

## ALAT PENURUN EMISI GAS BUANG PADA MOTOR, MOBIL, MOTOR TEMPEL DAN MESIN PEMBAKARAN TAK BERGERAK

I Gusti Bagus Wijaya Kusuma

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80361, Indonesia

E-mail: wijaya\_kusuma@telkom.net

---

### Abstrak

Penggunaan kendaraan bermotor perlu diikuti dengan upaya untuk melestarikan lingkungan hidup, karena gas buang dari hasil proses pembakaran sangat nyata pengaruhnya terhadap pencemaran udara dan lingkungan. Satu metoda untuk menyelesaikan permasalahan di bidang pencemaran udara telah dilakukan dengan menggunakan suatu alat tambahan, yang dirancang di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana. Berdasarkan pada data pengujian yang telah dilakukan terhadap alat tambahan tersebut, tampak dengan jelas bahwa alat tambahan yang telah dirancang mampu mengurangi emisi gas CO secara signifikan, hingga batas paling minimum, serta secara rata – rata mampu dikurangi hingga di atas 54 %. Selain mampu mengurangi emisi gas buang CO<sub>2</sub> dan HC, juga mampu meningkatkan kandungan O<sub>2</sub>. Alat tambahan tersebut tidak berpengaruh terhadap unjuk kerja kendaraan saat beroperasi. Satu keuntungan lainnya adalah alat tambahan juga mampu mengurangi tingkat kebisingan yang ditimbulkan oleh motor.

### Abstract

**Emission gas reducer on motor vehicle, automobile, light engine of boat and stationary combustion engine.** The use of motor vehicle should be followed by protection against damages on the environment, since the exhaust gas from combustion engine has significantly affect on air and environmental pollution. One method to solve the problems in air pollution has been done by using a re-heater designed in Mechanical Engineering Department, University of Udayana. In accordance to the test on the re-heater, it can be seen very clear that the re-heater has significantly reduce the CO emission of about 54%. It also reduces the CO<sub>2</sub> dan HC emission, and in the other side increases the number of O<sub>2</sub>. The re-heater has no significant effect to engine performance during the operation and also reduces the noise of motor.

*Keywords: emission gas reducer, motor*

---

### 1. Pendahuluan

Perkembangan otomotif sebagai alat transportasi, baik di darat maupun di laut, sangat memudahkan manusia dalam melaksanakan suatu pekerjaan. Selain mempercepat dan mempermudah aktivitas, di sisi lain penggunaan kendaraan bermotor juga menimbulkan dampak yang sangat buruk terhadap lingkungan, terutama gas buang dari hasil pembakaran bahan bakar yang tidak terurai atau terbakar dengan sempurna.

Seperti diketahui bahwa proses pembakaran bahan bakar dari motor bakar menghasilkan gas buang yang secara teoritis mengandung unsur CO, NO<sub>2</sub>, HC, C, H<sub>2</sub>,

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan N<sub>2</sub>, dimana banyak yang bersifat mencemari lingkungan sekitar dalam bentuk polusi udara. Unsur gas karbon monoksida (CO) yang berpengaruh bagi kesehatan makhluk hidup perlu mendapat kajian khusus, karena unsur karbon monoksida hasil pembakaran bersifat racun bagi darah manusia pada saat pernafasan, sebagai akibat berkurangnya oksigen pada jaringan darah. Jumlah CO yang terdapat di dalam darah, lamanya dihirup dan kecepatan pernafasan menentukan jumlah karboksi-hemoglobin (kombinasi hemoglobin/karbon-monoksida) di dalam darah, dan jika jumlah CO sudah mencapai jumlah tertentu/jenuh di dalam tubuh maka akan menyebabkan kematian.

Penggunaan kendaraan bermotor di dalam kehidupan manusia tidak bisa dikurangi, seiring dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk. Hal yang perlu diperhatikan pula adalah meningkatnya jumlah kendaraan namun tidak diikuti dengan upaya pelestarian lingkungan hidup, sehingga disini perlu dipertimbangkan dampak dari gas buang hasil proses pembakaran terhadap pencemaran udara dan lingkungan.

