnya begitu banyak lucutan mikro berumur pendek yang terdistribusi secara acak. Lucutan mikro ini merupakan sumber elektron yang merupakan peran utama dalam perusakan susunan

molekul gas buang yang dilewatkan dalam sistem LPNT. Model dasar dari *silent discharge* yang menunjukkan peletakan elektrode yang ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Konfigurasi peletakan elektrode pada model *silent discharge*

Lucutan Plasma Non Termal (LPNT) sendiri mempunyai banyak jenis dan variasi dimana salah satunya yaitu Lucutan Korona dan LPTD (Lucutan Plasma Terhalang Dielektrik). Perbedaan secara mendasar diantara keduanya adalah pada penempatan elektrode. Untuk tipe yang pertama (korona/corona), LPNT ini terbentuk dari pipa yang dikelilingi semacam jarum yang berfungsi sebagai elektrode yang ditunjukkan Gambar 2.5, sedangkan untuk tipe kedua (LPTD), menggunakan susunan elektrode berbentuk planar atau silinder dengan sekurang-kurangnya terdapat satu lapisan dielektrik yang diletakan diantara elektroda yang ditunjukkan Gambar 2.6.



Gambar 2.5 LPNT model Lucutan Korona Gambar 2.6 LPNT model LPTD

Secara sederhana, lapisan dielektrik ini dapat disebut sebagai lapisan penahan antara elektroda dengan gas yang dimasukkan ke dalam reaktor plasma. Diantara elektroda dan udara tidak bersentuhan secara langsung, namun dibatasi oleh suatu lapisan tipis yang disebut sebagai lapisan dielektrik. Dielektrik adalah bahan non konduktor yang bermuatan listrik. Bila tidak terdapat lapisan ini, dikhawatirkan, lucutan elektron tidak dapat merata, dan potensi kerusakan bahan elektroda akan semakin besar karena bersentuhan secara langsung dengan gas-gas yang ada di atmosfer karena reaktor plasma ini bekerja pada tekanan atmosferik. Dalam tekanan atmosferik diketahui kandungan udara terdiri dari Nitrogen (78 %), Oksigen (21 %) dan gas gas lain hingga 1 %.

Bahan dielektrik yang digunakan pada umumnya adalah gelas, kuarsa, keramik, atau polimer. Jarak antara kedua elektrode berkisar antara 1 – 3 mm, dan inilah yang disebut sebagai *gap* atau celah. Dari celah inilah muncul lecutan listrik. Karena prinsip kerja dari LPTD adalah melewati gas pada kedua elektrode maka, bila ingin memperbesar jarak antar kedua elektrode lebih dari 3 mm, diperlukan tegangan

listrik yang semakin besar. Ketebalan bahan dielektrik ikut mempengaruhi poses LPTD. Semakin tebal, maka lecutan akan semakin kecil, dan ini menyebabkan penurunan efisiensi.

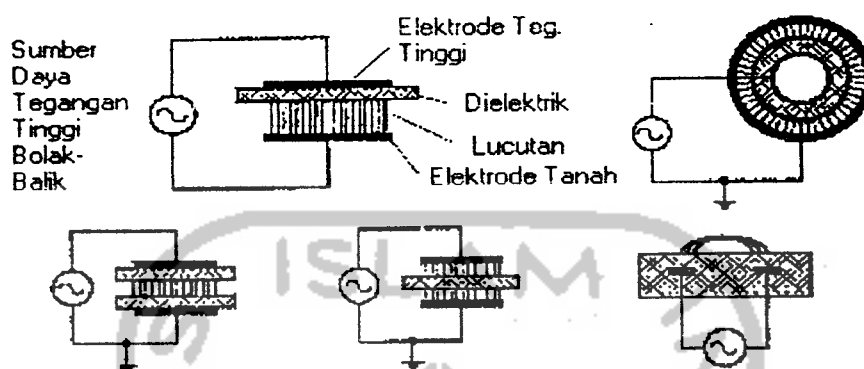
Salah satu sifat yang menarik dari LPTD adalah dioperasikannya pada tekanan atmosferik sehingga mudah untuk diaplikasikan atau hanya dilakukan penelitian. Proses yang terjadi pada LPTD adalah lucutan dadal (*breakdown*), dimana hal ini terdiri dari banyak arus filamen yang disebut sebagai lucutan mikro atau lucutan *streamer* (Usada dkk, 2004) yang bekerja secara independen, dimana posisinya tersebar diseluruh permukaan dielektrik dengan lama lucut dalam orde nanodetik. Hal ini dapat terlihat dari jejak lucutan yang tertangkap pada kertas film yang disebut sebagai gambar *Lichtenberg*. Kertas fil ini dipasang diseluruh permukaan dielektrik yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gambar *Lichtenberg* yang mewakili lucutan mikro yang tersebar diseluruh permukaan dielektrik yang ditangkap oleh film

