

Upaya Pengurangan Polutan Gas Buang dengan Katalis Logam non Mulia

D.Sungkono, A. Sanata

Laboratorium Bahan Bakar & Motor Pembakaran Dalam Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Telp.(031) 594 6230, Fax. (031) 592 2941

Abstrak

Upaya pengurangan polutan gas buang yang memakai logam mulia telah banyak dilakukan oleh banyak peneliti. Untuk penggunaan logam non mulia seperti campuran Cu-Zn (komposisi 70-30) diuji cobakan pada sepeda motor 4-langkah. Pemakaian bahan bakar premium yang digunakan masih mengandung Pb, karena ketiadaan premium tanpa timbal dilokasi uji. Disini Cu-Zn diberlakukan sebagai katalis yang dipasang didalam muffler.

Uji coba dilakukan dengan menggunakan Honda Karisma 125 D yang dikopel dengan DYNomite Water Brake. Metode uji yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan katalis Cu-Zn tersebut dengan membandingkan polutan CO (carbomo-noksida) dan uHC (unburnt Hydrocarbon) yang dihasilkan pada kondisi asli(standar). Variasi katalis yang dimasukkan kedalam muffler berdasarkan berat Cu-Zn yang disesuaikan dengan ruang yang tersedia di muffler standar yang digunakan dalam penelitian. Perubahan yang dominan adalah merubah dari sistem reverse flow menjadi straight thru muffler.

Hasil penelitian, menunjukkan penggunaan (Cu-Zn) ternyata mampu menurunkan konsentrasi polutan gas karbon monoksida (CO) sebesar 79,92% dan hidrokarbon (uHC) sebesar 62,16%. Disisi lain unjuk kerja juga terjadi kenaikan yang cukup berarti yakni terjadi peningkatan torsi sebesar 13,39%, daya efektif sebesar 16,87%, dan menurunkan pemakaian konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 21,72% untuk kondisi optimum pada pengisian logam katalis kuningan sebesar 160 gr, namun terjadi peningkatan pada sound pressure level sebesar 3,56% untuk kondisi optimum pada pengisian katalis 200 gr.

Kata kunci : Cu-Zn (70-30), polutan gas buang.

Latar Belakang

Kontribusi pencemar udara disebabkan oleh polutan gas buang dari kendaraan bermotor semakin meningkat yang diindikasikan memberikan kontribusi sebesar 75 % terhadap total pencemaran udara perkotaan (Kristianto, 2005). Survey yang dilakukan oleh EPA tahun 1991 menunjukkan bahwa rata-rata kendaraan baru yang beredar di jalan mengemisikan 3 hingga 4 kali baku mutu yang ditetapkan pada kondisi perawatan yang minimal. Sedangkan persentase kendaraan yang tidak terawat akan semakin bertambah seiring dengan bertambahnya umur kendaraan, 30 % pada umur 5 tahun dan hampir 55 % pada umur 7 tahun. Namun demikian faktor lain tentunya juga berpengaruh terhadap tingginya kelebihan polutan dari suatu kendaraan, yaitu perilaku berkendara, yang cenderung meningkatkan polutan dari yang seharusnya (Saefudin, 2005). Penyebab utama polutan gas buang adalah pembakaran non-stoikiometri, disosiasi nitrogen, dan ketidakmurnian bahan bakar dan udara. Polutan gas buang kendaraan bermotor yang menjadi perhatian utama untuk mesin bensin adalah hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NOx), partikel dan timah hitam (Pb). Polutan-polutan tersebut diketahui sangat berbahaya dan berdampak buruk terhadap kesehatan. Seharusnya bahan bakar dan mesin dapat dikembangkan sehingga menghasilkan gas polutan berbahaya yang rendah dan tidak merugikan lingkungan. Selain itu perlu dilakukan usaha-usaha di dalam mengendalikan polutan gas buang, salah satunya adalah dengan melakukan suatu pengendalian dalam hal teknologi kendaraan yaitu dengan perawatan dan

uji emisi (penerapan standar emisi), penggunaan catalytic converter, meningkatkan kualitas bahan bakar, mengembangkan teknologi otomotif yang lebih ramah lingkungan, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar, dan pengembangan bahan bakar alternatif. Penerapan standar emisi yang ketat akan dapat menurunkan pencemaran secara signifikan. Sebagai bagian dari pengendalian pencemaran udara, Kementerian Lingkungan Hidup telah menetapkan EURO II menjadi standar emisi untuk kendaraan tipe baru melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 141/2003. Keputusan ini berlaku mulai tahun 2005 untuk semua tipe baru.

Berbagai penelitian tentang penggunaan catalytic converter dengan basis logam non mulia untuk mengurangi konsentrasi polutan kendaraan bermotor telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya oleh Astika (2000) yang menggunakan tembaga (Cu) untuk mengurangi polutan gas buang pada motor bensin. Hasil menunjukkan bahwa katalis Cu dapat menurunkan emisi CO 16,4% dan HC 32,05%, tetapi pada penelitian ini terjadi penurunan daya sebesar 16,85%. Jingga (2000), menggunakan katalis Magnesium (Mg) untuk menurunkan polutan gas buang motor bensin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Mg dapat menurunkan CO 16,47%, HC 24,46%, dan NO_x tidak ada penurunan yang signifikan. Pada penelitian ini, catalytic muffler mengakibatkan penurunan unjuk kerja mesin terutama daya pada putaran diatas 4000 rpm. Setiawan (2001), menggunakan katalis zeolit untuk mengurangi konsentrasi polutan gas buang motor bensin. Hasilnya menunjukkan bahwa katalis zeolit dapat menurunkan kadar polutan HC 58,23% dan NO_x 50,82%, sedangkan pada polutan CO terjadi kenaikan 33,94%. Pada penelitian ini terjadi peningkatan unjuk kerja sebesar 4,8-8,1%. Muhaji (2001), menggunakan zeolit alam dan Mangan (Mn) untuk menurunkan konsentrasi polutan gas buang motor bensin. Rancangan katalis berupa zeolit alam dan Mn yang dibentuk silinder dengan beberapa variasi lubang laluan gas buang. Hasil menunjukkan terjadi penurunan polutan CO 76,4%, HC 80,6% dan NO_x 70%, serta kenaikan unjuk kerja untuk daya meningkat 6% dan sfc turun 4,5%.