Penelitian yang dilakukan oleh penulis sebagai hasil kerja sama dengan Bapedalda Propinsi Bali, menyiratkan bahwa gas karbon monoksida yang berasal dari gas buang kendaraan akan sangat tinggi pada saat motor dioperasikan pada beban yang besar dan putaran yang rendah. Hal ini identik dengan kondisi saat macet, karena pada kondisi macet inilah maka motor beroperasi pada beban yang tinggi namun putaran rendah. Ini berarti, gas karbon monoksida yang dilepas ke lingkungan akan semakin tinggi pada saat macet. Semakin banyak simpul – simpul kemacetan, semakin banyak pula pelepasan gas karbon monoksida dan karbon dioksida ke lingkungan.

Untuk pemakaian pada motor tempel dan *stationer engine*, maka pengoperasian motor adalah identik dengan kondisi macet tersebut di atas, karena keduanya beroperasi pada beban yang tinggi dan putaran yang rendah. Hal ini disebabkan karena motor tempel dan *stationer engine* memerlukan torsi dan daya yang besar untuk menghasilkan percepatan (akselerasi) yang tinggi.

Houghton [1] telah memprediksikan bahwa peningkatan konsentrasi gas karbon monoksida dan karbondioksida di atmosfer akan menaikkan temperatur global dan secara langsung akan meningkatkan pula temperatur lokal. Peningkatan konsentrasi gas karbon dioksida di atmosfer dalam jumlah dua kali lipat dari kondisi semula di tahun 1995 (seiring dengan semakin banyaknya jumlah kendaraan yang beroperasi serta operasi dari kendaraan yang kurang terawat), akan menaikkan temperatur global sekitar 1 – 3.5 °C pada tahun 2100. Kenaikan temperatur di atmosfer harus terus terkontrol agar tidak melebihi angka 0.1 – 0.35 °C dalam satu dasawarsa.

Beranjak dari pemikiran di atas, penulis kembali bekerja sama dengan Bapedalda Propinsi Bali membuat dan mengembangkan suatu alat tambahan yang berfungsi untuk mengurangi emisi gas buang CO, CO<sub>2</sub> dan HC yang disebabkan oleh mesin pembakaran, sampai batas yang dapat diterima (*acceptable level*). Meskipun Pemerintah Propinsi Bali mencanangkan konsentrasi ambang batas gas buang CO adalah sebesar 4 %, namun seiring dengan semakin meningkatnya jumlah mesin pembakaran yang beroperasi, maka nilai emisi gas buang tersebut harus terus dikurangi, agar perubahan

temperatur lokal di Bali dapat dipertahankan sebesar 0.1°C dalam satu dasawarsa.

Adapun polutan-polutan dari gas buang yang sangat mengganggu kesehatan adalah NO<sub>x</sub>, HC, CO [2]

Gas NO<sub>x</sub> dapat menyebabkan sesak napas pada penderita asma, sering menimbulkan sukar tidur, batuk-batuk dan dapat juga mengakibatkan kabut atau asap. NO<sub>x</sub> adalah gas yang tidak berwarna tidak berbau, tidak memiliki rasa, dan dengan O<sub>2</sub> akan sangat mudah, cepat bereaksi dan berubah menjadi NO<sub>2</sub> karena bersenyawa dengan O<sub>2</sub>. Gas NO<sub>2</sub> (nitrogen dioksida), dapat juga merusak jaringan paru-paru dan jika bersama H<sub>2</sub>O akan membentuk *nitric acid* (HNO<sub>3</sub>) yang pada gilirannya dapat menimbulkan hujan asam yang sangat berbahaya bagi lingkungan. Gas NO<sub>x</sub> terbentuk akibat temperatur yang tinggi dari suatu pembakaran.