Variasi pada pembuatan LPTD juga terdapat dua jenis yaitu planar dan silindris seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, sedangkan korona hanya satu tipe. Terlepas dari semua kekurangannya, salah satu keunggulan lucutan korona bila

dibandingkan dengan sistem LPTD adalah lucutan korona mempunyai kapasitas daya yang lebih besar dan lebih efektif dalam reduksi gas buang.



Gambar 2.8 Variasi konfigurasi LPTD planar dan silindris

Diantara berbagai macam lucutan senyap, LPTD merupakan lucutan plasma yang unggul karena mudah dibuat, lucutan yang merata dipermukaan, dan ini berperan dalam mengurangi penggunaan elektroda (terjadi penghematan), bila dibandingkan dengan Lucutan Korona. Seperti diketahui, Lucutan Korona adalah lucutan yang dihasilkan pada sistem pasangan elektrode dengan salah satu elektrodanya menggunakan elektrode jarum, sehingga kemungkinan besar terjadi keausan pada elektrode jarum tersebut. Inilah salah satu kelebihan LPTD, namun pelepasan elektron berenergi lebih besar pada Lucutan Korona, sehingga efisiensinya lebih tinggi bila dibandingkan dengan LPTD.

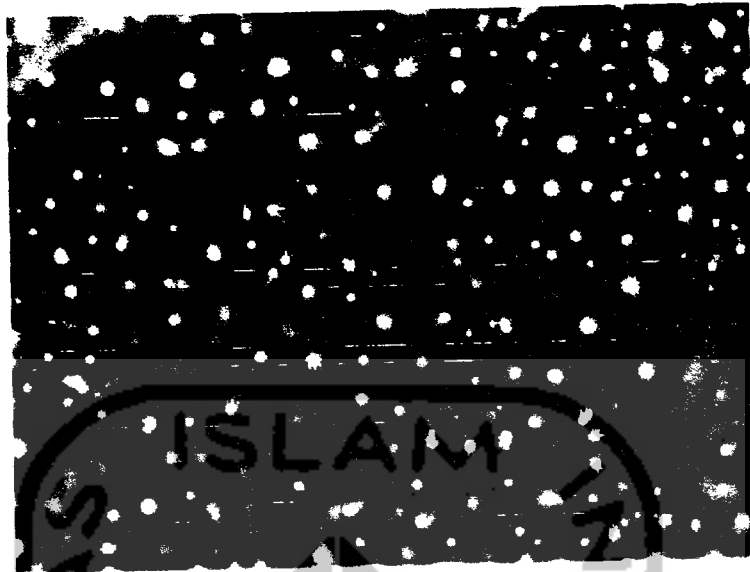
LPTD yang digunakan untuk mereduksi gas buang sangat rentan dengan pengotoran. Karena bila suatu padatan masuk ke dalam reaktor LPTD, padatan ini akan menempel dan menutupi lapisan dielektrik sehingga lucutan listrik tidak dapat terjadi. Yang perlu diteliti selanjutnya adalah bagaimana mengatasi biaya operasional untuk kerusakan yang diderita elektrode dan proses pembersihan pada bahan

dielektrik dari kemungkinan tertempelnya partikel gas buang yang menghambat proses lucutan, dimana dalam hal ini, keduanya memerlukan riset dan penjelasan lebih lanjut.