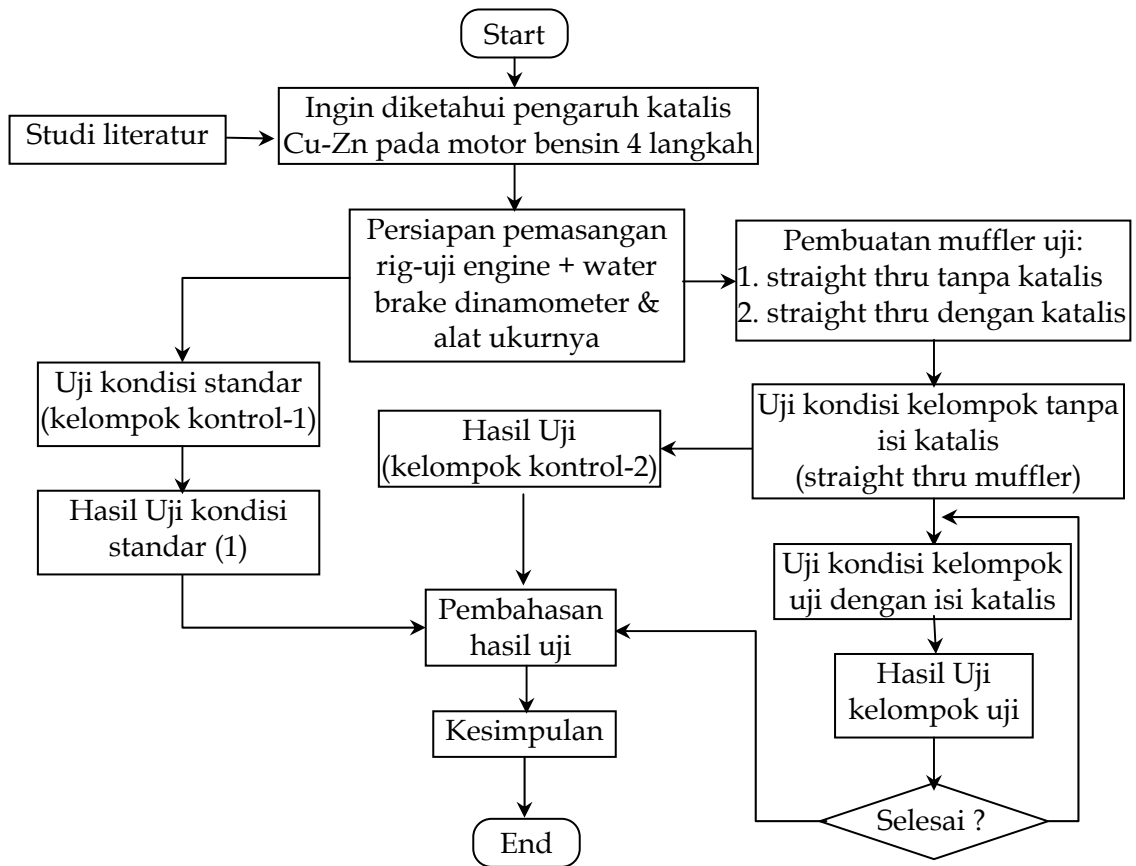
Rumusan Masalah

Dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa masih patut dicari penggunaan ma-terial logam non-mulia katalis lain yang dapat menurunkan konsentrasi polutan gas buang secara signifikan. Dalam penelitian ini logam kuningan (Cu-Zn) sebagai logam katalis non mulia digunakan. Penempatan katalis di knalpot juga diperhatikan agar tidak menghambat terhadap aliran dari gas buang sehingga unjuk kerja mesin dapat meningkat.

Penyelesaian permasalahan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah true experimental laboratory test method yaitu metode penelitian dengan membandingkan antara hasil percobaan kelompok kontrol, yakni kondisi motor standar (tanpa perubahan), dengan kelompok uji yang menggunakan knalpot yang telah dimodifikasikan. Kelompok kontrol standar memakai knalpot jenis reverse flow, sedangkan kelompok uji memakai straight thru muffler. Untuk itu digunakan kelompok kontrol-2 yakni motor yang menggunakan straight thru muffler tanpa katalis, dengan pipa sulingan baja dan satunya dari pipa jenis kuningan.

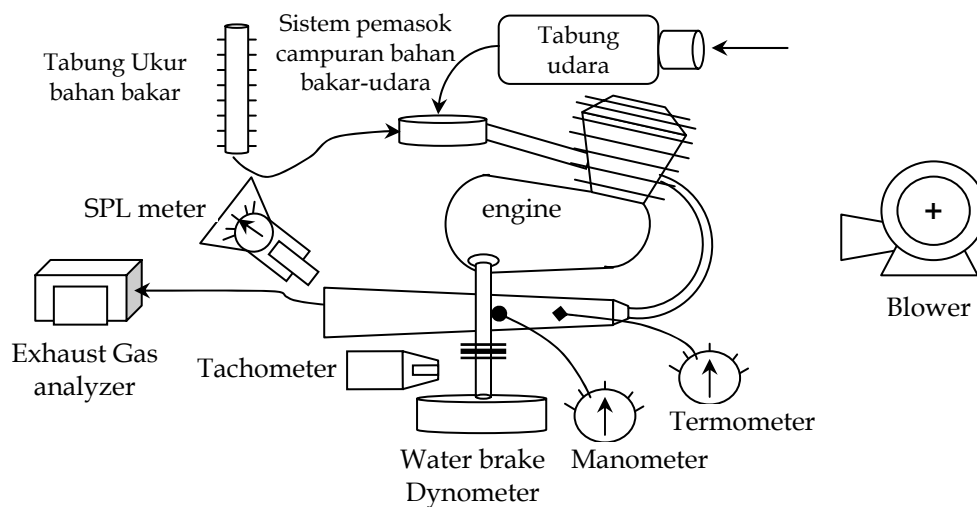
Pelaksanaan penyelesaian permasalahan dilakukan di laboratorium dengan diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 1, serta gambar 2, 3 dan 4 merupakan gambar-gambar skema alat uji, serta penampang knalpot.



Cat.: u/kelompok kontrol 2, terdiri dari 2 macam, pertama pipa sulingan dari baja dan kedua pipa sulingan dari kuningan, keduanya tanpa isi katalis.

Gambar 1. Reng-rengan diagram alir penyelesaian permasalahan

Pengujian dilakukan variabel putaran (Variable Speed Test) dengan bukaan katub penuh (WOT=Wide Open Throttle), dengan skema peralatan uji tersusun pada gambar 2.

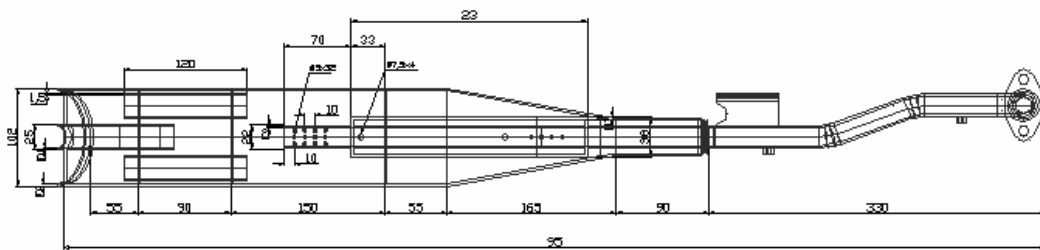


Gambar 2. Skema alat Uji

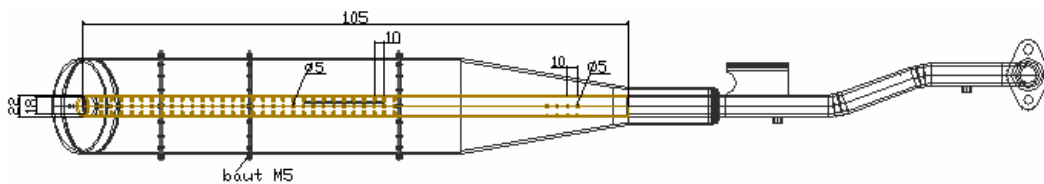
Pengujian :