Hidrokarbon (HC) merupakan gas yang tidak begitu merugikan manusia, akan tetapi merupakan penyebab terjadinya kabut campuran asap (*smog*). Pancaran hidrokarbon yang terdapat pada gas buang berbentuk *gasoline* yang tidak terbakar. Hidrokarbon terdapat pada proses penguapan bahan bakar pada tangki, karburator, serta kebocoran gas yang melalui celah antara silinder dan torak yang masuk ke dalam poros engkol yang biasa disebut *blow by gases* (gas lalu).

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa karbon monoksida (CO) sebagai gas yang cukup banyak terdapat di udara, dimana gas ini terbentuk akibat adanya suatu pembakaran yang tidak sempurna. Gas karbon monoksida mempunyai ciri yang tidak berbau, tidak terasa, serta tidak berwarna. Kendaraan bermotor memberi andil yang besar dalam peningkatan kadar CO yang membahayakan. Di dalam semua polutan udara maka CO adalah pencemar yang paling utama.

Beberapa upaya untuk mengurangi polusi udara dapat dinyatakan sebagai berikut ini:

1. Mengembangkan substitusi bahan bakar dengan tujuan untuk mengurangi polutan (substitusi ini bisa berupa bahan bakar tanpa timbal ataupun gas).
2. Mengembangkan sumber tenaga alternatif yang rendah polusi (sumber tenaga bisa berupa tenaga listrik, tenaga surya, ataupun tenaga angin).
3. Memodifikasi mesin untuk mengurangi jumlah polutan yang terbentuk (modifikasi mesin bisa dilakukan baik dengan menggunakan *turbo cyclone*, memperbaiki sistem pencampuran bahan bakar, maupun dengan mengatur pendinginan di dalam ruang bakar).
4. Mengembangkan sistem pembuangan yang lebih sempurna (sistem pembuangan dari gas buang bisa disempurnakan dengan menggunakan semacam *re-heater* yang telah dikembangkan di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, ataupun

- dengan menggunakan *catalytic converter* yang biasanya dipasang pada kendaraan mewah).
5. Memperbaiki sistem pengapian (sistem pengapian kendaraan dapat diperbaiki dengan mengatur *ignition time* dan *delay period* dari motor bakar, salah satunya adalah dengan menggunakan *power ignition, EFI (Electronic Full Injection)*).
  6. Meningkatkan perawatan kendaraan bermotor dengan jalan memeriksa kandungan gas buang setiap 6 atau 12 bulan.
  7. Menghindari cara pemakaian yang justru menghasilkan polutan yang tinggi (beberapa cara pemakaian yang salah adalah dengan meng-*geber-geber* pedal gas ataupun melakukan *trek – trek*-an di jalan raya, menambahkan pelumas pada knalpot kendaraan sehabis di servis, dan beban angkut yang melebihi kapasitas daya angkut motor).

Berdasarkan pada teori tersebut di atas, maka dibuatlah alat tambahan dengan mempertimbangkan faktor dan parameter tersebut.

## 2. Metode

Adapun prinsip kerja alat penurunan emisi gas buang adalah sebagai berikut:

- Pada dasarnya alat yang dirancang untuk menurunkan kadar karbon monoksida (CO) menggunakan sistem *re-heater* yaitu dengan memanaskan kembali gas sisa hasil pembakaran yang dibuang pada ujung knalpot dengan memanfaatkan panas dari ruang bakar pada kendaraan tersebut. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1a.
- Panas dari ruang bakar dicerat dengan menggunakan pipa pelaluan yang dipertahankan panasnya dengan menggunakan isolasi, seperti disajikan pada Gambar 1a. Adapun panas yang dicerat tersebut digunakan untuk memanaskan kembali gas yang keluar dari knalpot untuk menguraikan senyawa CO menjadi unsur C + O<sub>2</sub>, seperti disajikan pada Gambar 1b.
- Untuk menguraikan setiap mol CO menjadi C + O<sub>2</sub>, diperlukan kalor sebesar 26 kkal/mol [3]. Besarnya energi ini diperoleh dari pemanasan tadi.
- Gas panas yang dicerat dari ruang bakar, akan memberikan dampak yang buruk jika dibuang langsung ke lingkungan karena memiliki temperatur yang masih sangat tinggi. Sehingga dalam hal ini diperlukan suatu pendinginan terlebih dahulu sebelum gas buang yang dicerat tersebut dialirkan ke knalpot bagian depan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan pipa yang berliku, seperti disajikan pada Gambar 1b.
- Temperatur gas buang yang masuk ke dalam alat tambahan harus mampu mencapai panas sebesar 26