2.10 Mekanisme Sistem Kerja Reaktor Plasma

Dalam sistem operasi kerja reaktor plasma, lucutan listrik dihasilkan dari suatu celah (*gap*) tipis berjarak 1-3 mm. Ada juga yang menyatakan 0,5 – 5 mm. Elektroda bertegangan tinggi dibungkus dengan sebuah lapisan dielektrik dan *ground electrode* yang dihubungkan dengan sumber arus listrik AC tegangan tinggi. Dari kedua celah inilah lucutan listrik membentuk suatu aliran elektron berenergi tinggi dalam orde yang sangat singkat (1-2 nano sekon). Reaktor plasma non- termal dapat dioperasikan pada kondisi atmosferik berkisar 0,3 – 3 bar.

Lucutan elektron atau *microdischarge* terdiri dari sebuah silinder tipis kolom plasma yang tersebar diseluruh permukaan lapisan dielektrik. Hal ini terbukti dari jejak lucutan yang terekam pada kertas film yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dari jejak yang terekam inilah kita bisa mengetahui karakteristik dari susunan *microdischarge* yang ditunjukkan pada Tabel 2.6



Gambar 2.9 Jejak lucutan yang terekam pada kertas film pada reaktor plasma

Tabel 2.6 Karakteristik *Microdischarge*

Durasi	1 - 10 ns
Radius filamen	0.1 mm
Peak current	0,1 A
Current density	100 - 1000 A/cm ²
Total charge	100 - 1000 pC
Densitas electron	$10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Energi electron	1 - 100 eV
Gas temperature	25 - 100° C

Sumber : Chang, 1995

Setiap *microdischarge* terdiri dari sebuah silinder dengan diameter 100 μm yang muncul pada celah (*gap*) 1-3 mm diseluruh permukaan dielektrik. Setiap *microdischarge* membawa beban sebesar $10^{-10} - 10^{-9}$ coulomb dengan densitas energi sekitar 10 mJ/cm^3 . Dengan densitas energi sebesar ini maka temperatur

elektron ditentukan medan listrik berkisar pada 50.000 Kelvin. Pada suhu sebesar ini, setiap elektron diperkirakan mempunyai energi sebesar 5 eV. Data data ini diperoleh melalui foto kecepatan tinggi *intensifier* (Kogelsatz, 1988). Karena suhu yang ada pada reaktor plasma non-termal berpotensi sangat tinggi, maka pada lapisan elektroda sebelah dalam wajib dipasang *coolant* (pendingin) untuk mengantisipasi munculnya panas yang begitu tinggi pada tabung reaktor plasma. Penempatan pendingin ini ditunjukkan pada Gambar 2.1 pada halaman sebelumnya.

Hal-hal lain di luar sistem reaktor yang sangat mempengaruhi kinerja dari reaktor plasma non-termal adalah sebagai berikut :

- Tekanan
- Komposisi gas
- kelembaban udara

Penggunaan arus AC tegangan tinggi (arus DC tidak bisa digunakan) pada reaktor plasma untuk model lucutan plasma non-termal adalah suatu keharusan dikarenakan kapasitas pasangan dielektrik mengharuskan aliran listrik bolak balik untuk menggerakkan arus elektron berenergi tinggi yang terus bergerak (bergeser) dari kedudukan semula. Bergeser ini artinya kita memerlukan arus aliran eletron yang bekerja secara dua arah. Salah satu hal yang sangat penting adalah ketersediaan daya listrik pada reaktor plasma dan daya ini mempunyai kesesuaian dengan desain reaktor plasma. Setelah simpanan energi yang terkumpul cukup banyak pada lapisan dielektrik, maka dengan segera akan terjadi proses loncatan elekton berenergi tinggi