1. Kelompok kontrol 1, yaitu knalpot standar jenis reverse flow Honda Karisma 125 cc.
2. Kelompok kontrol 2, knalpot tipe aliran straight thru muffler dengan pipa sulingan baja dan dengan pipa sulingan kuningan dimana dua-duanya tanpa logam pengisi kuningan.
3. Kelompok uji, knalpot tipe aliran straight thru muffler dengan pipa sulingan kuningan dan diisi logam katalis pengisi berupa kuningan.
 - a. logam pengisi kuningan bermassa 200 gr.
 - b. logam pengisi kuningan bermassa 180 gr.
 - c. logam pengisi kuningan bermassa 160 gr.
 - d. logam pengisi kuningan bermassa 140 gr.
 - e. logam pengisi kuningan bermassa 120 gr.
 - f. logam pengisi kuningan bermassa 100 gr.
 - g. logam pengisi kuningan bermassa 80 gr.

Gambar 3. adalah penampang knalpot standar Karisma, sedangkan gambar 4 adalah skema knalpot straight thru yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. Penampang muffler reverse flow Honda Karisma



Gambar 4. Penampang muffler straight thru untuk uji

Rumus yang digunakan :

Parameter	Rumus yang digunakan	Satuan
daya poros/efektif (Ne)	$Ne = \frac{T \cdot n}{716,2}$	(Hp)
bmp	$bmp = \frac{0,45 \cdot Ne \cdot z}{A \cdot L \cdot n \cdot i}$	(kg/m ²)
Sfc	$Sfc = \frac{\dot{m}_{bb}}{Ne}$	kg/Hp jam
Konsumsi udara (\dot{m}_{ud}) A/F	$\dot{m}_{ud} = K \cdot A_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho (P_1 - P_2)} = K \cdot A_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ud} \cdot (\rho_{f,manometer} \cdot g \cdot \Delta h)}$ $A/F = \frac{\dot{m}_{ud}}{\dot{m}_{bb}}$	Kg/sec.
efisiensi thermal.	$\eta_{th} = \frac{632}{Sfc \cdot Q_c} \cdot 100\%$	

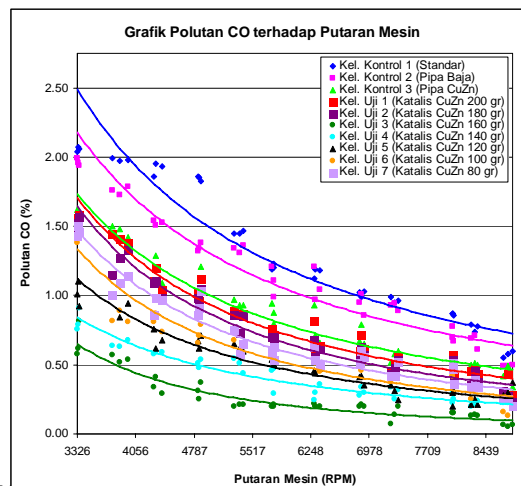
Hasil dan analisa:

Polutan Karbon Monoksida (CO)

Penggunaan catalytic converter dengan logam pengisi kuningan (Cu-Zn), gambar 5, yaitu dengan memasang katalis kuningan pada knalpot straight thru (knalpot uji) untuk menurunkan konsentrasi polutan gas karbomonoksida (CO). Pada grafik dan tabel berikut menunjukkan penurunan yang terjadi untuk polutan CO dari kondisi standar (kelompok kontrol 1).



Gambar 5. Kuningan (Cu-Zn, 70 – 30%) sebagai isi muffler straight thru untuk uji



Gambar 6. Konsentrasi CO vs rpm mesin untuk semua perlakuan

Tabel 1 Prosentase perubahan konsentrasi polutan CO.

Perlakuan	CO (%)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	1.32		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	1.15	-0.16	-12.43
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	0.88	-0.44	-33.09
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	0.82	-0.50	-37.72
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	0.76	-0.56	-42.36
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	0.26	-1.05	-79.92
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	0.42	-0.90	-67.96
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	0.53	-0.78	-59.47
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	0.61	-0.71	-53.78
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	0.69	-0.63	-47.78

Dari Grafik dan tabel diatas terlihat bahwa secara rata-rata terjadi penurunan konsentrasi CO pada berbagai kondisi kelompok uji bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1), yaitu terjadi penurunan terbesar pada kelompok uji 3 (knalpot straight thru kuningan dengan logam pengisi kuningan 160 gr) yaitu sebesar 79,92 % dari kondisi standar, dengan

konsentrasi CO rata-rata sebesar 0.26%. Laju reduksi per massa katalis rata-rata (Space hourly velocity/kg) untuk konsentrasi CO yang terjadi pada pengisian katalis kuning 160 gr ini adalah 153,19/jam, sedangkan laju reduksi per massa katalis pada konsentrasi CO terendah untuk katalis 160 gr adalah sebesar 125,41/jam pada putaran mesin sekitar 9000 RPM.

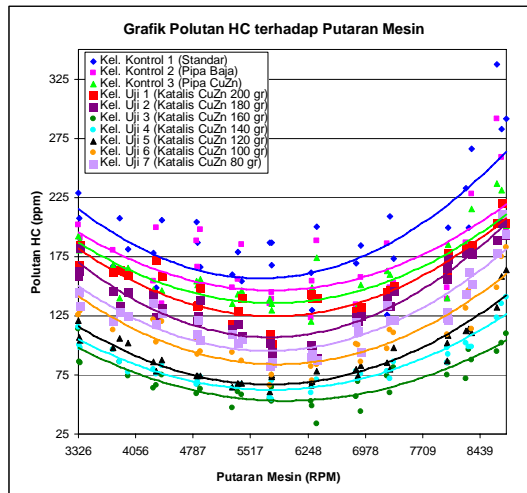
Keefektifan kelompok uji 3 (katalis 160 gr) dalam menurunkan konsentrasi CO sangat dipengaruhi proses pembakaran yang terjadi. Polutan gas CO terbentuk dari pembakaran tidak sempurna akibat kekurangan udara saat pembakaran. Dari grafik A/F terhadap putaran mesin menunjukkan bahwa pada putaran rendah A/F berada dibawah kondisi stoikiometri, sehingga mengakibatkan kekurangan udara (campuran kaya). Pada kondisi kekurangan udara (campuran kaya) ini pembakaran akan berlangsung tidak sempurna, akibatnya konsentrasi polutan CO yang terbentuk saat pembakaran menjadi tinggi. Pada putaran menengah dan tinggi, jumlah udara yang masuk ke dalam karbura-tor meningkat sehingga campuran udara dan bahan bakar semakin baik atau mendekati kondisi stoikiometri. Pada kondisi mendekati A/F stoikiometri, konsentrasi polutan CO menjadi lebih rendah. Pada putaran tinggi dengan semakin banyaknya udara yang masuk ruang bakar, konsentrasi CO menjadi semakin rendah karena banyaknya O₂ yang dapat digunakan untuk mengoksidasi CO menjadi CO₂ semakin besar.

