

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Sebagaimana diketahui pada penelitian yang dilakukan Astika (2000), yang berjudul “Studi Eksperimen tentang Pengaruh Penggunaan Tembaga sebagai *Catalytic Muffler* terhadap Emisi CO, HC dan NO<sub>x</sub> dari Motor Bensin 4 Langkah”, diperoleh hasil: (1). Emisi CO turun sebesar 22,34% pada putaran 4500 rpm atau pada temperatur 430-467°C, (2). Emisi HC turun sebesar 45,16% pada putaran 3500 rpm atau pada temperatur 387-467°C, (3). Emisi NO<sub>x</sub> turun sebesar 47,15% pada putaran 7000 rpm, (4). Torsi turun sebesar 21,46% pada putaran 7000 rpm, (5). Daya turun sebesar 21,46% pada putaran 7000 rpm, (6). Konsumsi bahan bakar naik sebesar 33,7% pada putaran 6500 rpm, (7). Tekanan efektif rata-rata turun sebesar 16,85% pada putaran 5000-7000 rpm, (8). Efisiensi thermal turun sebesar 25,20% pada putaran 6500 rpm.

Penelitian sejenis juga dilakukan oleh Aris (2005), yang berjudul “Penggunaan Cu Murni di *Exhaust Muffler* dalam Upaya Pengurangan Emisi Gas Buang”, diperoleh hasil: (1). Kadar CO turun sebesar 23,19% pada putaran 3000-8000 rpm dengan berat Cu 0,4 kg, (2). Kadar HC turun sebesar 60,68% pada putaran 3000-8000 rpm dengan berat Cu 0,4 kg, (3). Torsi naik sebesar 0,35 kg.m pada putaran 4000 rpm dengan berat Cu 0,9 kg, (4). Daya naik sebesar 0,31 Hp pada putaran 8000 rpm dengan berat Cu 0,4 kg, (5). Konsumsi bahan bakar turun sebesar 15,57% pada putaran 7000 rpm dengan berat Cu 0,75 kg, (6). Tekanan efektif rata-rata naik sebesar 5,88% pada

putaran 8000 rpm dengan berat Cu 0,4 kg dan berat Cu 0,6 kg, (7). Efisiensi thermal turun sebesar 22,60% pada putaran 6000 rpm dengan berat Cu 0,6 kg, (8). *Sound pressure level* tertinggi sebesar 106,97 db pada putaran 8000 rpm dengan berat Cu 0,2 kg.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Hakam (2006), yang berjudul “Pengaruh Penggunaan *Catalytic Converter* Cu terhadap Kadar Emisi Gas Buang, Unjuk Kerja dan *Sound Pressure Level* Motor Bensin 4 Langkah”, diperoleh hasil: (1). Emisi CO turun sebesar 60,03% pada putaran 4950 rpm atau pada temperatur 327°C, (2). Emisi HC turun sebesar 47,13% pada putaran 5347 rpm atau pada temperatur 327°C, (3). Torsi naik sebesar 10,70%, (4). Daya naik sebesar 10,18%, (5). Konsumsi bahan bakar turun sebesar 22,53%, (6). Tekanan efektif naik sebesar 10,36%, (7). Efisiensi thermal naik sebesar 18,12% dan (8). *Sound pressure level* turun.

Atas dasar masalah tersebut, peneliti tertarik untuk mendesain dan meneliti penggunaan *catalytic converter* tembaga (Cu) pada engine stand Avanza K3-VE terhadap kadar polutan gas buang, unjuk kerja, dan tingkat kebisingannya.

## **2.2 Teori Pendukung Penelitian**

### **2.2.1 Proses Pembakaran pada Motor Bensin**

“Pembakaran dapat didefinisikan sebagai kombinasi secara kimiawi yang berlangsung dengan cepat antara oksigen dengan unsur yang mudah terbakar dari bahan bakar pada suhu dan tekanan tertentu” (Tjokrowisastro dan Widodo, 1995:98).

Proses pembakaran di dalam motor merupakan hal yang sangat menentukan besarnya tenaga yang dihasilkan suatu motor. Pembakaran di dalam silinder merupakan reaksi kimia antara unsur yang terkandung di dalam bahan bakar yaitu CH atau hidrokarbon dengan udara atau oksigen, yang diikuti dengan timbulnya panas. Panas inilah yang kemudian digunakan oleh motor untuk menghasilkan tenaga (Suyanto, 1989:248).

Pembakaran pada motor pembakaran dalam dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu:

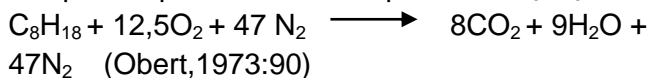
**a. Pembakaran Sempurna (Normal)**

Pembakaran sempurna atau normal terjadi apabila seluruh bahan bakar bensin ( $C_8H_{18}$ ) dapat bereaksi seluruhnya menjadi  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Adapun dasar persamaan reaksi kimia untuk pembakaran yang sempurna dari  $C_8H_{18}$  adalah sebagai berikut.



Reaksi tersebut merupakan reaksi dasar yang terjadi pada proses pembakaran sempurna di dalam silinder, namun masih belum diketahui seberapa besar jumlah oksigen ( $O_2$ ) dan nitrogen ( $N_2$ ) yang diperlukan untuk memenuhi reaksi yang sempurna tersebut. Selain itu, juga belum diketahui seberapa besar jumlah karbon monoksida ( $CO_2$ ), uap air ( $H_2O$ ) dan nitrogen ( $N_2$ ) yang dihasilkannya.

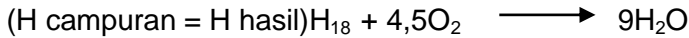
Untuk itu, di bawah ini akan dijelaskan proses reaksi kimia pada proses pembakaran sempurna dari  $C_8H_{18}$ .



Persamaan reaksi di atas dapat dijelaskan sebagai berikut.  
 Pertama, keseimbangan terbuatnya karbon (C campuran =



kemudian, keseimbangan terbuatnya hidrogen



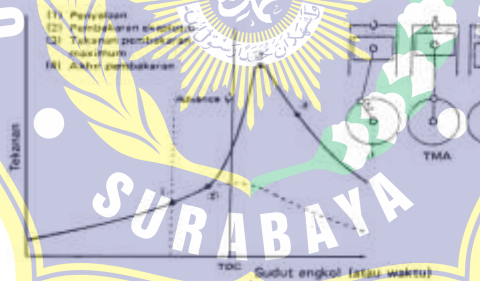
berikutnya keseimbangan terbuatnya oksigen



dan, terakhir keseimbangan terbuatnya nitrogen



Proses pembakaran sempurna atau normal pada motor bensin dimulai saat busi memercikan bunga api. Selanjutnya bunga api tersebut membakar gas yang ada disekelilingnya dan terus menjalar keseluruh bagian sampai semua partikel gas terbakar habis secara teratur (Toyota Astra Motor, 1995:2-2).