Kkal/mol, agar perpindahan panas yang terjadi dapat sebesar mungkin. Apabila perpindahan panas yang terjadi di dalam alat mendekati harga tersebut, maka waktu yang diperlukan untuk menguraikan gas buang CO menjadi lebih singkat.

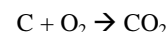
- Sistem ini bekerja dan bertujuan untuk memanaskan gas buang hasil proses pembakaran, dimana gas buang yang berada di ujung knalpot dipanaskan dengan gas buang yang temperturnya lebih tinggi, seperti disajikan pada Gambar 1a dan 1b. Sistem ini dioperasikan oleh kalor semata (*heat-operated system*) karena sebagian besar proses operasi berkaitan dengan pemberian kalor untuk melepaskan gas-gas buang pada tekanan dan temperatur tinggi. Proses pemanasannya akan berlangsung secara periodik, serta gas buang dengan temperatur tinggi tersebut akan terus mengalir ke dalam alat yang berfungsi untuk memanaskan gas buang yang keluar dari knalpot. Hasil pemanasan kembali terhadap gas yang keluar dari knalpot inilah yang akan menurunkan emisi gas buang kendaraan, serta hal ini belum pernah dicoba oleh para peneliti yang lainnya.
- Metoda untuk menghitung laju pertukaran kalor di dalam *re-heater* disajikan dalam Lampiran 2.

## 3. Hasil dan Pembahasan

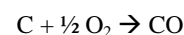
Berdasarkan pada hasil pengujian, disampaikan bahwa alat penurun emisi gas buang yang dibuat mampu mengurangi emisi gas buang CO hingga 50% dari harga semula, sedangkan CO<sub>2</sub> mampu direduksi antara 40% hingga 58%, HC mampu dikurangi antara 40% hingga 50%, serta kandungan O<sub>2</sub> meningkat hingga 10%, seperti disajikan pada Tabel 1 - 5.