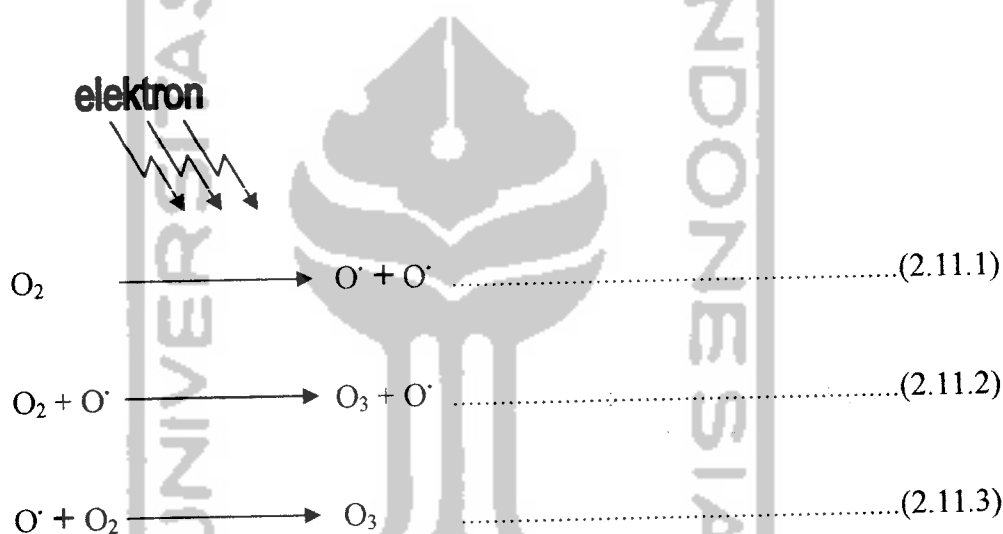
yang prosesnya disebut sebagai lucutan dadal atau *breakdown* diantara kedua elektrode. Lucutan dadal ini berupa *microdischarge* atau elektron berenergi tinggi. Elektron inilah yang merubah O_2 dan gas gas lain di dalam reaktor plasma non-termal menjadi ozon yang mempunyai sifat oksidator yang sangat kuat.

2.11 Mekanisme Pembentukan O_3 (Ozon) dalam Reaktor LPTD

Diketahui dari penjelasan sebelumnya, bahwa reaktor plasma menciptakan suatu elektron radikal bebas yang bersifat oksidator. Radikal ini dapat berupa O , OH dan HO_2 dimana pembentukannya sangat kompleks, dan sukar dipastikan kuantitas masing masing senyawa ini dalam reaktor plasma. Radikal inilah yang akan memecah senyawa oksida nitrogen dan oksida belerang pada gas buang serta berbagai senyawa organik atau VOCs (*Volatile Organics Compounds*) berbahaya lainnya. Sampai saat ini sifat oksidator ozon hanya bisa dikalahkan oleh bubuk fluorine. Ozon ini dapat menggantikan senyawa kimia yang secara umum dipakai sebagai oksidator yaitu *peroxides*, *permanganates*, *dichromates* dan *chlorine*, atau senyawa *chlorine* lainnya. Keunggulan oksidator ozon adalah tidak menimbulkan residu sisa reaksi, hal ini tentunya berbeda dengan oksidator lainnya yang lazim digunakan untuk memecah suatu senyawa kimia yang biasanya berupa solid, cairan maupun larutan yang masih menyisakan residu dalam reaksi kimia

Penghancuran senyawa organik di dalam reaktor plasma dilakukan oleh radikal bebas atau UV foton. Reaktor plasma menyediakan berbagai radikal seperti N_2^* ($A^3\dot{O}_u^+$), $N_2^*(B^3\Pi_g)$, $O_2(a^1\Delta_g)$, $O(^1D)$, $O(^3P)$, H , OH , dan N . Dari spesies radikal ini

yang dihasilkan dari tubrukan antar elektron pada *microdischarge filaments*. Setelah terjadi tubrukan antar elektron inilah akan diikuti berbagai urutan reaksi lanjutan antara senyawa radikal yang biasanya akan menghasilkan tambahan radikal seperti O, OH atau HO₂ untuk mendekomposisikan berbagai senyawa polutan (Kogelschatz, 2000). Sebagian radikal ini langsung berikatan dengan gas-gas di sekitarnya. Sebagai contoh adalah reaksi pembentukan ozon yang bergerak secara simultan adalah sebagai berikut :