Gambar 2.1 Grafik Pembakaran campuran udara-bensin dan perubahan tekanan di dalam silinder

Sumber: Toyota Astra Motor (1995:2-3)

Ada empat fase pada pembakaran normal, yaitu:

a. Fase penyalaan

Fase ini ketika busi memercikkan bunga api dan tidak ada kenaikan tekanan di ruang bakar.

b. Fase pembakaran eksplosif

Dalam fase ini, campuran bahan bakar dan udara di ruang bakar mulai terbakar setelah busi memercikkan bunga api.

c. Fase tekanan pembakaran maksimum

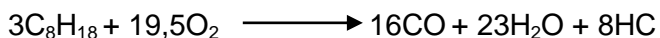
Pada fase ini terjadi kenaikan tekanan akibat pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar. Menurut Obert (dalam Suyanto, 1989:254) tekanan maksimal dalam ruang bakar terjadi ketika torak berada sekitar lima sampai sepuluh derajat setelah titik mati atas. Hal ini berfungsi agar tenaga yang dihasilkan oleh motor akibat pembakaran dapat terjadi secara maksimal, karena tekanan pembakaran ini yang akan digunakan untuk mendorong torak.

d. Fase akhir pembakaran

Fase ini merupakan akhir dari proses pembakaran dimana tekanan di dalam silinder turun.

**b. Pembakaran Tidak Sempurna (Tidak Normal)**

Pembakaran tidak sempurna terjadi apabila seluruh bahan bakar bensin ( $C_8H_{18}$ ) tidak bereaksi seluruhnya menjadi  $CO_2$  dan  $H_2O$  melainkan menjadi  $CO$ ,  $HC$  dan  $H_2O$ . Adapun reaksi pembakaran tidak sempurna adalah sebagai berikut.



Persamaan reaksi di atas dapat dijelaskan sebagai berikut.

Pertama, keseimbangan terbuatnya karbon (C campuran = C hasil)



kemudian, keseimbangan hidrogen (H campuran = H hasil)



dan, terakhir keseimbangan oksigen ( $O_2$  campuran =  $O_2$  hasil)



Pembakaran juga merupakan pembakaran yang terjadi di dalam silinder dimana nyala api dari pembakaran tidak menyebar dengan teratur dan merata sehingga menimbulkan masalah atau bahkan kerusakan pada bagian-bagian motor (Suyanto, 1989:257).

Ada tiga macam pembakaran tidak normal pada motor pembakaran dalam, yaitu:

a. *Detonasi* atau *knocking*

*Detonasi* atau *knocking* merupakan ledakan yang diakibatkan gas baru yang belum terbakar yang terdesak oleh gas yang telah terbakar, sehingga tekanan dan suhunya naik sampai mencampuri keadaan hampir terbakar, jika gas ini terbakar dengan sendirinya, maka akan terjadi ledakan dan gelombang kejutan yang berupa suara ketukan atau yang disebut *detonasi* (Toyota Astra Motor, 1996:2-3).

b. *Pre ignition*

Peristiwa ini hampir sama dengan peristiwa *detonasi* tetapi hanya terjadi pada saat busi belum memercikkan bunga api. *Pre ignition* merupakan peristiwa terbakarnya bahan bakar dengan sendirinya sebelum busi memercikkan

bunga api akibat tekanan dan suhu di dalam silinder yang cukup tinggi. (Toyota Astra Motor, 1996:2-4).

c. *Dieseling*

*Dieseling* adalah pembakaran pada motor bensin yang terjadi ketika kunci kontak sudah dimatikan. *Dieseling* terjadi karena temperatur di dalam silinder cukup tinggi, maka campuran bahan bakar dan udara yang dimampatkan di dalam silinder oleh tenaga sisa dari motor akan terbakar dengan sendirinya oleh karena adanya arang atau kepala silinder yang cukup panas (Suyanto, 1989:261).

### **2.2.2 Sifat - Sifat Udara Kering**

Udara merupakan salah satu syarat terjadinya suatu proses pembakaran. Udara yang dipakai dalam proses pembakaran biasanya adalah udara kering. Komposisi dari udara kering terdiri dari oksigen ( $O_2$ ) 20,99%, nitrogen ( $N_2$ ) 78,03%, argon (Ar) 0,94%, dan mencakup sedikit dari gas neon (Ne), helium (He) dan krypton (Kr), karbon dioksida ( $CO_2$ ) 0,03% dan hidrogen (H) 0,01% (Obert, 1973:88).

Adapun volume kandungan massa udara kering dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini.

**Tabel 2.1 Kandungan Massa Udara Kering**

Gas	Analisis Volumetrik %	Fraksi Mol	Berat Molekul	Berat Relatif Tetap $\frac{Lbm}{Mol}$ Campuran
O <sub>2</sub>	20,99	0,2099	32,00	6,717
N <sub>2</sub>	78,03	0,7803	28,016	21,861
Ar	0,94	0,0094	39,944	0,376
CO <sub>2</sub>	0,03	0,0003	44,003	0,013
H <sub>2</sub>	0,01	0,0001	2,016	
	100,0	1.000	.....	29,976 = M untuk udara

Sumber: Obert (1973:88)

### 2.2.3 Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

Polusi berasal dari empat sumber pada kendaraan bermotor, yaitu:

1. Pipa gas buang (knalpot) adalah sumber yang paling utama (65-85 persen) dan mengeluarkan hidrokarbon (HC) yang terbakar maupun tidak terbakar, bermacam-macam nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), dan campuran alkohol, aldehida, keton, penol, asam, ester, ether, epoksida, peroksida, dan oksigenat yang lain.
2. Bak oli adalah sumber kedua (20 persen), dan mengeluarkan hidrokarbon yang terbakar maupun tidak yang dikarenakan *blowby*.
3. Tangki bahan bakar adalah faktor yang disebabkan oleh cuaca panas dengan kerugian penguapan hidrokarbon mentah (5 persen).



