# STUDI KINETIKA *METALLIC CATALYTIC CONVERTER* BERBAHAN LOGAM PADUAN CuZn UNTUK MENGURANGI EMISI GAS KARBONMONOKSIDA DAN HIDROKARBON

**Skripsi**

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar**

**Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia**

Oleh

Ratnaningrum NIM.5213412038

**JURUSAN TEKNIK KIMIA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

**2016**

**PERSETUJUAN PEMBIMBING**

| | |
|---|---|
| Nama | : Khairatun Nisa |
| NIM | : 5213412001 |
| Jurusan | : Teknik Kimia |
| Judul Skripsi | : Studi Kinetika *Metallic Catalytic Converter* Berbahan Logam Paduan CuZn untuk Mengurangi Emisi Gas CO dan Hidrokarbon |

| | |
|---|---|
| Nama | : Ratnaningrum |
| NIM | : 5213412038 |
| Jurusan | : Teknik Kimia |
| Judul Skripsi | : Studi Kinetika *Metallic Catalytic Converter* Berbahan Logam Paduan CuZn untuk Mengurangi Emisi Gas CO dan Hidrokarbon |

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Jurusan Teknik Kimia S-1 Fakultas Teknik UNNES.

Semarang, Agustus 2016
Pembimbing,

Dr. Megawati, S.T.,M.T
NIP. 197211062006042001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Studi Kinetika *Metallic Catalytic Converter* Berbahan Logam Paduan CuZn untuk Mengurangi Emisi Gas Karbon Monoksida dan Hidrokarbon" telah dipertahan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 10 bulan Agustus tahun 2016

Oleh

| | | | |
|---|---|---|---|
| Nama | : Khairatun Nisa | Nama | : Ratnaningrum |
| NIM | : 5213412001 | NIM | : 5213412038 |
| Jurusan | : Teknik Kimia | Jurusan | : Teknik Kimia |

Panitia:

Ketua

Dr. Wara Dyah Pita Rengga, S.T.,M.,T
NIP. 197405191999032001

Sekretaris

Dr. Megawati, S.T.,M.T
NIP. 197211062006042001

Penguji I

Catur Rini W, S.T., M.Sc
NIP. 198601172012122003

Penguji II

Dr. Ratna Dewi K, S.T.,M.T
NIP. 197603112000122001

Pembimbing

Dr. Megawati, S.T.,M.T
NIP. 197211062006042001

Mengetahui:
Dekan Fakultas Teknik UNNES

Dr. Nur Qudus, M.T
NIP. 196911301994031001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, Agustus 2016
Yang membuat pernyataan,

Ratnaningrum
NIM. 5213412038

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

### MOTTO

*"Barangsiapa menempuh suatu jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan memudahkan padanya jalan menuju ke surga" (H.R.Muslim)*

*"Karena sesudah kesulitas itu ada kemudahan, maka apabila kamu telah selesai dari suatu urusan, kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain" (Qs. Al-Insyirah 6-7)*

### PERSEMBAHAN

1. ALLAH SWT
2. Ayah dan Ibu
3. Dosen-dosen
4. Kakak dan Adik
5. Teman seperjuangan
6. Sahabat
7. Almamater

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## ABSTRAK

Emisi dari kendaraan bermotor merupakan salah satu masalah utama yang menyebabkan polusi udara. Teknologi yang efektif untuk mengurangi emisi CO dan HC adalah aplikasi *catalytic converter* pada sistem pembuangan kendaraan bermotor. Reaksi oksidasi katalitik CO dan HC merupakan salah satu metode untuk mengurangi emisi kendaraan bermotor. Dalam penelitian ini, logam Copper-Zinc (CuZn) dipilih sebagai katalis berbahan logam non mulia karena biaya produksi rendah, ketersediaan bahan melimpah, dan suhu oksidasi rendah. Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari aplikasi dan kinetika katalis CuZn untuk mengoksidasi emisi CO dan HC pada variasi putaran mesin 1500, 2000, dan 2500 rpm. Kinetika oksidasi CO dan HC didekati menggunakan model *pseudo-homogeneous reaction* dengan konstanta kinetika dinyatakan dalam persamaan Arrhenius. Hasil menunjukkan bahwa katalis CuZn efektif mengurangi emisi CO hingga 47,71% pada 2000 rpm dan efektif mengurangi emisi HC hingga 55,34% pada 2500 rpm. Berdasarkan model *pseudo*-homogen, reaksi oksidasi CO mengikuti orde 1 dengan nilai energi aktivasi CO sebesar 132,54 kJ/mol, sedangkan reaksi oksidasi HC mengikuti orde 2 dengan nilai energi aktivasi sebesar 37,55 kJ/mol.