Proses reaksi kimia dan fisika dalam pembentukan ozon sangat kompleks. Ozon terbentuk hanya pada *microdischarge*, bukan terbentuk diantara *microdischarge*. Ketika voltase *breakdown* (dadal) telah terbentuk, terjadi proses ionisasi sangat cepat menghasilkan suatu lapisan pembawa muatan untuk arus listrik. Karena reaksi ini terjadi dalam kondisi atmosferik, maka lapisan pembawa muatan listrik ini adalah udara-udara yang ada dalam kondisi atmosferik di dalam reaktor plasma tersebut. Udara inilah yang berubah menjadi radikal bebas, dan sebagian radikal ini akan

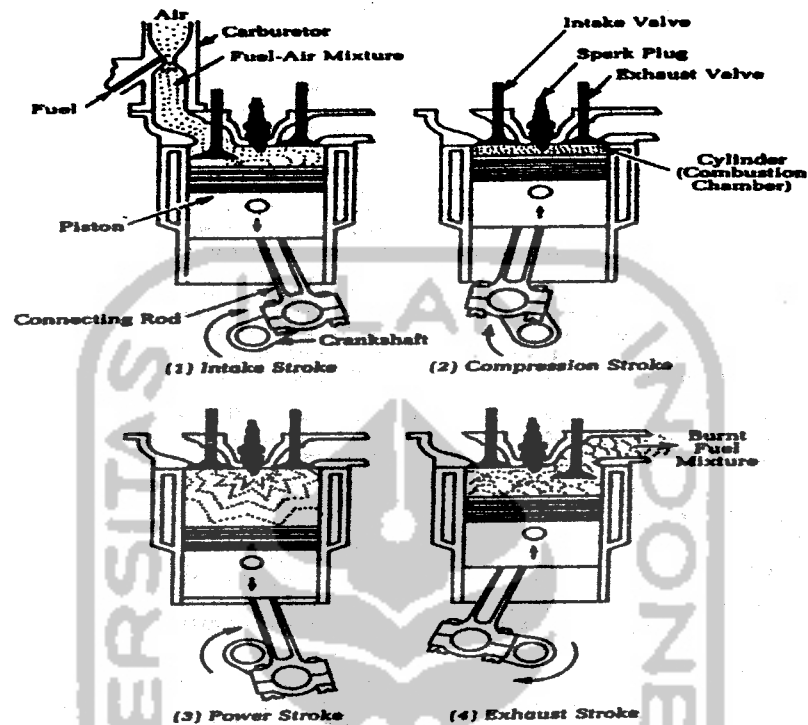
mengikat senyawa gas lain di dalam tabung reaktor plasma, gas yang terikat dengan radikal bebas ini akhirnya pecah susunan kimianya.

2.12 Mesin Empat Langkah (*Four Stroke engine*)

Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sarana transportasi menggunakan suatu alat yang dapat mengubah energi panas yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi energi mekanik, dan alat itu yang dikenal sebagai mesin bakar. Mesin bakar ini berdasarkan sistem kerjanya dibedakan menjadi dua kelompok dasar yaitu mesin dengan piston dan mesin turbin atau jet. Mesin berpiston ini sampai sekarang hanya terdapat empat tipe yaitu mesin dua langkah (menggunakan bensin dengan campuran oli khusus), mesin 4 langkah konvensional (menggunakan bahan bakar bensin murni), mesin empat langkah model *rotary* atau *wankel* (menggunakan bahan bakar bensin murni) dimana khusus untuk tipe mesin ini, lisensinya hanya dipegang oleh perusahaan mobil Mazda dari Jepang sehingga populainya sangat sedikit, dan yang terakhir adalah tipe mesin diesel (menggunakan bahan bakar solar) yang lazim digunakan untuk kendaraan berat dan kapal laut.