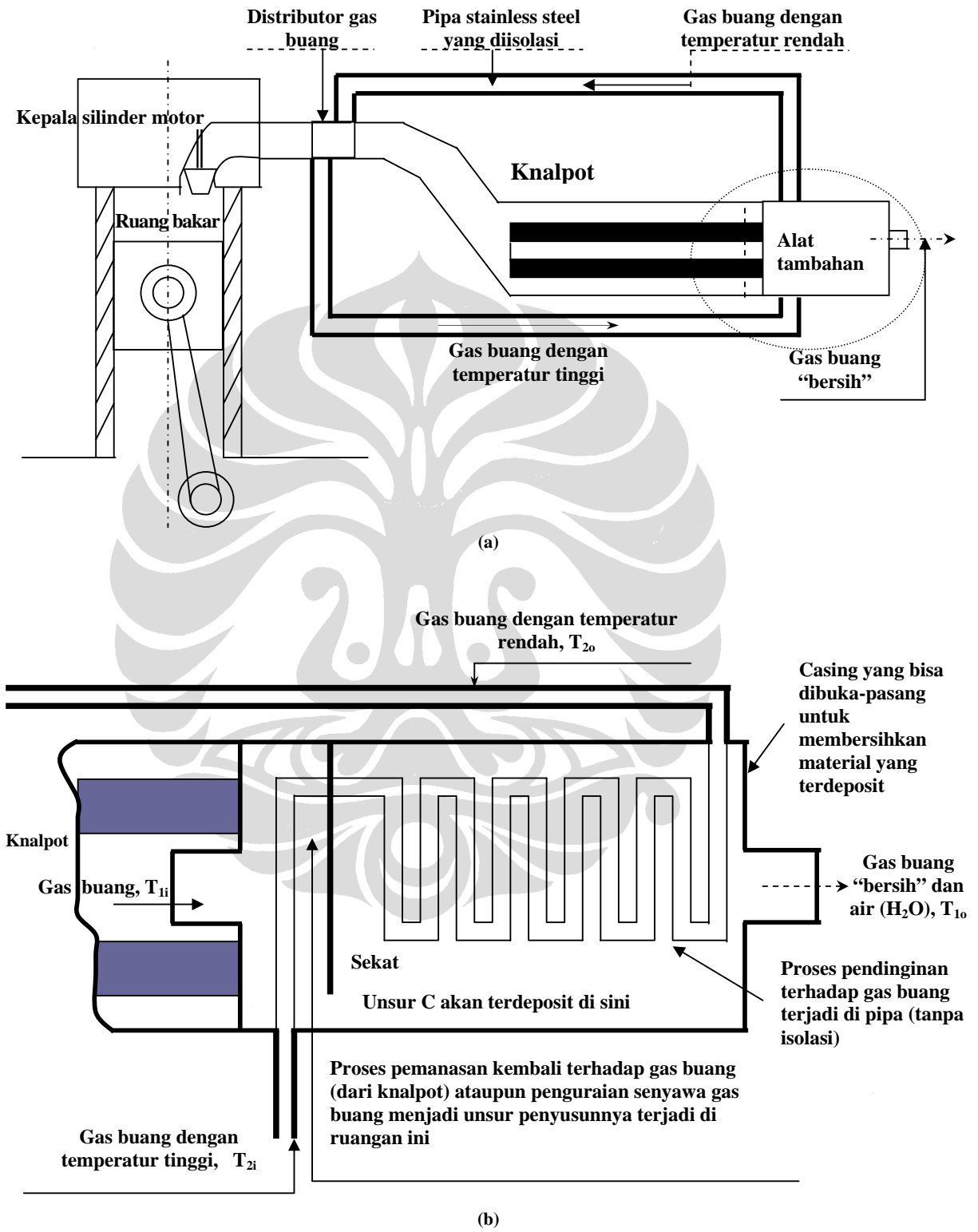
Hal ini berarti, bahwa alat tersebut mampu bekerja untuk mengurangi emisi gas buang CO dan CO<sub>2</sub>, sesuai dengan reaksi kimia yang telah disampaikan di atas. Argumen ini juga didukung oleh meningkatnya kandungan oksigen yang dihasilkan, berarti bahwa pengurangan senyawa CO bukanlah karena berubah menjadi senyawa CO<sub>2</sub>, tetapi lebih cenderung karena terurai menjadi unsur C dan O<sub>2</sub>.

Bila karbon di dalam bahan bakar terbakar habis dengan sempurna maka terjadi reaksi berikut:



Dalam proses ini yang terjadi adalah CO<sub>2</sub>. Apabila unsur-unsur oksigen (udara) tidak cukup, akan terjadi proses pembakaran tidak sempurna, sehingga karbon di dalam bahan bakar terbakar dalam suatu proses sebagai berikut:





Gambar 1. Skema alat tambahan

Karena emisi gas buang CO dan CO<sub>2</sub> berkurang, maka reaksi di dalam alat *re-heater* adalah menguraikan senyawa CO dan CO<sub>2</sub> menjadi unsur C dan O<sub>2</sub>. Unsur C terdeposit di dalam alat *re-heater*, karena terhalang oleh sekat dan pipa panas, seperti disajikan pada Gambar 1b. Unsur O<sub>2</sub> menjadi unsur bebas yang ke luar ke lingkungan.