Pada pembakaran tidak sempurna karena kekurangan udara (campuran kaya), terbentuk CO yang kemudian akan keluar bersama gas buang lain seperti O₂, NO_x dan HC. Sebenarnya CO tersebut dapat berubah menjadi CO₂ dengan cara bereaksi dengan O₂ atau NO_x, tetapi membutuhkan temperatur yang tinggi yaitu sekitar 700°C. Pada percobaan ini, temperatur yang terjadi maksimum hanya 420°C, sehingga pada temperatur ini CO tidak dapat berubah menjadi CO₂.

Penambahan katalis akan menurunkan energi aktivasi, sehingga reaksi oksidasi (penambahan O₂) antara CO dan O₂ dapat lebih mudah terjadi untuk membentuk CO₂. Selain itu, penambahan katalis pada pengujian ternyata mengakibatkan kenaikan temperatur. Kenaikan temperatur ini akan membantu semakin mempercepat reaksi, sehingga reaksi oksidasi antara CO dan O₂ untuk membentuk produk CO₂ dapat tercapai dalam waktu yang lebih singkat dan dalam temperatur yang lebih rendah dari temperatur yang dibutuhkan untuk mengoksidasi CO menjadi CO₂ pada kondisi tanpa katalis. Dari data percobaan, prosentase penurunan konsentrasi polutan oleh katalis juga tergantung dari temperatur kerja katalis. Dari tabel data temperatur pengujian dan grafik menunjukkan bahwa temperatur rata-rata optimum terjadi pada kelompok uji 3 (katalis 160 gr) yaitu sebesar 355 °C (meningkat 41,02% dari kelompok kontrol 3) dan menghasilkan konsentrasi CO sebesar 0,26% (menurun 69,98% dari konsentrasi polutan CO kelompok kontrol 3 yaitu sebesar 0,88%, dengan temperatur kerja 250°C).

Polutan Hidrokarbon (HC)

Penggunaan catalytic converter kuning (Cu-Zn) yaitu dengan memasang katalis kuning pada knalpot straight thru (knalpot uji) untuk menurunkan konsentrasi polutan gas hidrokarbon (HC). Dari Grafik dan tabel terlihat bahwa secara rata-rata terjadi penurunan konsentrasi HC pada berbagai kondisi kelompok uji bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1), yaitu terjadi penurunan terbesar terjadi pada kelompok uji 3 (knalpot straight thru kuning dengan logam pengisi kuning 160 gr) yaitu sebesar 62.16 % dengan konsentrasi HC rata-rata sebesar 72,28 ppm.



Gambar 7: Konsentrasi HC terhadap putaran mesin untuk semua perlakuan

Laju reduksi per massa katalis rata-rata (space hourly velocity/kg) untuk konsen-trasi HC yang terjadi pada pengisian katalis kuningan 160 gr ini adalah 21044,92 /jam, sedangkan laju reduksi per massa katalis pada penurunan konsentrasi HC terendah untuk katalis 160 gr adalah sebesar 29652,54 /jam pada putaran mesin sekitar 6500 RPM.

Tabel 2. Prosentase perubahan konsentrasi polutan HC.

Perlakuan	HC (ppm)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	191.03		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	171.25	-19.78	-10.35
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	161.33	-29.69	-15.54
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	153.08	-37.94	-19.86
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	139.50	-51.53	-26.97
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	72.28	-118.75	-62.16
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	84.17	-106.86	-55.94
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	92.31	-98.72	-51.68
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	111.00	-80.03	-41.89
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	124.17	-66.86	-35.00

Keefektifan kelompok uji 3 (katalis 160 gr) dalam menurunkan konsentrasi HC sangat dipengaruhi proses pembakaran yang terjadi. Polutan gas HC terbentuk dari ada-nya bahan bakar yang tidak terbakar karena proses pembakaran yang tidak sempurna akibat kekurangan udara saat pembakaran, sehingga bahan bakar keluar bersama-sama dengan gas buang. Dari grafik A/F terhadap rpm mesin menunjukkan bahwa pada pu-aran rendah A/F berada dibawah kondisi stoikiometri, sehingga mengakibatkan kekurangan udara (campuran kaya). Pada kondisi kekurangan udara (campuran kaya) ini pembakaran akan berlangsung tidak sempurna, akibatnya konsentrasi polutan HC yang terbentuk saat pembakaran menjadi tinggi. Selain itu pada putaran rendah temperatur dinding silinder ruang bakar juga masih rendah sehingga menyebabkan pembentukan polutan HC juga. Pada saat putaran mesin ditingkatkan, temperatur dinding silinder semakin meningkat dan jumlah udara yang masuk ke dalam karburator juga meningkat sehingga campuran udara dan bahan bakar semakin baik atau mendekati kondisi stoikiometri. Pada kondisi

mendekati A/F stoikiometri, konsentrasi polutan HC akan menjadi lebih rendah. Akan tetapi pada putaran tinggi konsentrasi HC meningkat, yang disebabkan karena tingginya putaran mesin sehingga mengakibatkan kurangnya waktu untuk menyelesaikan proses pembakaran dan konsentrasi HC yang terbentuk menjadi lebih tinggi.

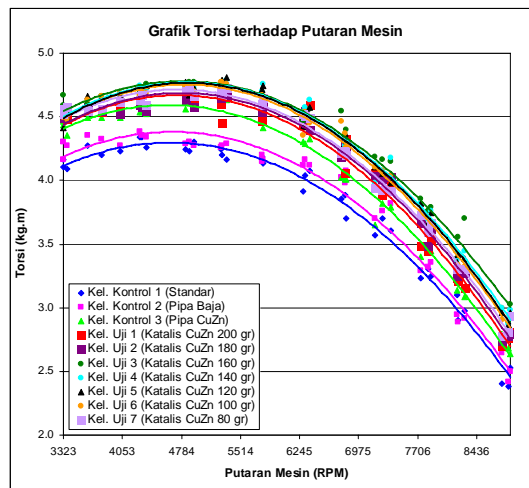
Pada pembakaran tidak sempurna karena kekurangan udara (campuran kaya), ter-bentuk HC yang kemudian akan keluar bersama gas buang lain seperti O_2 , NO_x dan CO . Sebenarnya HC tersebut dapat berubah menjadi H_2O dan CO_2 apabila HC dapat berreaksi dengan O_2 pada suhu yang tinggi yaitu sekitar $600^\circ C$. Pada pengujian, temperatur maksimum yang terjadi hanya $415^\circ C$, sehingga pada temperatur ini HC tidak dapat berubah menjadi H_2O dan CO_2 .