**Kata kunci***: catalytic converter, emisi kendaraan, kinetika, logam non-mulia, pseudo-homogeneous model*.



## ABSTRACT

Exhaust emissions from vehicles is one of the main sources of air pollution. The most effective technology to reduce emissions of Carbon Monoxide (CO) and Hydrocarbon (HC) is the application of the catalytic converter in the exhaust system of the motorcycle muffler. Catalytic oxidation of carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) is one of methods to reduce the emission at exhaust system of vehicle. In this study, Copper-Zinc (CuZn) metal has been selected as catalyst based on non-noble material (low cost production, abundant materials, and low-temperature oxidation). The purpose of this paper is to study the application of CuZn as a catalytic to convert CO and HC emissions into harmless gases with various machine rotational speeds (1500, 2000 and 2500 rpm). Furthermore, the oxidation kinetics was approached using pseudo homogeneous model. The results showed that CuZn catalyst was effective to decrease up to 47.71% at 2000 rpm and 55.34% at 2500 rpm for CO and HC emissions, respectively. The kinetic constants can be expressed by Arrhenius equation with the first and second order reaction for CO and HC, respectively. The activation energy of oxidation CO and HC are 132,54 kJ/mol and 37,55 kJ/mol, respectively.

**Keywords:** *catalytic converter, exhaust emissions, kinetics, non-noble material, pseudo-homogeneous model*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Studi Kinetika *Metallic Catalytic Converter* Berbahan Logam Paduan CuZn untuk Mengurangi Emisi Gas Karbon Monoksida dan Hidrokarbon. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Kimia Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada junjungan alam Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kita semua mendapatkan safaat-Nya di yaumil akhirat nanti. Aamiin

Penelitian ini diangkat sebagai upaya untuk mengembangkan parameter kinetika reaksi oksidasi CO dan HC menggunakan katalis logam CuZn.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. ALLAH SWT
2. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Nur Qudus, M.T, Dekan Fakultas Teknik, dan Dr. Wara Dyah Pita Rengga, S.T.,M.T, Ketua Jurusan Teknik Kimia yang telah memberi bimbingan dengan menerima kehadiran penulis setiap saat disertai kesabaran, ketelitian, masukan-masukan yang berharga untuk menyelesaikan karya ini.
4. Dr. Megawati, S.T.,M.T, Dosen Pembimbing yang penuh perhatian dan atas perkenaan memberi bimbingan dan dapat dihubungi sewaktu-waktu disertai kemudahan dalam memberikan bahan dan menunjukkan sumber-sumber yang relevan serta membantu penulisan karya ini.
5. Dr. Ratna Dewi Kusumaningtyas, S.T.,M.T dan Catur Rini Widyastuti, S.T.,M.Sc sebagai Dosen Penguji yang telah memberi masukan yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan, menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
6. Seluruh Dosen Teknik Kimia FT Unnes yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga.

## DAFTAR ISI


LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING ..... ii
LEMBAR PENGESAHAN ..... iii
LEMBAR KEASLIAN KARYA ILMIAH ..... iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN ..... v
ABSTRAK ..... vi
KATA PENGANTAR ..... vii
DAFTAR ISI ..... viii
DAFTAR TABEL ..... ix
DAFTAR GAMBAR ..... x
BAB 1 PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang ..... 1
1.2 Identifikasi Masalah ..... 4
1.3 Pembatasan Masalah ..... 4
1.4 Rumusan Masalah ..... 5
1.5 Tujuan ..... 5
1.6 Manfaat ..... 5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI
2.1 Kajian Pustaka ..... 6
2.2 Landasan Teori ..... 14
2.3 Hipotesis ..... 16
BAB 3 METODE PENELITIAN
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan ..... 17
3.2 Desain Penelitian ..... 17
3.3 Cara Kerja ..... 18
3.4 Alat dan Bahan Penelitian ..... 19
3.5 Parameter Penelitian ..... 21
3.6 Pemodelan ..... 21
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Pengaruh Katalis CuZn terhadap Emisi CO ..... 25
4.2 Pengaruh Katalis CuZn terhadap Emisi HC ..... 26
4.3 Pengaruh Putaran Mesin terhadap Konsentrasi CO ..... 29
4.4 Pengaruh Putaran Mesin terhadap Konsentrasi HC ..... 30
4.5 Kinetika Oksidasi CO ..... 31
4.6 Kinetika Oksidasi HC ..... 36
4.7 Faktor yang Mempengaruhi Laju Reaksi ..... 41
BAB 5 PENUTUP
5.1 Simpulan ..... 43