4. Karburator adalah faktor lainnya, terutama pengendalian pada posisi *stop-and go* (kondisi macet) dengan cuaca panas, dengan kerugian penguapan dan bahan bakar mentah (5-10 persen) (Obert, 1973:368).

Emisi gas buang kendaraan bermotor merupakan polutan yang mengotori udara yang dihasilkan dari gas buang kendaraan bermotor dan sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, hewan, tumbuhan serta harta dan benda.

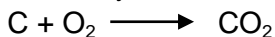
“Ada empat emisi pokok yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor, yaitu karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) dan partikel-partikel halus yang keluar dari gas buang” (Suyanto 1989:345).



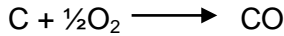
Gambar 2.2 Sumber emisi gas buang kendaraan bermotor  
Sumber: Heisler (1995:658)

#### a. Karbon Monoksida (CO)

Apabila karbon di dalam bahan bakar terbakar habis dengan sempurna, maka terjadi reaksi sebagai berikut.



Namun, apabila unsur oksigen (udara) tidak cukup, maka terjadi proses pembakaran yang tidak sempurna yang menghasilkan CO seperti pada reaksi di bawah ini.



"Jumlah gas CO yang dikeluarkan oleh mesin kendaraan dipengaruhi oleh perbandingan antara udara dan bahan bakar yang dihisap oleh mesin ke dalam ruang bakar" (Swisscontact, p.64).



Gambar 2.3 Grafik Hubungan lambda ( $\lambda$ ) terhadap emisi CO dengan variasi timing pengapian  
Sumber: Bosch (1999:12)

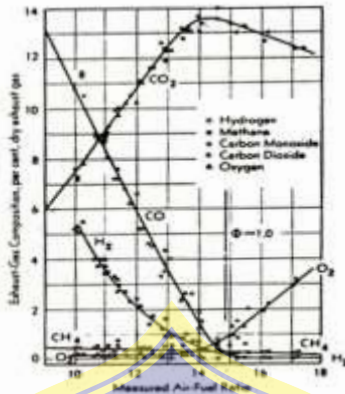
Dari grafik 2.2 di atas dapat dilihat bahwa pada saat campuran kaya (kekurangan udara) emisi gas buang CO cenderung naik. Hal ini dikarenakan atom karbon (C) yang berasal dari bahan bakar kekurangan oksigen ( $\text{O}_2$ ) yang berasal dari udara untuk berikatan melalui reaksi kimia di

dalam ruang bakar dan berubah menjadi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Sedangkan pada kondisi campuran miskin (kelebihan udara) konsentrasi CO berbanding lurus dengan campuran bahan bakar dan udara yang dihisap sehingga konsentrasi CO akan turun karena oksigen yang berasal dari udara cukup untuk memenuhi reaksi dengan karbon membentuk  $\text{CO}_2$ .

Karbon monoksida mempunyai sifat gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, tidak mudah larut dalam air, perbandingan berat terhadap udara (1 atm 6,93 °R adalah 0,976) dan apabila terdapat di udara dan diberikan api akan terbakar dengan mengeluarkan asap biru dan menjadi  $\text{CO}_2$  (Swisscontact, p.5).

Karbon monoksida dapat mengikat hemoglobin darah (Hb) dengan afinitas (daya ikat) yang lebih besar dibanding oksigen sehingga mengakibatkan darah kekurangan oksigen dan mengganggu saraf pusat. Sedangkan karbon monoksida pada konsentrasi tinggi dan dalam jangka waktu tertentu dapat mengakibatkan pingsan dan kematian (Swisscontact, p.5).

Secara lengkap trend emisi gas buang berupa CO,  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{O}_2$  seperti terlihat pada grafik di bawah ini



Gambar 2.4 Grafik Komposisi gas buang vs perbandingan udara-bahan bakar (AFR) terukur, untuk mesin otomotif tipe *non-supercharge*.

Bahan bakar  $C_8H_{17}$

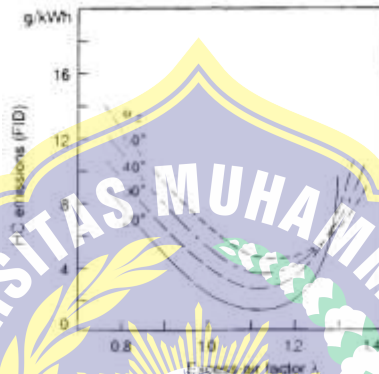
Sumber: Obert (1973:365)

### b. Hidrokarbon (HC)

Sumber dari emisi hidrokarbon (HC) adalah bahan bakar yang belum terbakar tetapi sudah keluar bersama-sama gas buang ke atmosfer, karena bahan bakar yang dipakai pada motor bensin terbuat dari hidrokarbon. Selain itu, disebabkan oleh pembakaran yang kurang sempurna karena kekurangan oksigen, sehingga ada sebagian bahan bakar yang belum terbakar dan keluar masih dalam bentuk hidrokarbon, atau juga terjadi karena penguapan dari tangki bahan bakar dan bak oli.

Apabila campuran kurus, maka konsentrasi HC menjadi naik seperti terlihat pada grafik 2.4. Hal ini disebabkan kurangnya pasokan bahan bakar sehingga menyebabkan rambatan bunga api menjadi lambat dan bahan bakar akan segera keluar sebelum terbakar dengan sempurna, dan juga pada kondisi campuran kaya konsentrasi HC akan naik akibat dari adanya bahan bakar

yang belum bereaksi dengan udara yang dikarenakan pasokan udara tidak cukup untuk bereaksi menjadi sempurna, sehingga ada sebagian hidrokarbon yang keluar pada saat proses pembuangan.



Gambar 2.5 Grafik Hubungan lambda ( $\lambda$ ) terhadap emisi HC dengan variasi timing pengapian  
Sumber: Bosch (1999:12)

Selain itu, menurut Swisscontact (p.7) emisi gas buang hidrokarbon timbul oleh sebab-sebab di bawah ini:

- Dinding ruang bakar yang bertemperatur rendah dan mengakibatkan HC di sekitar dinding tidak terbakar dan keluar bersama gas buang.
- Pembakaran yang tidak merata (*ever misfire*).
- Adanya *overlap intake valve*, sehingga HC berfungsi sebagai gas pembilas/pembersih.

Hidrokarbon mempunyai sifat sebagai senyawa yang terdiri dari ikatan karbon (C) dan hidrogen saja (H), berbau, mudah menguap, bereaksi lebih lanjut dengan  $\text{NO}_x$  membentuk senyawa fotokimia (*ozon*) (Swisscontact, p.5).