Dengan penambahan katalis ini akan menurunkan energi aktivasi dari reaksi, sehingga reaksi oksidasi (penambahan O_2) antara HC dan O_2 dapat lebih mudah terjadi untuk membentuk H_2O dan CO_2 . Penambahan katalis pada pengujian ternyata mengakibatkan kenaikan temperatur gas buang. Kenaikan temperatur ini akan membantu semakin mempercepat reaksi, sehingga reaksi oksidasi antara HC dan O_2 untuk membentuk produk H_2O dan CO_2 dapat tercapai dalam waktu yang lebih singkat dan dalam temperatur yang lebih rendah dari temperatur yang dibutuhkan untuk mengoksidasi HC menjadi H_2O dan CO_2 pada kondisi tanpa katalis. Prosentase penurunan konsentrasi polutan oleh katalis juga tergantung dari temperatur kerja katalis. Dari tabel data temperatur pengujian dan grafik menunjukkan bahwa temperatur optimum terjadi pada kelompok kontrol 3 (katalis 160 gr) yaitu sebesar $355^\circ C$ (meningkat 41,02% dari kelompok kontrol 3) dan menghasilkan konsentrasi polutan HC sebesar 72,28 ppm (menurun 55,20% dari konsentrasi polutan HC kelompok kontrol 3 yaitu sebesar 161,33 ppm, dengan temperatur kerja $250^\circ C$).

Torsi (T)

Penggunaan katalis kuningan (Cu-Zn) pada knalpot straight thru berpengaruh cu-kup baik dalam meningkatkan torsi yang dihasilkan oleh mesin pada masing-masing perlakuan dari kondisi standarnya (kelompok kontrol 1). Pada grafik dan tabel berikut menunjukkan peningkatan torsi yang terjadi untuk kelompok kontrol 2, kelompok kontrol 3 dan kelompok-kelompok uji dari kondisi standar (kelompok kontrol 1).

Dari grafik dan tabel terlihat bahwa secara rata-rata terjadi kenaikan torsi pada berbagai perlakuan percobaan bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1). Kenaikan torsi rata-rata terbesar pada percobaan ini adalah sebesar 13,39 % dengan menggunakan knalpot straight thru yang diisikan katalis kuningan dengan masa 160 gr (kelompok uji 3), dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). Torsi maksimum pada kelompok uji 3 (katalis 160 gr) terjadi pada putaran mesin sekitar 5000 rpm sebesar 4,77 kg.m. Besarnya kenaikan prosentase torsi yang lebih rendah dari kelompok uji 3 selanjutnya diikuti oleh kelompok uji 4 (katalis 140 gr) sebesar 12,53%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) sebesar 12,20%, kelompok uji 6 (katalis 100 gr) 11,73%, kelompok uji 7 (katalis 80 gr) 10,54%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 9,76%, dan kelompok uji 1 (katalis 200 gr) 8,98%, serta kemudian diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot straight thru pipa kuningan tanpa katalis sebesar 6,79% dan kelompok kontrol 2 (knalpot straight thru pipa baja tanpa katalis) sebesar 1,98% dari kondisi standar (kelompok kontrol 1).



Gambar 8 : Torsi terhadap rpm mesin untuk semua perlakuan

Tabel 3. Prosentase perubahan torsi

Perlakuan	Torsi (kg.m)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	3.79		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	3.86	0.07	1.98
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	4.04	0.26	6.79
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	4.13	0.34	8.98
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	4.16	0.37	9.76
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	4.29	0.51	13.39
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	4.26	0.47	12.53
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	4.25	0.46	12.20
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	4.23	0.44	11.73
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	4.19	0.40	10.54

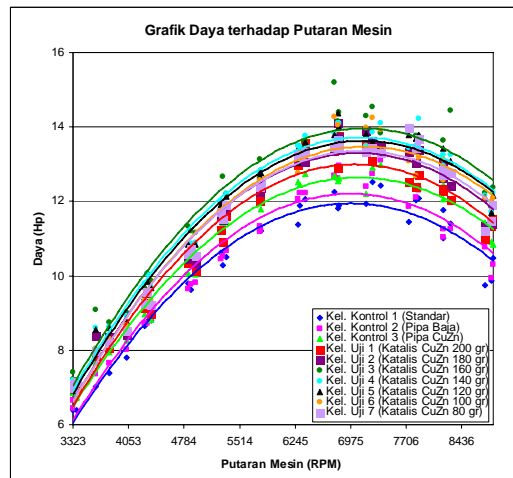
Pada perlakuan kelompok kontrol 1 yang menggunakan knalpot standar dengan sistem reverse flow muffler, terdapat hambatan terhadap kelancaran pembuangan gas buang. Hambatan ini akan mengurangi unjuk kerja dari mesin tersebut. Dengan modifikasi knalpot menjadi straight thru muffler maka aliran gas buang menjadi free flow sehingga secara umum terjadinya hambatan bisa ditekan seminimal mungkin, yang mengakibatkan meningkatnya torsi pada kelompok kontrol 2, 3 dan kelompok-kelompok uji seperti terlihat pada grafik.

Penambahan katalis akan mengakibatkan kenaikan torsi yang optimum pada perlakuan kelompok uji 3 (katalis 160 gr), tetapi dengan bertambahnya massa katalis untuk katalis 180 gr dan 200 gr torsi mengalami penurunan dari kondisi kelompok kontrol 3 (katalis 160 gr). Hal ini dapat dijelaskan dari temperatur yang tercapai pada katalis 180 gr dan 200 gr lebih rendah/menurun. Penambahan massa ini membuat semakin padat ruangan katalis, sehingga gas buang tidak dapat memasuki ruang katalis secara merata dan panas (energi) yang dapat diserap juga kecil untuk menghasilkan torsi.

Daya Efektif

Besarnya daya efektif sebanding dengan torsi yang terjadi, karena hal ini berhubungan dengan beban pengeremannya. Semakin besar beban pengeremannya semakin besar torsi yang terjadi, dan daya efektif yang dihasilkan juga semakin besar pada putaran dan bukaan throttle yang sama. Secara teoritis daya efektif diperoleh dari hasil perkalian torsi dengan putaran mesin,

sehingga dalam suatu pengujian daya maksimum belum tentu diperoleh pada saat torsi maksimum melainkan juga tergantung dari putaran mesin mesin yang dihasilkan.