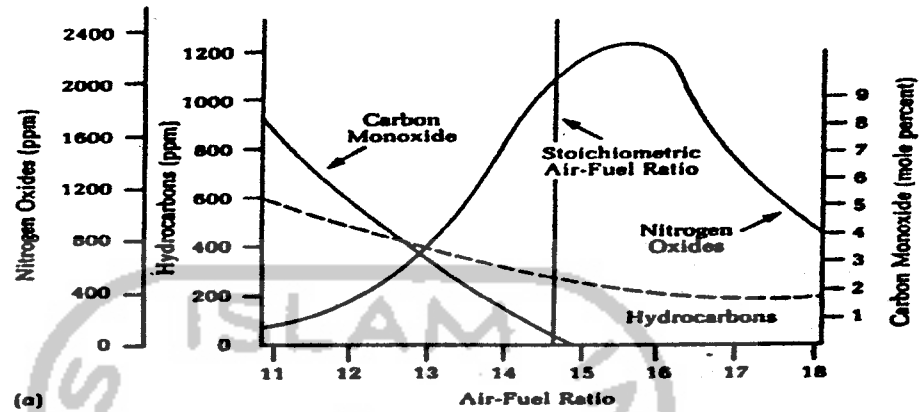
Yang dimaksud istilah dengan mesin empat langkah maupun mesin dua langkah pada suatu mesin adalah untuk menggambarkan bagaimana suatu piston bekerja untuk menghasilkan suatu gerak pada kruk-as kendaraan. Pada mesin empat langkah, piston bekerja naik-turun sebanyak empat kali, dimana pada pergerakan piston ketiga itulah kruk-as mempunyai energi untuk menggerakkan kendaraan. Dari kruk-as inilah, mesin terhubung dengan transmisi yang menggerakkan roda kendaraan

untuk berputar, sehingga kendaraan dapat berjalan. Untuk penjelasan dari operasi sistem kerja mesin empat langkah konvensional dapat melihat Gambar 2.10



Gambar 2.10 Sistem kerja dari mesin empat langkah konvensional

Pada mesin empat langkah konvensional, satu kilogram bensin bila dicampur dengan 15 kilogram, dapat menciptakan energi maksimum. Istilah ini dikenal sebagai *air fuel ratio* (A/F Ratio), dimana kondisi idealnya adalah 15 : 1, namun kebanyakan kendaraan mempunyai perbandingan kurang dari 15 : 1. Bila perbandingan di bawah angka *air fuel ratio*, ini menunjukkan pembakaran yang tidak sempurna, efeknya adalah muncul gas yang bersifat polutan selain karbon dioksida dan air yang dilepaskan dari knalpot kendaraan. Kaitan antara *air fuel ratio* dengan polutan NO_x , HC, CO yang dilepaskan knalpot kendaraan bermotor ditunjukkan pada Grafik 2.1 di bawah ini :



Grafik 2.1 Hubungan antara air fuel ratio dengan gas polutan yang dilepaskan dari kendaraan bermotor.

Istilah RPM atau *rotation per minute* adalah menunjukkan seberapa banyak putaran kruk-as dalam satu menit ketika mesin empat langkah dalam kondisi menyala. RPM tiap kendaraan adalah berbeda, maka RPM tidak bisa dijadikan patokan dasar ketika kita menghitung suatu daya kendaraan untuk bergerak yang dihitung dengan menggunakan satuan dk atau daya kuda. Sebagai contoh, mobil biasa pada 3000 rpm biasanya bergerak dengan kecepatan 60 km/jam, namun mobil formula satu, pada RPM yang sama mungkin telah berjalan diatas 100 km/jam. Yang pasti, semakin tinggi RPM, maka daya kendaraan akan semakin besar, dan ini tentunya dengan konsumsi bahan bakar dan udara akan meningkat, diikuti pelepasan gas buang yang semakin besar pula.