Gas buang HC dibagi dua yaitu : (1) Bahan bakar yang tidak terbakar dan keluar menjadi gas mentah; (2) Bahan bakar terpecah karena reaksi panas berubah menjadi gugusan HC yang lain, yang keluar bersama gas buang.

Sebab utama timbulnya gas buang hidrokarbon adalah karena sekitar dinding-dinding ruang bakar memiliki temperatur rendah dimana pada temperatur itu pembakaran tidak mampu dilakukan.

Berkurangnya senyawa HC adalah karena gas buang dipanaskan kembali di ujung knalpot, sehingga gugusan HC berubah menjadi unsur H<sub>2</sub> dan C. Kemungkinan terbesar yang terjadi adalah unsur H<sub>2</sub> bersenyawa dengan unsur O<sub>2</sub> menjadi H<sub>2</sub>O, karena banyaknya massa H<sub>2</sub>O yang menetes keluar dari alat.

Berdasarkan pada kedua kejadian tersebut, maka dapat dijelaskan bahwa kedua unsur CO dan CO<sub>2</sub> terurai menjadi unsur C dan O<sub>2</sub>, sedangkan unsur HC terurai menjadi unsur H<sub>2</sub> dan C. Selanjutnya unsur H<sub>2</sub> akan bersenyawa dengan unsur O<sub>2</sub> membentuk gugus H<sub>2</sub>O. Hal inilah yang menyebabkan unsur O<sub>2</sub> yang dilepas ke lingkungan hanya sebesar 10%, karena telah bersenyawa untuk membentuk H<sub>2</sub>O.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil tersebut, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Secara umum dapat dikatakan bahwa alat tambahan yang dibuat telah bekerja dengan baik, sehingga mampu mengurangi emisi gas buang motor bakar hingga di bawah ambang batas yang dipersyaratkan, serta telah dibuktikan bahwa proses pengurangan emisi gas buang tersebut tidaklah meningkatkan kandungan gas CO<sub>2</sub> maupun nilai emisi HC, akan tetapi justru semakin meningkatkan kandungan O<sub>2</sub>. Hal ini terjadi karena energi panas yang disalurkan pada alat tambahan adalah pada

temperatur merata dari unsur gas buang. Seperti diketahui, gas CO dan CO<sub>2</sub> akan turun pada temperatur tinggi namun HC pada temperatur rendah, maka operasional dari alat tambahan adalah pada temperatur merata dari unsur gas buang tersebut.

2. Untuk dapat menurunkan semua konsentrasi gas buang, maka perlu dicari nilai temperatur hasil dari perpotongan antara temperatur CO, CO<sub>2</sub> dan HC, sehingga diharapkan pada temperatur tersebutlah maka semua konsentrasi gas buang akan terkoreksi dan diturunkan.
3. Pengujian kendaraan bermotor dengan kondisi penarikan gas secara berlebihan dan penambahan pelumas pada knalpot kendaraan menunjukkan hasil yang bagus terhadap pengurangan gas buang CO, yang mana emisi gas buang dari *re-heater* masih berada di bawah nilai 2%. Ini berarti, gas buang CO yang timbul di ujung knalpot kendaraan (bukan dari hasil proses pembakaran bahan bakar, tetapi akibat reaksi pelumas dengan gas buang kendaraan), masih bisa dikurangi dengan jalan mengalirkan gas panas ke dalam *re-heater*. Sekalipun temperatur gas buang yang mengalir ke dalam *re-heater* sangat rendah, namun *re-heater* dapat bekerja dengan baik sehingga masih mampu memutuskan rantai ikatan CO, meskipun tidak sempurna sebelumnya. Karenanya, untuk kondisi pengoperasian dengan penarikan gas yang berlebih dan ditambah dengan pelumas, maka alat tambahan yang dibuat memerlukan temperatur yang lebih tinggi.
4. *Re-heater* gas buang CO telah bekerja dengan baik sehingga mampu mengurangi emisi gas CO kendaraan bermotor hingga batas yang paling maksimal, yakni di bawah angka 2%. Harga ini jauh di bawah ambang batas 4%, seperti yang disampaikan oleh Bapedalda Propinsi Bali.