Gambar 9 : Daya terhadap rpm mesin untuk semua perlakuan

Tabel 4. Prosentase perubahan daya

Perlakuan	Ne (Hp)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	10.29		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	10.49	0.20	1.98
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	10.91	0.62	6.06
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	11.17	0.88	8.55
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	11.43	1.14	11.09
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	12.02	1.74	16.87
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	11.81	1.52	14.77
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	11.71	1.43	13.87
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	11.54	1.26	12.24
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	11.46	1.18	11.43

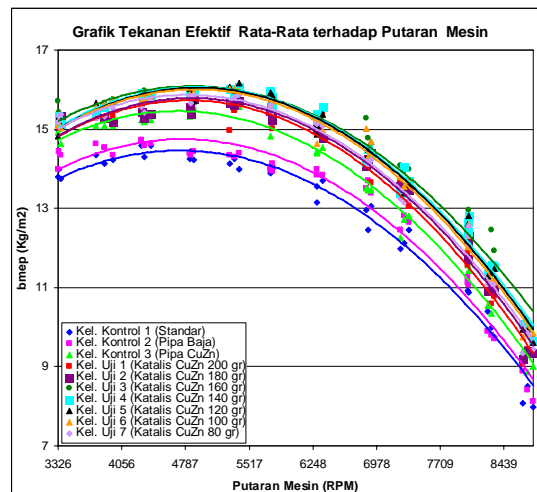
Dari grafik dan tabel diatas terlihat bahwa secara rata-rata terjadi kenaikan daya pada berbagai perlakuan pengujian bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1). Kenaikan daya rata-rata terbesar pada pengujian ini adalah sebesar 16,87% dengan menggunakan knalpot straight thru yang diisikan katalis kuning dengan masa 160 gr (kelompok uji 3), dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). Daya maksimum pada kelompok uji 3 (katalis 160 gr) terjadi pada putaran mesin sekitar 7000 RPM sebesar 15,19 Hp. Besarnya kenaikan prosentase daya yang lebih rendah dari kelompok uji 3 selanjutnya diikuti oleh kelompok uji 4 (katalis 140 gr) sebesar 14,77%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) sebesar 13,87%, kelompok uji 6 (katalis 100 gr) 12,24%, kelompok uji 7 (katalis 80 gr) 11,43%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 11,09%, dan kelompok uji 1 (katalis 200 gr) 8,55%, serta kemudian diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot straight thru pipa kuning tanpa katalis sebesar 6,06% dan kelompok kontrol 2 (knalpot straight thru pipa baja tanpa katalis) sebesar 1,98% dari kondisi standar (kelompok kontrol 1) sebesar 10,29 Hp.

Tekanan Efektif Rata-Rata (bmep)

Tekanan efektif rata-rata pengamatan dari suatu mesin didefinisikan sebagai tekanan konstan rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston untuk menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya poros pengamatan. Dengan pemasangan knalpot uji straight thru

secara umum berpengaruh terhadap kenaikan bmep pada setiap putaran mesin. Kenaikan bmep yang terjadi dapat ditunjukkan pada grafik dan tabel berikut.

Dari grafik dan tabel dibawah terlihat bahwa secara rata-rata terjadi kenaikan bmep pada berbagai perlakuan pengujian bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1). Kenaikan bmep rata-rata terbesar pada pengujian ini adalah sebesar 13,39% dengan menggunakan knalpot straight thru yang diisikan katalis kuning dengan masa 160 gr (kelompok uji 3), dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). Tekanan efektif rata-rata maksimum pada kelompok uji 3 (katalis 160 gr) terjadi pada putaran mesin sekitar 5000 rpm sebesar 16,03 kg/m². Besarnya kenaikan rata-rata prosentase bmep yang lebih rendah dari kelompok uji 3 selanjutnya diikuti oleh kelompok uji 4 (katalis 140 gr) sebesar 12,53%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) sebesar 12,20%, kelompok uji 6 (katalis 100 gr) 11,73%, kelompok uji 7 (katalis 80 gr) 10,54%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 9,76%, dan kelompok uji 1 (katalis 200 gr) 8,98%, serta kemudian diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot straight thru pipa kuning tanpa katalis sebesar 6,79% dan kelompok kontrol 2 (knalpot straight thru pipa baja tanpa katalis) sebesar 1,98% dari kondisi standar (kelompok kontrol 1) sebesar 12.72 kg/m².



Gambar 10 : bmep terhadap putaran mesin untuk semua perlakuan

Secara teoritis, bmep dihitung dari daya yang dihasilkan untuk putaran tertentu di-bagi dengan besar volume langkah mesin pada putaran itu juga. Sehingga semakin besar daya pada kondisi pengujian akan mengakibatkan semakin besar juga bmep pada kondisi percobaan yang sama pula, demikian juga dengan sebaliknya.

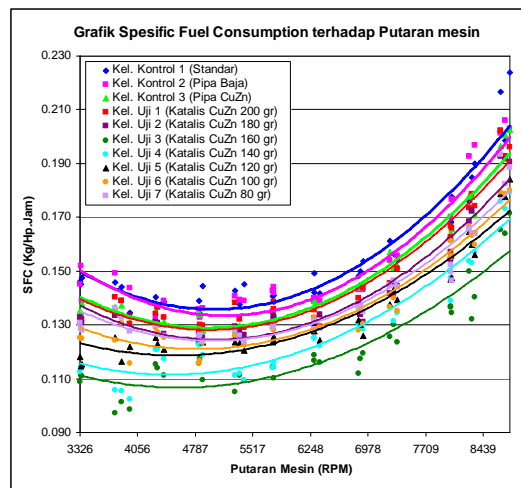
Tabel 5. Prosentase perubahan tekanan efektif rata-rata (bmep)

Perlakuan	bmep (kg/m ²)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	12.72		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	12.97	0.25	1.98
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	13.58	0.86	6.79
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	13.86	1.14	8.98
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	13.96	1.24	9.76
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	14.42	1.70	13.39
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	14.31	1.59	12.53
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	14.27	1.55	12.20

Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	14.21	1.49	11.73
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	14.06	1.34	10.54

Specific Fuel Consumption (Sfc)

Specific fuel consumption (Sfc) didefinisikan sebagai jumlah bahan bakar yang dikonsumsi mesin untuk menghasilkan daya efektif sebesar 1 Hp selama 1 jam. Sfc yang lebih rendah mengindikasikan bahwa mesin lebih irit. Pada pengujian ini secara umum terlihat bahwa pemasangan catalytic converter kuningan (knalpot uji straight thru) dapat menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik jika dibandingkan dengan knalpot standar. Penurunan konsumsi bahan bakar spesifik yang terjadi pada pengujian ini ditunjukkan pada grafik dan tabel berikut.



Gambar 11 : Sfc terhadap rpm mesin untuk semua perlakuan

Dari grafik dan tabel terlihat bahwa secara rata-rata terjadi penurunan konsumsi bahan bakar spesifik (Sfc) pada berbagai perlakuan pengujian bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1). Penurunan Sfc rata-rata terbesar pada pengujian ini adalah sebesar 21,72% dengan menggunakan knalpot straight thru yang diisi katalis kuningan dengan massa 160 gr (kelompok uji 3), dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). Sfc yang terjadi pada kelompok uji 3 secara rata-rata adalah sebesar 0,122 kg/Hp.jam untuk putaran mesin 3400-9000 rpm. Besarnya penurunan prosentase Sfc yang lebih rendah dari kelompok uji 3 selanjutnya diikuti oleh kelompok uji 4 (katalis 140 gr) sebesar 17,12%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) sebesar 13,45%, kelompok uji 6 (katalis 100 gr) 11,82%, kelompok uji 7 (katalis 80 gr) 9,81%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 8,76%, dan kelompok uji 1 (katalis 200 gr) 5,88%, serta kemudian diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot straight thru pipa kuningan tanpa katalis sebesar 5,06% dan kelompok kontrol 2 (knalpot straight thru pipa baja tanpa katalis) sebesar 1,80% dari kondisi standar (kelompok kontrol 1) sebesar 0,156 kg/Hp.jam.