Berdasarkan penggunaan kendaraan sehari-hari, terdapat suatu kondisi mesin dalam keadaan ideal yaitu apabila kendaraan berjalan pada kecepatan antara 40 – 60 km/jam. Hal ini dapat dilihat pada panel indikator kecepatan pada kendaraan, dimana

antara angka 40 – 60 km/jam yang tertera pada panel, diberi indikator warna biru dari produsen kendaraan tersebut sebagai penanda batas kinerja mesin dalam keadaan optimal. Sebagai contoh adalah sepeda motor jenis *cub* (atau bebek) Yamaha Vega yang ada di Indonesia. Pada *range* kecepatan inilah secara umum kendaraan dijalankan pada kondisi lalu lintas perkotaan. Ketika kendaraan berjalan dalam kondisi ideal, maka pergerakan kruk-as tidak mengalami fluktuasi perubahan yang besar dan tajam. Seperti kita ketahui, apabila pergerakan kruk-as sangat fluktuatif maka konsumsi bahan bakarnya akan meningkat, namun daya yang dihasilkan tidak membesar secara signifikan. Menurut sebagian kalangan ahli mesin, RPM kendaraan pada *range* 40 – 60 km/jam adalah berkisar 2000, 2500, dan 3000 RPM.

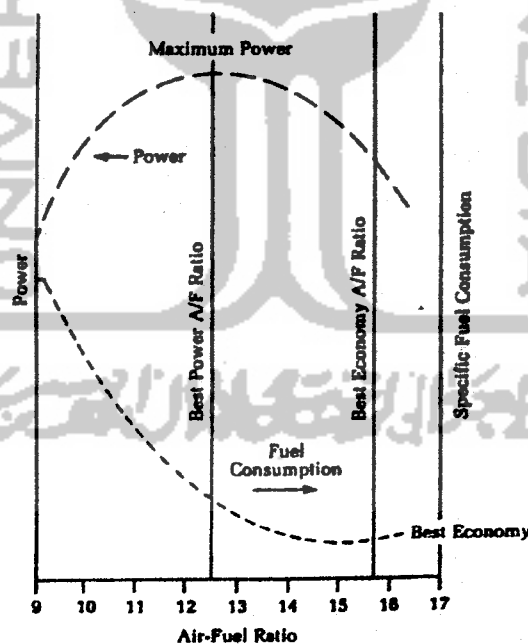
RPM yang terpasang pada kendaraan terdapat dua jenis, yaitu sistem digital dan analog. Untuk digital, RPM dihubungkan dengan sistem kelistrikan kendaraan melalui CDI (*Capacitor Discharge Ignition*). Sedangkan untuk sistem analog, pada kruk-as kendaraan dihubungkan dengan roda gigi yang diteruskan melalui dengan kabel menuju pada *speedometer* kendaraan. Dari kabel yang berputar inilah RPM versi analog dapat terbaca putaran mesin. Versi RPM digital tentunya lebih akurat dan tidak terjadi bias karena tidak ada unsur mekanik pada sensornya.

2.12.1 Model Pengolahan Gas Buang Untuk Mesin Empat Langkah

Emisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar bensin pada mesin empat langkah sangat tergantung susunan senyawa kimia. Bensin yang digunakan maupun kondisi mesin itu sendiri. Dalam bensin dikenal dengan nilai



oktan, dimana semakin tinggi angka menunjukkan semakin mudah bensin untuk terbakar, dan ini juga dapat diartikan bahan bakar tersebut mengandung bahan pengotor yang sangat kecil, bahkan ada beberapa yang bebas dari pengotor seperti timbal dan sulfur. Kondisi mesin dengan aneka macam teknologi, juga membuat efisiensi pembakaran tiap kendaraan berbeda. Mesin yang rutin dilakukan *tune-up* dan tidak terlalu tua usianya dapat dipastikan mempunyai kinerja dengan efisiensi yang tinggi. Semakin tinggi kinerja mesin, semakin tinggi pula nilai oktan yang diperlukan dalam pembakaran mesin tersebut, dan kadar gas polutan yang dihasilkan akan semakin sedikit. Berikut ini adalah Grafik 2.2 yang menunjukkan keterkaitan antara A/F ratio (*Air Fuel ratio*), tenaga dan efisiensi mesin :