5.2 Saran ..... 43
DAFTAR PUSTAKA ..... 44
LAMPIRAN ..... 48

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sumber Polusi Udara ..... 6
Tabel 2.2 Pengaruh A/F pada Daya, Bahan Bakar, dan Emisi ..... 14
Tabel 3.1 Properti Reaktor ..... 21
Tabel 4.1 Hasil emisi gas buang CO dengan dan tanpa katalis ..... 25
Tabel 4.2 Hasil emisi gas buang HC dengan dan tanpa katalis ..... 27

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## DAFTAR GAMBAR


Gambar 2.1 *Catalytic converter* oksidasi ..... 10
Gambar 2.2 *Two-way catalytic converter* ..... 11
Gambar 2.3 *Three-way catalytic converter* ..... 11
Gambar 2.4 Hubungan AFR dengan emisi gas buang ..... 13
Gambar 2.5 Konfigurasi reaktor untuk simulasi FBR ..... 15
Gambar 3.1 Skema uji gas buang sepeda motor ..... 17
Gambar 3.2 Cara Kerja Penelitian ..... 18
Gambar 3.3 Penampang katalis..... 20
Gambar 3.4 Skema reaktor..... 20
Gambar 3.5 *Flow Chart* Algoritma untuk Evaluasi Parameter Kinetika ..... 24
Gambar 4.1 Pengaruh penggunaan katalis terhadap konsentrasi CO ..... 25
Gambar 4.2 Pengaruh penggunaan katalis terhadap konsentrasi HC ..... 27
Gambar 4.3 Pengaruh putaran mesin terhadap konsentrasi CO..... 29
Gambar 4.4 Hubungan Lambda terhadap Putaran Mesin ..... 30
Gambar 4.5 Pengaruh putaran mesin terhadap konsentrasi HC..... 30
Gambar 4.6 Reaksi orde satu oksidasi CO pada 1500 rpm..... 32
Gambar 4.7 Reaksi orde satu oksidasi CO pada 2000 rpm..... 32
Gambar 4.8 Reaksi orde satu oksidasi CO pada 2500 rpm..... 32
Gambar 4.9 Reaksi orde dua oksidasi CO pada 1500 rpm ..... 33
Gambar 4.10 Reaksi orde dua oksidasi CO pada 2000 rpm ..... 33
Gambar 4.11 Reaksi orde dua oksidasi CO pada 2500 rpm ..... 34
Gambar 4.12 Hubungan ln k dan 1/T reaksi orde satu oksidasi CO ..... 36
Gambar 4.13 Reaksi orde satu oksidasi HC pada 1500 rpm..... 37
Gambar 4.14 Reaksi orde satu oksidasi HC pada 2000 rpm..... 38
Gambar 4.15 Reaksi orde satu oksidasi HC pada 2500 rpm..... 38
Gambar 4.16 Reaksi orde dua oksidasi HC pada 1500 rpm ..... 39
Gambar 4.17 Reaksi orde dua oksidasi HC pada 2000 rpm ..... 39
Gambar 4.18 Reaksi orde dua oksidasi HC pada 2500 rpm ..... 39
Gambar 4.19 Hubungan ln k dan 1/T reaksi orde dua oksidasi HC..... 41
Gambar 4.20 Hubungan suhu (T) dan konstanta laju reaksi (k) ..... 42

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

# BAB 1
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, jumlah penduduk dunia semakin meningkat. Beragam aktifitas manusia seperti kegiatan industri, transportasi, rumah tangga dan kegiatan-kegiatan lainnya menyebabkan kualitas udara yang tersedia di lingkungan tercemar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusi pencemaran udara yang berasal dari sektor transportasi mencapai 60%, selebihnya sektor industri 25%, rumah tangga 10% dan sampah 5% (Saepudin dan Admono, 2005). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh *Japan International Cooperation Agency* (JICA) bahwa sektor transportasi diperkirakan menyumbangkan 70% pencemaran udara di daerah perkotaan (JICA, 1995). Selain itu, pencemaran udara diperkotaan disebabkan oleh aktifitas kendaraan bermotor yang mengeluarkan emisi gas buang antara lain CO, HC, $NO_x$, $SO_x$ dan partikulat. Hal ini disebabkan oleh jumlah kendaraan bermotor yang terus meningkat dari tahun ke tahun (Bachrun, 1993).