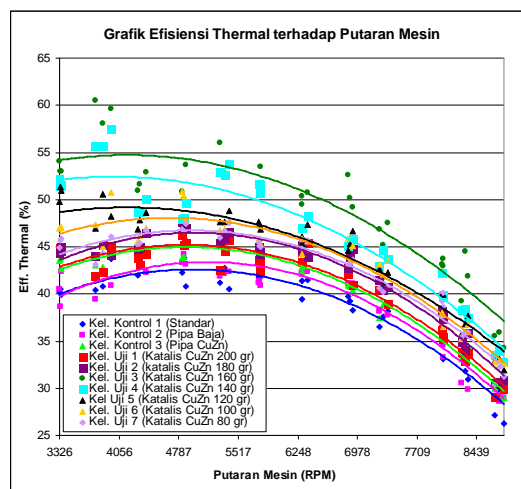
Tabel 6. Prosentase perubahan spesifik fuel consumption

Perlakuan	Sfc (kg/Hp.Jam)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	0.156		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	0.153	-0.003	-1.80
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	0.148	-0.008	-5.06
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	0.146	-0.009	-5.88
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	0.142	-0.014	-8.76

Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	0.122	-0.034	-21.72
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	0.129	-0.027	-17.12
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	0.135	-0.021	-13.45
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	0.137	-0.018	-11.82
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	0.140	-0.015	-9.81

Effisiensi Thermal (η_{th})

Effisiensi thermal dari suatu mesin adalah ratio output (daya efektif) terhadap energi kimia input dalam bentuk suplai bahan bakar. Jadi effisiensi thermal disini merupakan ukuran besarnya pemanfaatan energi yang tersimpan dalam bahan bakar untuk dirubah menjadi daya efektif oleh mesin. Tetapi dalam kenyataannya energi kimia bahan bakar tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi berguna, banyak sekali kerugian-kerugian yang terjadi pada siklus pembakaran sebenarnya, khususnya kerugian yang terjadi pada friction losses dan heat losses.



Gambar 12: Effisiensi thermal terhadap rpm mesin untuk semua perlakuan

Dari grafik dan tabel terlihat bahwa secara rata-rata terjadi kenaikan effisiensi thermal pada berbagai perlakuan pengujian bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1). Kenaikan effisiensi thermal rata-rata terbesar pada pengujian ini adalah sebesar 27,92% dengan menggunakan knalpot straight thru yang diisikan katalis kuning dengan masa 160 gr (kelompok uji 3), dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). Effisiensi thermal yang terjadi pada kelompok uji 3 secara rata-rata adalah sebesar 49,20% untuk putaran mesin sekitar 3500-9000 rpm. Besarnya kenaikan effisiensi thermal selanjutnya diikuti oleh kelompok uji 4 (katalis 140 gr) sebesar 21,12%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) sebesar 15,41%, kelompok uji 6 (katalis 100 gr) 13,24%, kelompok uji 7 (katalis 80 gr) 10,57%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 9,44%, dan kelompok uji 1 (katalis 200 gr) 6,23%, serta kemudian diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot *straight thru* pipa kuning tanpa katalis sebesar 5,35% dan kelompok kontrol 2 (knalpot *straight thru* pipa baja tanpa katalis) sebesar 1,81% dari kondisi standar (kelompok kontrol 1) sebesar 38,46%.

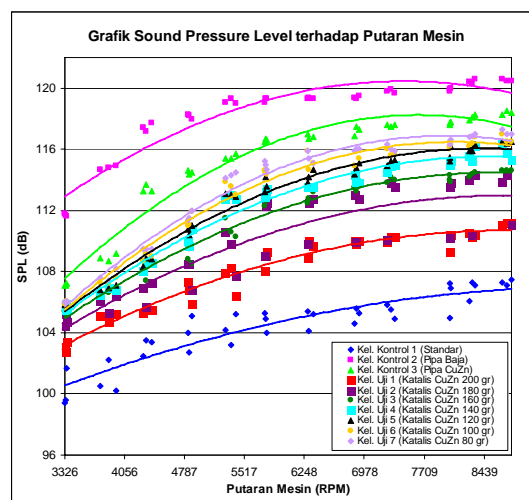
Tabel 7. Prosentase perubahan effisiensi thermis (η_{th})

Perlakuan	η_{th} (%)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	38.46		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	39.15	0.696	1.81
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	40.52	2.059	5.35
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	40.85	2.394	6.23

Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	42.09	3.632	9.44
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	49.20	10.737	27.92
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	46.58	8.121	21.12
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	44.39	5.928	15.41
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	43.55	5.091	13.24
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	42.52	4.065	10.57

Sound Pressure Level (SPL)

Dari hasil percobaan, modifikasi knalpot dari sistem reverse flow muffler menjadi sistem straight thru muffler ternyata memberikan pengaruh meningkatnya sound pressure level (SPL) dengan cukup signifikan. Hal ini berarti knalpot straight thru justru akan meningkatkan kebisingannya dari kondisi standar (sistem reverse flow muffler). Tetapi dari



Gambar 13 : Sound pressure level terhadap rpm mesin untuk semua perlakuan

perbandingan kelompok uji, pengaruh penambahan massa logam katalis kuningan memberikan efek peredaman dan menjadikan semakin rendahnya SPL, meskipun masih lebih bising dari pada kondisi standarnya. Perbandingan antar perlakuan kelompok-kelompok kontrol dan uji ditampilkan pada grafik dan tabel prosentase SPL berikut.

Tabel 8. Prosentase perubahan sound pressure level

Perlakuan	SPL (dBa)	Delta	Prosentase (%)
Kel. Kontrol 1 (Standar)	104		
Kel. Kontrol 2 (Pipa Baja)	118	14	13.30
Kel. Kontrol 3 (Pipa CuZn)	115	11	10.28
Kel. Uji 1 (CuZn 200 gr)	108	4	3.56
Kel. Uji 2 (CuZn 180 gr)	110	6	5.36
Kel. Uji 3 (CuZn 160 gr)	111	7	6.58
Kel. Uji 4 (CuZn 140 gr)	112	8	7.39
Kel. Uji 5 (CuZn 120 gr)	113	8	7.81
Kel. Uji 6 (CuZn 100 gr)	113	9	8.31
Kel. Uji 7 (CuZn 80 gr)	114	10	8.70