#### Daftar Acuan

- [1] J. T. Houghton, Science of Climate Change, Cambridge University Press, First Edition, New York, 1995, p. 152.
- [2] T. Sastrawijaya, Pencemaran Lingkungan, Penerbit Rineka Cipta, Edisi 1, Jakarta, 1995, p. 120.
- [3] A. H. Pudjaatmaka, Kimia Untuk Universitas, Erlangga, edisi 4, Jakarta, 1996, p. 90.

## Lampiran

### A. Data Hasil Pengujian

**Tabel A.1. Data untuk penarikan gas secara berlebihan dan penambahan pelumas pada sepeda motor 4 Langkah**

Beban (Persneling)	Waktu (menit)	Prosentase Emisi Gas Buang Tanpa Alat Penurun Emisi	Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Alat Penurun Emisi
Idle	5	2,8	1,0

**Tabel A.2. Data hasil pengujian pada sepeda motor 4 Langkah dengan Honda ASTREA GRAND**

Beban Idle	Prosentase Emisi Gas Buang Tanpa Alat Penurun Emisi				Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Alat Penurun Emisi			
	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %
Percobaan 1	1,57	1,7	724	16,36	0,66	0,7	358	19,06
Percobaan 2	1,5	1,6	626	16,8	0,65	0,6	337	19,12
Percobaan 3	1,66	1,8	765	16,26	0,66	0,7	366	19,12

**Tabel A.3. Data hasil pengujian pada sepeda motor 2 Langkah dengan Suzuki RC 100**

Beban Idle	Prosentase Emisi Gas Buang Tanpa Alat Penurun Emisi				Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Alat Penurun Emisi			
	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %
Percobaan 1	3,48	3,9	7300	11,7	1,27	2,2	3380	16,11
Percobaan 2	3,56	4,0	7120	11,58	1,34	2,3	3510	16,00
Percobaan 3	3,55	3,8	7220	11,84	1,37	2,1	3320	16,34

**Tabel A.4. Data hasil pengujian untuk mobil dengan Suzuki Jimny**

Beban Idle	Prosentase Emisi Gas Buang Tanpa Alat Penurun Emisi				Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Alat Penurun Emisi			
	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %
Percobaan 1	0,12	9,8	1711	7,71	0,05	7,4	1342	10,34
Percobaan 2	0,12	10,1	1527	6,40	0,05	7,4	1300	9,64
Percobaan 3	0,12	10,2	1660	6,42	0,04	7,7	1271	9,70

**Tabel A.5. Data hasil pengujian untuk mobil dengan Toyota Kijang**

Beban Idle	Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Power Ignition (MIT2000)				Prosentase Emisi Gas Buang Dengan Alat Penurun Emisi			
	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %	CO %	CO <sub>2</sub> %	HC (ppm)	O <sub>2</sub> %
Percobaan 1	0,15	13,3	1974	9,9	0,09	7,8	1131	19,2
Percobaan 2	0,15	13,3	2067	9,8	0,11	7,1	1057	14,4
Percobaan 3	0,17	14,1	2088	7,9	0,13	8,2	1192	17,3

**B. Perhitungan Perpindahan Panas pada Re-heater**

Perpindahan panas yang terjadi pada *re-heater*, seperti disajikan pada Gambar 1a dan 1b, dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$Q = U.A.\Delta T_{lmd}$$

dengan :

$$\Delta T_{lmd} = \frac{(T_{2i} - T_{1o}) - (T_{2o} - T_{1i})}{\ln[(T_{2i} - T_{1o}) / (T_{2o} - T_{1i})]} \quad (B.1)$$

dimana :

$T_{2i}$  = temperatur gas buang yang masuk ke dalam *re-heater*,  $T_{2i} = 800$  K