"Hidrokarbon dapat menyebabkan terjadinya iritasi mata, batuk-batuk, mengantuk, bercak-bercak pada kulit, perubahan kode genetik serta dapat menyebabkan asma" (Swisscontact, p.63).

### c. Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>)

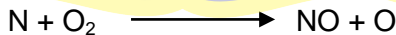
"Nitrogen oksida atau disingkat NO<sub>x</sub> adalah emisi yang dihasilkan oleh pembakaran yang terjadi pada temperatur yang tinggi" (Suyanto, 1989:346). Udara yang digunakan untuk pembakaran mengandung nitrogen sekitar 78,03%. Pada temperatur yang cukup tinggi (1800°C – 2000°C) nitrogen dalam campuran bahan bakar dengan udara akan bersatu dan membentuk nitrogen oksida.



Selanjutnya, gas NO yang bereaksi di udara membentuk NO<sub>2</sub>. Pada proses pembakaran di atas 2000°C kemungkinan timbulnya gas NO<sub>x</sub> sangat besar. Sementara itu, NO<sub>x</sub> di dalam gas buang terdiri dari 95% NO, 3-4% NO<sub>2</sub> dan sisanya N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Swisscontact, p.8).

Nitrogen oksida dapat berupa *nitric oxide* (NO), *nitrogen dioxide* (NO<sub>2</sub>) dan *nitrous oxide* (N<sub>2</sub>O) dalam jumlah yang sedikit.

Menurut Heywood (1988:572), reaksi terbentuknya NO adalah sebagai berikut.



Pembentukan gas NO<sub>x</sub> juga tergantung dari perbandingan jumlah bahan bakar dan udara yang dihisap kedalam silinder dan temperatur kerja mesin. Pada grafik 2.5 dapat diamati bahwa pada saat rentang campuran kaya (*rich range*) ada kenaikan kadar NO<sub>x</sub> seiring dengan

naiknya konsentrasi oksigen. Kadar  $\text{NO}_x$  maksimum terjadi pada rentang perbandingan udara dan bahan bakar 1,05 sampai 1,1. Sedangkan, pada rentang campuran kurus (*lean range*) konsentrasi  $\text{NO}_x$  turun akibat turunnya temperatur kerja.



Gambar 2.6 Grafik Hubungan lambda ( $\lambda$ ) terhadap emisi  $\text{NO}_x$  dengan variasi timing pengapian  
Sumber: Bosch (1999:12)

Gas nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) mempunyai sifat sebagai berikut:

- Dapat membentuk  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  dan  $\text{N}_2\text{O}$  jika bereaksi di udara.
- $\text{NO}$  tidak berwarna, tidak berbau, sukar larut dalam air, bereaksi lebih lanjut dengan udara menjadi  $\text{NO}_2$ .
- $\text{NO}_2$  berwarna agak kemerahan dan sedikit berbau, mudah larut dalam air dan menjadi asam nitrat atau nitrit.
- $\text{NO}_x$  bereaksi dengan hidrokarbon membentuk ozon (Swisscontact, p.6).

Gas nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) adalah *hemotoksin* (mampu mengikat sel darah merah) *sehingga* dapat menyebabkan gangguan syaraf pusat, menimbulkan iritasi mata, tenggorokan dan hidung, dan pada konsentrasi 30-50 ppm dapat menimbulkan sukar tidur dan batuk-batuk (Swisscontact, p.6).

#### **d. Partikel Halus (Pb)**

Partikel-partikel tersebut berupa partikel-partikel yang tampak berwarna hitam pada gas buang, bersifat racun dan korosif. Kotoran semacam ini tampak sangat nyata pada motor diesel, sedangkan pada motor bensin gejala ini tidak begitu nampak karena pembakarannya relatif sempurna, kecuali pada saat tertentu.

Partikel-partikel ini merupakan racun penyerang syaraf pusat yang dapat menyebabkan gangguan perkembangan otak pada janin anak-anak. Selain itu, dampak lanjutan akibat partikel-partikel ini adalah tekanan darah tinggi (Swisscontact, p.6).

### **2.2.4 Langkah - langkah Pengontrolan Emisi**

Menurut Obert (1973:368), ada beberapa langkah awal dalam pengontrolan polusi udara yaitu:

1. Memodifikasi mesin, komponen, dan bahan bakar untuk mengurangi polusi dari sumber yang tampak jelas untuk beberapa tahun mendatang.
  - a. Sejumlah perubahan kecil dan utama di dalam pembentukan desain mesin dan komponen dapat mengurangi emisi HC, CO, dan  $\text{NO}_x$ , seperti mengurangi perbandingan kompresi dan temperatur pembakaran.



- b. Penambahan cuk otomatis untuk menghindari campuran kurus dan campuran gemuk.
  - c. Pemasangan *positive crankcase ventilation* (PCV) yang akan menghisap hidrokarbon di bak oli dan dimasukkan kembali ke *intake manifold* untuk dibakar kembali di ruang bakar. Selain itu, pemasangan PCV berfungsi untuk mengurangi kontaminasi terhadap oli mesin.
  - d. Dengan mengurangi kandungan timbal yang terdapat pada bahan bakar melalui destilasi, sehingga didapat bahan bakar yang bebas timbal.
2. Mendesain komponen baru untuk mengurangi emisi penguapan dari sistem bahan bakar.
    - a. Dengan pemasangan kanister untuk menyimpan uap bahan bakar pada saat motor tidak bekerja.
    - b. Dengan menahan panas yang terjadi pada karburator, sehingga tidak terjadi penguapan.
  3. Mendesain komponen baru untuk mengurangi emisi gas buang.
    - a. Dengan pemasangan sistem sirkulasi ulang gas buang atau *exhaust gas recirculating* (EGR) untuk mensirkulasikan kembali gas bekas hasil pembakaran untuk dimasukkan kembali ke dalam silinder, sehingga mampu mengurangi emisi  $\text{NO}_x$ .
    - b. Dengan injeksi udara (*air injection*) ke dalam gas buang panas yang terlepas sehingga dapat mengurangi emisi HC, CO, dan aldehida dengan proses oksidasi.
    - c. Dengan pemasangan reaktor panas (*thermal reactor*) di saluran buang yang diisolasi untuk

meningkatkan pengaruh temperatur, waktu, dan homogenitas pada komposisi gas buang.