Dari grafik dan tabel diatas terlihat bahwa secara rata-rata terjadi kenaikan SPL pada berbagai perlakuan pengujian bila dibandingkan dengan kelompok standar (kelompok kontrol 1), yang berarti kebisingannya bertambah. Kenaikan SPL rata-rata terbesar pada pengujian ini adalah sebesar 13,30% pada kelompok kontrol 2 yaitu knalpot straight thru pipa baja, dari kondisi standar (kelompok kontrol 1). SPL yang terjadi pada kelompok kontrol 2 secara rata-rata adalah sebesar 118 dBA untuk putaran mesin sekitar 3500-9000 rpm. Kenaikan prosentase SPL dari kondisi standar yang lebih rendah dari kelompok kontrol 2 selanjutnya diikuti oleh kelompok kontrol 3 yaitu knalpot straight thru pipa kuning sebesar 10,28%, kemudian lebih rendah lagi terjadi pada kelompok uji 7 yaitu knalpot straight thru dengan pengisian katalis 80 gr sebesar 8,70%, diikuti oleh kelompok uji 6 (katalis 100 gr) sebesar 8,31%, kelompok uji 5 (katalis 120 gr) 7,81%, kelompok uji 4 (katalis 140 gr) 7,39%, kelompok uji 3 (katalis 160 gr) 6,58%, kelompok uji 2 (katalis 180 gr) 5,36%, dan yang terendah dari kelompok-kelompok uji tersebut adalah kelompok uji 1 (katalis 200 gr) sebesar 3,56% dari kondisi standar dengan SPL rata-rata lebih rendah yaitu 104 dBA.

Kesimpulan

1. Penggunaan katalis kuning (Cu-Zn) pada motor bensin empat langkah dapat menurunkan konsentrasi polutan gas buang karbomonoksida (CO) dan hidrokarbon (uHC), meningkatkan torsi, daya efektif, tekanan efektif rata-rata, efisiensi thermal mesin, serta menurunkan specific fuel consumption, tetapi terjadi kenaikan pada sound pressure level.
2. Penurunan konsentrasi polutan gas karbomonoksida (CO) optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi penurunan sebesar 79,92% dari kondisi standar mesin.
3. Penurunan konsentrasi polutan gas hidrokarbon (uHC) optimum pada penggunaan katalis dengan pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi penurunan sebesar 62,16% dari kondisi standar mesin.
4. Kenaikan torsi optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi peningkatan sebesar 13,39% dari kondisi standar mesin.
5. Kenaikan daya efektif optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi peningkatan sebesar 16,87% dari kondisi standar mesin.
6. Kenaikan tekanan efektif rata-rata optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi peningkatan sebesar 13,39% dari kondisi standar mesin.
7. Penurunan specific fuel consumption optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi penurunan sebesar 21,72% dari kondisi standar mesin.
8. Kenaikan efisiensi thermal optimum pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 160 gr, yaitu terjadi peningkatan sebesar 27,92% dari kondisi standar mesin.
9. Kenaikan sound pressure level terjadi pada semua perlakuan penggunaan catalytic converter, kenaikan minimum terjadi pada pengisian katalis kuning (Cu-Zn) 200 gr, yaitu terjadi peningkatan sebesar 3,56% dari kondisi standar mesin.

Daftar Referensi

- Astika, I K. (2000) *Studi Eksperimen tentang Pengaruh Penggunaan Tembaga sebagai Catalytic Muffler terhadap Emisi CO, HC dan NO_x dari Motor Bensin 4-Langkah*. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- Bahl, B. S. dkk. (1997) *Essentials of Physical Chemistry*. S. Scand & Company Ltd., New Delhi.
- Baxa, D. E. (1982) *Noise Control in Internal Combustion Engines*. John Wiley & Sons Inc., Canada.
- Dowden, D. A. dkk. (1970) *Catalytic Handbook*. Springer-Verlag Wien, New York.
- Fogler, S. H. (1992) *Element of Chemical Reaction Engineering*. Prentice-Hall International Inc., Michigan.
- Heisler, H. & Arnold, E. (1995) *Advanced Engine Technology*. Hodder Headline PLC, London.

- Heywood, J. B. (1988) *Internal Combustion Engine Fundamental*. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Hill, C. G. (1997) *An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design*. John Wiley & Son Inc., Canada.
- Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. (2002) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Jenbacher Energie Systeme, (1996) *Spark Ignition Engine Design*. Vol. 3. Jenbacher Energie, Osterreich.
- Jingga, I. N. (2000) *Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Magnesium sebagai Pereduksi Pplutan di Muffler Motor Bensin 4 Langkah*. Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, Surabaya.
- Kristanto, P. (2005) *Emisi Sarana Angkutan Perkotaan, Kualitas Udara dan Kesehatan Masyarakat - Seminar Automotive Trend and Globalization Technology in Era 21st Century*. Jurusan Teknik Mesin UK Petra, Surabaya.
- Martyn, V. T. (1996) *Catalyst Handbook*. Manson Publishing Ltd., London.
- Mathur, M. L. & Sharma, R. P. (1980) *A Course In Internal Combustion Engine*. Dhanpat Rai & Son, Nai Sarak Delhi.
- Milton, B. E. (1995) *Thermodynamics, Combustion and Engines*. Chapman & Hall, London.
- Muhaji. (2001) *Pengaruh Zeolit Alam dan Mn sebagai Katalis Silincer Sepeda Motor 4 Langkah Terhadap Kadar Emisi Gas Buang, Unjuk Kerja dan Sound Pressure Level*. Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, Surabaya.
- Nevers, N. D. (1995) *Air Pollution Control Engineering*. McGraw-Hill Inc., USA.
- Nugroho, J. (2004) *Uji Kemampuan Catalytic Converter Zeolit untuk Mereduksi Polutan Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Berbahan Bakar Bensin*. Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS, Surabaya.
- Obert, E. F. (1973) *Internal Combustion Engines and Air Pollution*. Harper & Row Publishers Inc., New York.
- Pulkrabek, W. W. (2004) *Engineering Fundamental of The Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice-Hall, New Jersey.
- Saefudin, A. (2005) *Penerapan Program Pemeriksaan Emisi dan Pemeliharaan Kendaraan (I/M) - Seminar Automotive Trend and Globalization Technology in Era 21st Century*. Jurusan Teknik Mesin UK Petra, Surabaya.
- Santini, S. (2000) *On Board Diagnosis for Three-Way Catalytic Converter*. Universita di Napoli Federico II – Universita del Sannio, Italia.
- Schafer, F. & Basshuysen, R. V. (1995) *Reduced Emission and Fuel Consumption in Automobile Engines*. Springer-Verlag Wien, New York.
- Schnelle, K. B. & Brown, C. A. (2002) *Air Pollution Control Technology Handbook*. CRC Press, Boca Raton.
- Setiawan, E. D. (2001) *Studi Eksperimental terhadap Pengurangan Polutan Gas Buang Motor Bensin 4 Langkah dengan Penggunaan Zeolit*. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- Somorjai, G. A. (1994) *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis*. John Wiley & Son, Canada.
- Swisscontact. (2000) *Analisa Kinerja Mesin Bensin Berdasarkan Hasil Uji Emisi*. Swisscontact Clean Air Project, Jakarta.
- Technical Servis Division PT. Astra Honda Motor. (2006) *Panduan Penjualan Karisma*, PT. Astra Honda Motor, Jakarta.