$T_{2o}$  = temperatur gas buang yang disirkulasikan kembali,  $T_{2o} = 353$  K

$T_{1i}$  = temperatur gas buang dari knalpot,  $T_{1i} = 323$  K

$T_{1o}$  = temperatur gas buang yang dilepas ke udara bebas,  $T_{1o} = 313$  K

A adalah luas permukaan *re-heater* dihitung berdasarkan pada luas permukaan bebasnya,

U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh dihitung berdasarkan persamaan:

$$U = \frac{1}{(1/h_{hot}) + (1/h_{cold})} \quad (B.2)$$

harga  $h_{hot}$  dan  $h_{cold}$  dicari berdasarkan pada *Reynolds* dan *Prandtl numbers*, dengan rumus:

$$h = Nu \frac{k}{D} = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4}$$

dimana:

$k$  adalah konduktivitas termis gas buang,

$D$  adalah diameter *re-heater* yang digunakan dalam distribusi gas buang,

$\bar{v}$  adalah kecepatan aliran gas buang,

$\rho$  adalah massa jenis gas buang dan

$\mu$  adalah kekentalan dinamis dari gas buang.

Besarnya beda temperatur logaritmik dicari berdasarkan persamaan:

$$\Delta T_{lmd} = \frac{(T_{2i} - T_{1o}) - (T_{2o} - T_{1i})}{\ln[(T_{2i} - T_{1o}) / (T_{2o} - T_{1i})]} \quad (B.3)$$

$$= 164 \text{ K}$$

dengan:

$$U = \frac{1}{(1/1,977 + 1/80,522)} = 1,930 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Bila luas penampang *re-heater*:

$$A = \pi.D.L = \pi. (0,1 \text{ m}) . (0,3 \text{ m}) = 0,094 \text{ m}^2$$

akan didapat:

$$Q = U.A.\Delta T_{lmd} = 29,75 \text{ Watt.}$$

Harga perpindahan panas yang terjadi di dalam *re-heater* adalah sebesar 29,75 Watt, sedangkan harga perpindahan panas yang diperlukan untuk memutuskan rantai CO adalah sebesar 26 kkal/mol.

Karena massa gas buang yang maksimum mengalir di dalam *re-heater* adalah sebesar  $1,07 \cdot 10^{-4}$  kg/s, maka jumlah mol gas buang CO yang mengalir di dalam *re-heater* adalah sebesar:  $1,07 \cdot 10^{-4}$  kg (setiap detiknya) dibagi dengan massa atom gas buang CO (28 gram/mol), atau sebesar  $3,8 \cdot 10^{-3}$  mol.

Jumlah energi yang digunakan untuk memutuskan rantai CO di dalam *re-heater* (setiap detiknya) adalah (29,75 Watt/ $3,8 \cdot 10^{-3}$  mol), atau 7,83 kWatt/mol.

Agar mampu mendapatkan harga 26 kkal/mol, maka diperlukan waktu sebesar (26 kkal . 4,2 Joule/kal)/ (7,83 kWatt), atau sekitar 13,95 detik.

Agar waktu penguraian gas buang CO menjadi sesingkat mungkin, maka hal yang paling penting dilakukan adalah mempertahankan temperatur gas buang di dalam pipa peluan agar tetap setinggi mungkin, dengan jalan melapisinya dengan isolator yang baik dan tebal. Demikian juga untuk proses CO<sub>2</sub> dan HC.

Berdasarkan pada hukum Termodinamika I, pada suatu sistem dimana kerja tidak dilakukan, maka seluruh panas yang diterima sistem diubah menjadi energi oleh sistem tersebut. Karena proses terjadi pada tekanan konstan (isobaris), serta selisih antara *enthalpy* penguraian gas buang CO (-26 kkal/mol) dengan jumlah panas yang diterima oleh gas buang (7,83 kWatt/mol) menghasilkan energi bebas yang negatif ( $\Delta G < 0$ ), maka proses akan berlangsung secara spontan dan terus menerus secara periodik.