Grafik 2.2 Hubungan antara air fuel ratio yang mencakup tenaga dan efisiensi mesin kendaraan bermotor

Kontrol untuk mengurangi kadar gas polutan pada kendaraan bermotor dapat ditempuh dengan 5 cara, dimana tidak semuanya cocok diterapkan untuk semua tipe

mesin kendaraan. Sebagai contoh mesin diesel yang tidak mempunyai karburator seperti halnya mesin empat dan dua langkah yang digunakan sebagai pengabut bahan bakar. Kelima cara tersebut adalah : (1) *Blowby* (modifikasi pada *crankcase* kendaraan agar tidak bocor, biasanya dipasang alat PCV atau *Positive Crankcase Ventilation*, dan sejak 1963 semua kendaraan telah dipasang alat ini untuk menurangi kadar *blowby emissions*) (2) Mengurangi penguapan dalam tangki bahan bakar, (3) Mengurangi kadar penguapan dalam karburator, (4) Teknologi modifikasi mesin dan sistem knalpot kendaraan, (5) Perawatan mesin secara berkala atau I / M (*Inspection and Maintenance*) atau bisa juga mesin tersebut dilakukan *tune-up* secara rutin.

2.12.2 Sepeda Motor Kawasaki Kaze R Empat Langkah Tipe *Cub*

Penelitian ini menggunakan objek penelitian sepeda motor tipe *cub* empat langkah dalam kondisi standar kecuali mesin telah mengalami *oversize* 0,25. Spesifikasi kendaraan berdasarkan "Buku Pedoman Pemilik" adalah sebagai berikut :

- Merek / jenis : Kawasaki Kaze R / *Cub*
- Tahun pembuatan / perakitan : 1999 / 2000
- Daya maksimum : 6,6 kW (9,0 PS) @ 8.500/r/min (rpm)
- Torsi maksimum : 9,3 N-m (0,95 kg-m) @ 3.500/r/min (rpm)
- Berat kosong : 105 kg

- Tipe mesin : empat langkah, SOHC, silinder tunggal, pendingin udara
- Volume langkah : 111 mL
- Diameter x langkah : 53,0 x 50,6 mm
- Perbandingan kompresi : 9,3 : 1
- Sistem Pengapian : CDI
- Saat pengapian : 6,5° BTDC @ 1.200/r/min (rpm)
: 27° BTDC @ 1.200/r/min (rpm)
- Baterai : 12V / 5 Ah

2.12.3 Glaswool atau Silika (SiO₂)

Silika mempunyai nama sinonim silikon dioksida. Silika adalah bahan dasar pembuatan kaca. Sifat utamanya adalah *non combustible*. Silika digunakan secara luas sebagai bahan dasar pembuatan kaca, keramik, komponen semen hidrolis, sumber dari ferro silika dan senyawa silikon yang penting, penguat bahan dasar karet yang digunakan dalam industri tekstil, bahan pengisi kosmetik, insulator (penyekat) panas, peredam suara (dalam bentuk *glasswool*), filter gas buang pada knalpot kendaraan (dalam bentuk *glasswool*), salah satu penyusun kertas, insektisida, anti bahan pengembang pada makanan, dan untuk keperluan farmasi. Silika dapat pula

berfungsi sebagai bahan penyatu (*fused*) pada *ablative material* mesin roket, pesawat luar angkasa, atau dibuat dalam bentuk *fiber* sebagai bahan penguat plastik.

Sifat dari silikon adalah bubuk kristal tidak berwarna atau berwarna putih. Tidak berbau dan tidak berasa. Tidak larut dalam air maupun dalam asam, kecuali *hydrofluoric*. Dapat melebur menjadi kaca yang memiliki koefisien pemuaian sangat rendah. Mempunyai sifat dielektrik yang tinggi namun stabil, serta tahan panas dan guncangan.