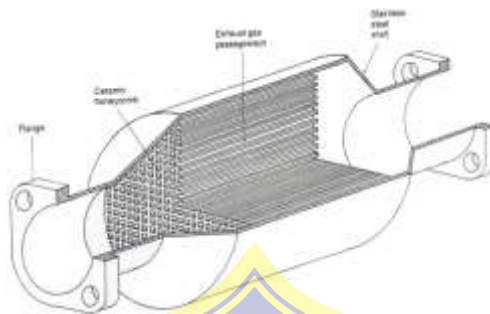
- d. Dengan pemasangan *catalytic converter* yaitu alat yang digunakan untuk mengurangi HC dan CO dengan menggunakan katalis oksidasi, dan NO<sub>x</sub> dengan katalis reduksi.
4. Meningkatkan pemurnian bahan bakar untuk mengurangi emisi yang reaktif.

Langkah ke depan yang juga perlu perhatian:

5. Desain sosiologi sebagai bagian dari analisis teknik.
6. Penelitian dan desain untuk mengembangkan tipe baru dari penggerak utama (atau sumber power) untuk menggantikan pembakaran mesin.

### **2.2.5 Catalytic Converter**

Emisi gas buang kendaraan bermotor merupakan materi yang dirasa cukup memberikan kontribusi terbesar bagi pencemaran udara. Pipa gas buang pada kendaraan bermotor adalah sumber yang paling utama (65-85 persen) dan mengeluarkan hidrokarbon (HC) yang terbakar maupun tidak terbakar, bermacam-macam nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), dan gas-gas lainnya (Obert, 1973:386). Gas-gas tersebut sangat berbahaya bagi kesehatan dan harus dihilangkan semaksimal mungkin. Penggunaan *catalytic converter* pada saluran gas buang dapat mereduksi gas-gas yang berbahaya tersebut menjadi gas yang tidak berbahaya.



Gambar 2.7 Konstruksi *catalytic converter*  
 Sumber: Heisler (1995:696)

#### a. Fungsi *Catalytic Converter*

*Catalytic converter* berfungsi untuk mengurangi HC dan CO dengan menggunakan katalis oksidasi, dan  $\text{NO}_x$  dengan katalis reduksi. Faktor-faktor seperti temperatur, waktu, homogenitas, dan komposisi gas buang dimodifikasi oleh suatu variabel baru yang disebut material katalis (Obert, 1973:381).

#### b. Bahan *Catalytic Converter*

Material katalis yang digunakan pada *catalytic converter* harus mampu mereaksikan gas buang yang berbahaya hasil dari pembakaran di dalam silinder menjadi gas yang tidak berbahaya. Logam katalis yang dipakai juga harus mampu mereduksi dan mengoksidasi gas tersebut.

Reaksi oksidasi yang terjadi harus bersih dan sederhana. CO, HC, dan  $\text{O}_2$  oleh katalis dikonversikan menjadi  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{CO}_2$ . Sejumlah bahan katalis yang diketahui sangat efektif untuk reaksi oksidasi adalah platinum, plutonium, palladium (logam-logam mulia);

tembaga, vanadium, besi, cobalt, nikel, mangan, chrom dan oksidanya (Obert 1973:381).

Sedangkan pada reaksi reduksi prinsip dasarnya harus mampu mengubah molekul NO dengan cara aktivasi, bereaksi pada nikel atau tembaga dalam prosentase CO (tetapi bukan O<sub>2</sub> yang bisa menyebabkan oksidasi) untuk membentuk N<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>. Sejumlah bahan katalis reduksi yang diketahui dapat mengurangi NO sampai beberapa derajat adalah besi, nikel, tembaga, dan oksidanya (Obert 1973:381a).



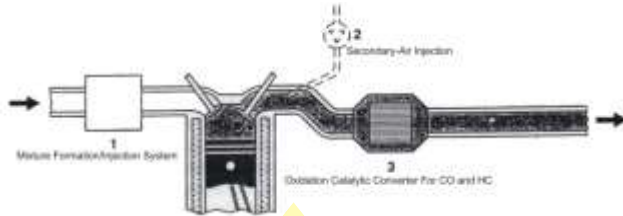
Gambar 2.8 Grafik Laju konversi material katalis terhadap temperatur *light-off*

Sumber: Jenbacher (1996:482)

### c. Konstruksi *Catalytic Converter*

Pada umumnya *catalytic converter* terdiri dari 3 konstruksi, yaitu:

a. *Single bed oxidation catalytic converter*



Gambar 2.9 Konstruksi *single bed oxidation catalytic converter*

Sumber: Bosch (1999:27)

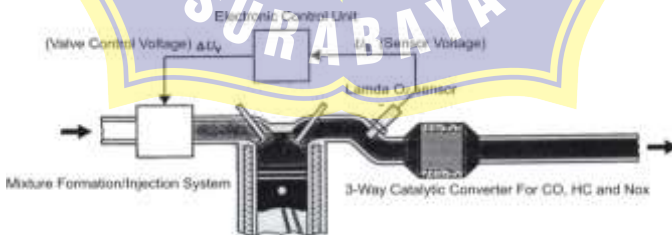
b. *Dual bed catalytic converter*



Gambar 2.10 Konstruksi *dual bed catalytic converter*

Sumber: Bosch (1999:27)

c. *Single bed catalytic converter*



Gambar 2.11 Konstruksi *single bed catalytic converter*

Sumber: Bosch (1999:27)

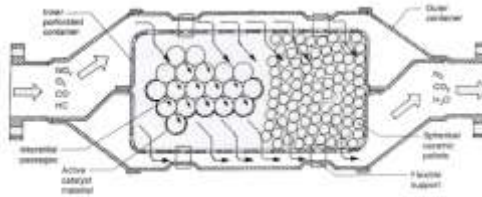
Belakangan ini kendaraan banyak yang menggunakan TWC karena mampu mengurangi ketiga polusi gas buang yang berbahaya tersebut. Fungsi dari *three way catalytic converter* adalah untuk mengurangi gas polutan yang tidak dikehendaki seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) dari aliran gas buang dengan mengkonversikannya melalui reaksi kimia menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), uap air (H<sub>2</sub>O) dan nitrogen (N<sub>2</sub>). Hasil ini diperoleh dengan mengoksidasikan karbonmonoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) sehingga molekul karbonmonoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) disusun kembali menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan uap air (H<sub>2</sub>O), sebaliknya nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) akan direduksi (menghilangkan oksigen) menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan nitrogen (N<sub>2</sub>). *Three way catalytic converter* diletakkan sebelum *muffler*, sedekat mungkin dengan *exhaust manifold* (Heisler, 1995:697).

#### **d. Bentuk Dasar Catalytic Converter**

Menurut Heisler (1995:700), ada tiga bentuk dasar dari *three way catalytic converter*, yaitu:

##### **a. Ceramic pellet (bola-bola keramik)**

Tipe dari katalis ini mempunyai lapisan-lapisan *pellet* yang berbentuk bola dibagian atas dan di bagian lainnya, *pellet* tersebut terbuat dari *ceramic* seperti magnesium dan alumunium yang tahan terhadap temperatur tinggi.

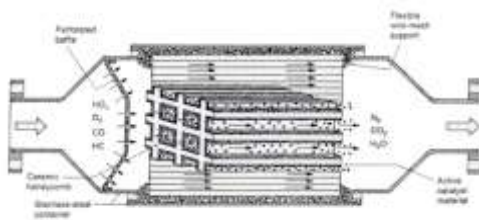


Gambar 2.12 *Catalytic converter* tipe *ceramic pellet*  
 Sumber: Heisler (1995:701)

- b. *Ceramic honeycomb (monolith)* atau bentuk sarang lebah keramik

Susunan dari *catalytic converter ceramic honeycomb (monolith)* ini menyerupai struktur sarang lebah dan menyalurkan aliran gas buang secara paralel. *Substrate* dari *honeycomb (monolith)* ini terbuat dari bahan keramik magnesium-aluminium silika yang tetap stabil pada temperatur kerja yang tinggi. Saluran ini dibungkus dengan sebuah aluminium kasar dengan tebal sekitar  $20 \times 10^{-6}$  m yang mampu menaikkan area permukaan saluran dari katalis dengan hitungan kasar sekitar 700.

Struktur dari sarang lebah kira-kira 1 mm persegi untuk laluan dari gas buang dan mempunyai tebal kekasaran dinding penyerap 0,15 sampai 0,3 mm. Sekitar 30 sampai 60 cm persegi untuk lubang dari garis depan area.



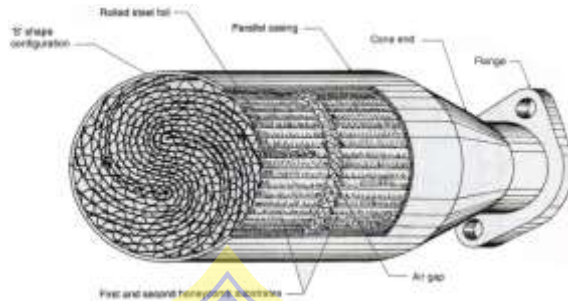
Gambar 2.13 *Catalytic converter* tipe *ceramic honeycomb (monolith)*

Sumber: Heisler (1995:701)

c. *Metallic honeycomb (monolith)* atau bentuk sarang lebah logam

*Substrate metallic honeycomb* ini terdiri dari kertas baja tipis sebagai alternatif lapisan yang datar yang terbuat dari kertas timah yang berbengkok-bengkok dengan tebal berkisar dari 0,04 sampai 0,05 mm dan digulungkan melebar ke dalam sebuah spiral atau dibentuk "S" susunannya. *Catalytic converter metallic honeycomb* kondisinya lebih berat dari pada *catalytic converter ceramic honeycomb* dan harganya 15% lebih mahal.





Gambar 2.14 *Catalytic converter* tipe *metallic honeycomb (monolith)*

Sumber: Heisler (1995:701)

#### e. Prinsip Kerja *Catalytic Converter*

Gas buang mesin bensin yang keluar dari knalpot berkisar antara 300°C sampai 400°C ketika *idle*, dan mencapai 900°C pada pengoperasian beban penuh. Pengoperasian temperatur khusus berkisar antara 500°C dan 600°C. Untuk menjaga perubahan tingginya temperatur, maka efisiensi konversi dari sebuah katalis berkisar antara 400°C dan 800°C. Jika temperatur pembuangan di dalam *converter* berpindah dari 800°C sampai 1000°C untuk beberapa waktu tertentu, maka logam mulia dan *substrate washcoat* akan memelihara dari pelelehannya (Heisler, 1995:698).

Efektifitas dari katalis ditentukan oleh nilai konversi ( $k$ ) yang didefinisikan sebagai berikut.

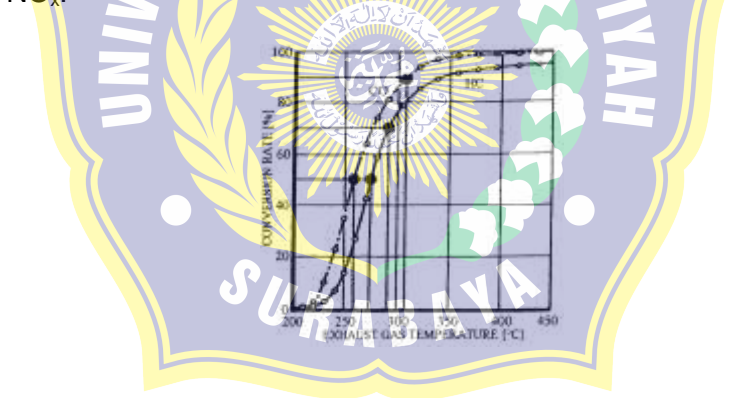
$$k = \frac{\text{konsentrasi in} - \text{konsentrasi out}}{\text{konsentrasi in}} \times 100\% \text{ (Jenbacher, 1996:481)}$$

Untuk mencapai tingkat tertinggi dari konversi gas buang, maka parameter yang digunakan adalah

perbandingan udara dan bahan bakar, temperatur gas pembuangan serta kecepatan aliran gas buang yang juga harus disesuaikan seoptimal mungkin (Jenbacher, 1996:481).

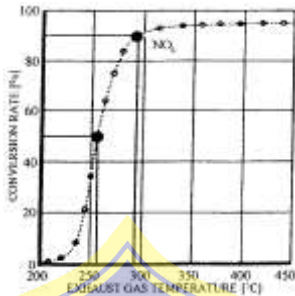
Pada temperatur 300°C efisiensi konversi dari katalis yang baru berkisar antara 98% - 99% untuk karbon monoksida dan sekitar 95% untuk hidrokarbon. Bagaimanapun juga untuk temperatur di bawah 300°C katalis praktis tidak efisien. Temperatur katalis yang efektif 50% disebut *light temperature*, temperatur ini digunakan oleh beberapa pabrik-pabrik sebagai spesifikasi (Heisler, 1995:698).

Di bawah ini ditunjukkan grafik hubungan temperatur gas buang terhadap laju konversi CO, HC dan NO<sub>x</sub>.



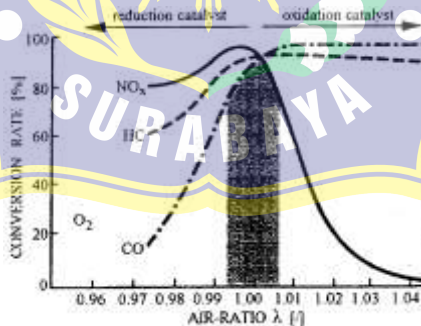
Gambar 2.15 Grafik Hubungan temperatur gas buang terhadap laju konversi CO dan HC

Sumber: Jenbacher (1996:482)

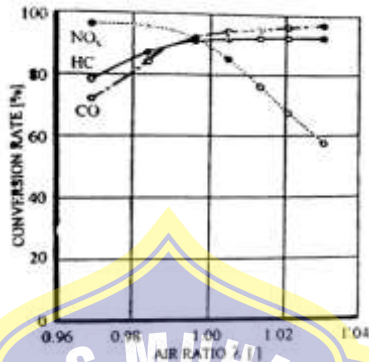


Gambar 2.16 Grafik Hubungan temperatur gas buang terhadap laju konversi  $\text{NO}_x$   
 Sumber: Jenbacher (1996:482)

Selain itu, perbandingan udara dan bahan bakar juga berpengaruh terhadap laju konversi sebuah katalis. Pada gambar di bawah ini ditunjukkan hubungan laju konversi dari  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  dan  $\text{NO}_x$  terhadap perbandingan udara dan bahan bakar pada kondisi statis dan kondisi dinamis.



Gambar 2.17 Grafik Hubungan laju konversi katalis terhadap lambda ( $\lambda$ ) di bawah kondisi statis  
 Sumber: Jenbacher (1996:481)



Gambar 2.18 Grafik Hubungan laju konversi katalis terhadap lambda ( $\lambda$ ) di bawah kondisi dinamis  
 Sumber: Jenbacher (1996:481)

Katalis akan kehilangan keefektifannya akibat adanya penurunan keaktifan material pada saat gas buang panas. Penurunan kereaktifan katalis ini pada dasarnya disebabkan oleh tempat-tempat yang aktif menjadi terkontaminasi dan beracun, atau logam yang meleleh akibat temperatur pengoperasian yang tinggi untuk periode yang lama. Efeknya, reduksi area permukaan dari tempat-tempat yang aktif tidak cukup untuk mengubah seluruh aliran gas yang melalui tempat-tempat yang efektif tersebut (Heisler, 1995:698).

Reaksi pada *catalytic converter* dimulai dengan penyerapan (*adsorption*) komponen polutan dari gas buang dan oksigen di permukaan katalis. Proses penyerapan berakibat pada melemahnya ikatan antara atom-atom dari molekul-molekul pengikat karena beberapa energi terbagi bersama-sama dengan permukaan katalis. Ikatan atom-atom yang kurang ketat menyebabkan atom-atom ini

mudah bereaksi dengan atom-atom lain, seperti itulah reaksi diantara atom-atom tersebut menjadi lebih mudah dan lebih cepat (Jenbacher, 1996:480).

Selanjutnya adalah tahap *formation of activated complex* yaitu partikel yang berdekatan salah satu bergabung membentuk *intermediate complex*. Di mana *activated complex* tidak stabil itu hanya berlangsung dalam keadaan yang singkat (Somorjai, 1994).



Gambar 2.19 Komposisi gas buang pada saat proses reaksi di *catalytic converter*  
Sumber: Heisler (1995:698)

“Diteruskan dengan tahap *decomposition of activated complex* yaitu *activated complex* pecah membentuk partikel baru. Partikel produk tersebut ditahan pada permukaan katalis dengan ikatan kimia parsial” (Somorjai, 1994).

“Tahap terakhir adalah *desorption of products* yaitu pelepasan partikel produk yang ditahan oleh permukaan katalis” (Somorjai, 1994).

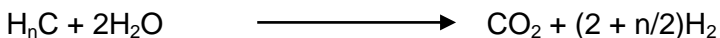
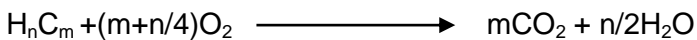
Ke empat tahap di atas disebut *the adsorption theory (heterogeneous)*, yaitu reaksi dua gas pada solid katalis.

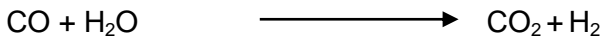
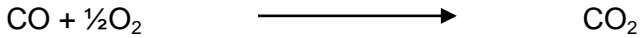


Gambar 2.20 Reaksi pada *catalytic converter*  
Sumber: Heisler (1995:699)

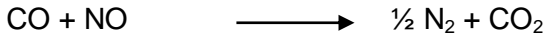
Reaksi paling penting yang terdapat pada *catalytic converter* adalah sebagai berikut.

Konversi HC dan CO





#### Konversi NO<sub>x</sub>



#### Reaksi tambahan



### 2.2.6 Tembaga (Cu)

"Tembaga merupakan logam yang dapat dijadikan katalis oksidasi dan katalis reduksi" (Obert 1973:381). Tembaga adalah suatu logam berwarna kemerahan dengan berat jenis 8,96 g/cm<sup>3</sup> dan mempunyai titik lebur 1083°C. (Jenbacher, 1996:480)

Paduan tembaga dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu:

1. Kuningan (*brass*), paduan tembaga dengan unsur paduan utama seng, antara lain:
  - a. *Alpha brass*, dengan kandungan seng tidak lebih dari 36%.

- b. *Alpha beta brass*, dengan kandungan seng lebih dari 36%.
2. Perunggu (*bronze*), paduan tembaga dengan unsur paduan utama selain seng.
  - a. *Tin bronze*, dengan unsur paduan utama timah putih.
  - b. *Silicon bronze*, dengan unsur paduan utama silikon.
  - c. *Aluminium bronze*, dengan unsur paduan utama aluminium.
  - d. *Beryllium bronze*, dengan unsur paduan utama beryllium (Suherman, 1987:150)

Selain itu, tembaga juga mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Berwarna merah jambu.
2. Titik leleh  $1083^{\circ}\text{C}$ .
3. Titik didih  $2595^{\circ}\text{C}$ .
4. Massa atom  $63,55 \text{ g/mol}$ .
5. Berat jenis  $8,96 \text{ g/cm}^3$ .
6. Penghantar listrik baik.
7. Mudah dibentuk dalam keadaan dingin ataupun panas.
8. Kekerasan Vickers 369 Mpa.
9. Kekerasan Brinell 874 Mpa.

### **2.2.7 Teori Energi Kinetik pada Proses Pembilasan (Scavenging)**

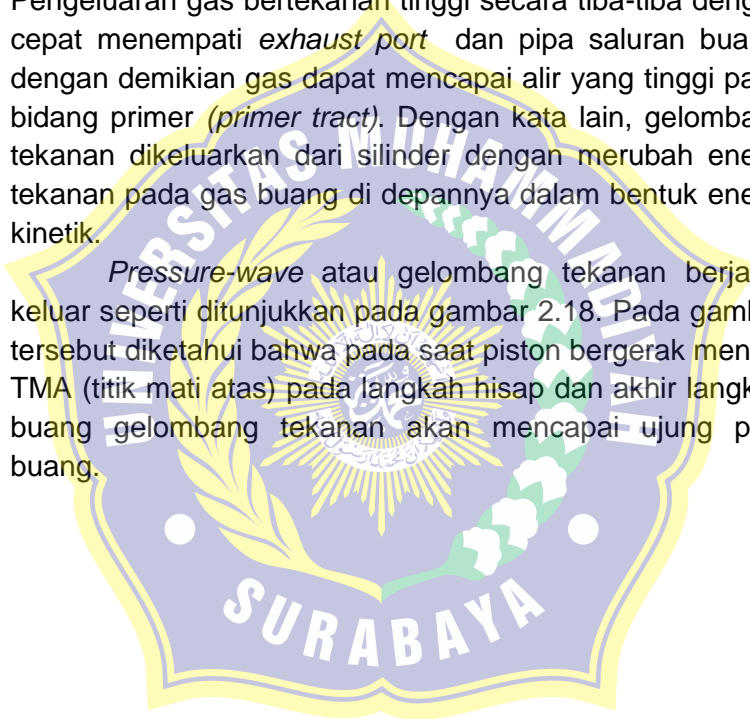
Mekanisme pembilasan (*scavenging*) gas buang dari ruang bakar pada akhir langkah buang adalah pemanfaatan energi kinetik dari keluaran gas buang yang menghasilkan gelombang tekanan (*compression-wave*) yang diikuti oleh gelombang ekspansi (*expanssion-wave*)

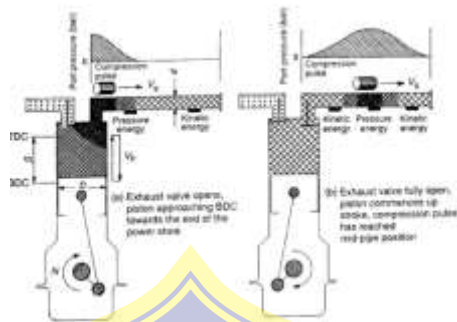


yaitu tekanan gas buang berkurang menjadi *depression* pada daerah pengeluaran gas buang pada *exhaust port* dari sistem saluran gas buang.

Pembukaan katub buang pada saat akhir langkah usaha mengeluarkan produk pembakaran yang mempunyai tekanan tinggi pada *exhaust port* dan pipa gas buang. Pengeluaran gas bertekanan tinggi secara tiba-tiba dengan cepat menempati *exhaust port* dan pipa saluran buang, dengan demikian gas dapat mencapai alir yang tinggi pada bidang primer (*primer tract*). Dengan kata lain, gelombang tekanan dikeluarkan dari silinder dengan merubah energi tekanan pada gas buang di depannya dalam bentuk energi kinetik.

*Pressure-wave* atau gelombang tekanan berjalan keluar seperti ditunjukkan pada gambar 2.18. Pada gambar tersebut diketahui bahwa pada saat piston bergerak menuju TMA (titik mati atas) pada langkah hisap dan akhir langkah buang gelombang tekanan akan mencapai ujung pipa buang.





Gambar 2.21 Teori kinetik pada proses pembilasan (scavenging)

Sumber: Heisler (1995:273)

Kecepatan pulsa *pressure-wave* sangat melebihi kecepatan pengeluaran gas buang saat melalui *exhaust port* pipa gas buang. Hal ini disebabkan gerakan piston yang mendorong gas buang keluar dari silinder menuju *exhaust port*. Oleh karena itu, gas buang dari sisi belakang dari gelombang tekanan mejadi berkurang kecepatannya yang disebabkan oleh bersamaan dengan turunnya tekanan pada *exhaust port* yang menjadi negatif (gambar 2.18). Penurunan tekanan ini terjadi selama periode *valve-overlape* yang sangat membantu guna menarik sisa gas buang ke luar dari ruang bakar ke dalam *exhaust port* dan

pada saat yang sama menarik bahan bakar segar dari *induction port* untuk mengisi bahan bakar yang telah kosong.

## 2.2.8 Standard Emisi Gas Buang

Menurut Euro-6 penurunan hingga 67 % tingkat nitrogen oksida yang diizinkan pada bahan bakar diesel dan pengenalan batas jumlah partikel untuk bensin. Pembuat mobil menggunakan dua metode untuk memenuhi batas-batas diesel pada Euro-6. Pertama, melalui reduksi katalitik selektif, yang melibatkan cairan yang merubah nitrogen oksida menjadi air dan nitrogen yang disemprotkan ke dalam knalpot mobil. Kedua, sistem resirkulasi gas buang dipasang menggantikan sebagian gas buang untuk mengurangi jumlah nitrogen yang dapat diubah menjadi NOx.

Batas emisi Euro untuk motor bensin CO : 1.00 g/km , HC : 0.10 g/km

Sedangkan tabel faktor emisi CO<sub>2</sub> berdasarkan jenis kendaraan sebagai berikut :

**Tabel 2.2. Faktor CO<sub>2</sub> berdasarkan jenis kendaraan**

Kategori	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	PM10 (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	SO <sub>2</sub> (g/km)
Sepeda Motor	14	5.9	0.29	0.24	3180	0,008
Mobil (bensin)	40	4	2	0.01	3180	0.026
Mobil (solar)	2.8	0.2	3.5	0.53	3172	0.44
Bus	11	1.3	11.9	1.4	3172	0.93
Truk	8.4	1.8	17.7	1.4	3172	0.82

Sumber : Suhadi dalam Srikandi , 2008