Pada dasarnya jenis bahan pencemar yang dikeluarkan semua jenis kendaraan adalah sama, hanya komposisinya saja yang berbeda karena adanya perbedaan kondisi dan sistem operasi antara mesin kendaraan yang satu dengan yang lainnya. Mesin kendaraan terbaru umumnya memiliki emisi gas buang dengan kadar yang lebih rendah dibandingkan dengan mesin kendaraan keluaran lama. Hal ini dikarenakan adanya kesadaran masyarakat akan pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan yang semakin tinggi sehingga mendorong industri untuk memproduksi kendaraan bermotor yang lebih ramah lingkungan (Winarno, 2014). Sedangkan di Indonesia, masih banyak populasi mesin kendaraan keluaran lama yang diperbolehkan beroperasi padahal kadar emisi yang ditimbulkan tinggi. Sehingga alternatif untuk menurunkan kadar emisi yang ditimbulkan oleh mesin kendaraan keluaran lama akan dipelajari lebih lanjut.

Data Kementerian Lingkungan Hidup menyebutkan bahwa pencemaran udara dari kendaraan bermotor terutama berbahan bakar bensin (*spark ignition engine*) menyumbang 70% Karbon monoksida (CO) dan 60% hidrokarbon (HC). Gas CO dan HC sebagai gas buang kendaraan bermotor dapat membahayakan kesehatan dan merusak lingkungan. Karbon monoksida merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan beracun ketika terhirup. Jika masuk ke paru-paru, CO mampu bereaksi dengan hemoglobin (Hb) dalam darah membentuk karboksihemoglobin (COHb) yang menghalangi darah menyerap oksigen (Kristanto, 2015). Sedangkan hidrokarbon diketahui bersifat karsinogen yang menyebabkan penyakit kanker, iritasi mata dan selaput mukosa tenggorokan. Hidrokarbon juga berperan dalam pembentukan hujan asam serta campuran hidrokarbon dengan bantuan sinar ultraviolet dari matahari bereaksi dengan gas lain di atmosfer mendorong pembentukan asbut fotokimia (Kristanto, 2015). Kondisi tersebut tentu sangat mengkhawatirkan karena emisi gas buang yang dihasilkan akan terus mengalami peningkatan seiring dengan laju pertumbuhan kendaraan bermotor. Oleh karena itu, pencemaran udara yang ditimbulkan oleh emisi gas buang ini harus segera dikendalikan mengingat di dalam gas buang kendaraan bermotor banyak mengandung senyawa kimia yang berbahaya bagi manusia. Selain itu, adanya Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2006 mengenai ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor sehingga perlu adanya upaya pengendalian emisi agar emisi yang dihasilkan dari kendaraan bermotor berada dibawah ambang batas yang ditentukan oleh pemerintah.

Menurut (Kristanto, 2015), terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk mengurangi emisi motor yang berbahaya yaitu dengan meningkatkan teknologi bahan bakar dan motor sedemikian sehingga terjadi pembakaran lebih baik dan menghasilkan emisi yang lebih rendah dan dengan memberikan perlakuan lanjut (*aftertreatment)* terhadap gas buang melalui perangkat pengendali emisi. Salah satu teknologi *aftertreatment* yang sering diaplikasikan pada kendaraan bermotor adalah konverter katalitik (*catalytic converter)*. Konverter katalitik yang umum digunakan adalah logam mulia seperti paladium,

platinum dan rodium dengan kerangka *support* berupa *honeycomb monolith* yang memiliki *specific surface area* besar (Degobert, 1995). Kekurangan katalis logam mulia tersebut adalah harganya mahal dan kelimpahannya rendah di alam (Warju, 2006).

Salah satu alternatif untuk memecahkan masalah tersebut yaitu mengganti bahan logam mulia menjadi logam transisi yang dapat digunakan sebagai konverter katalitik. Logam transisi dipilih karena harganya relatif murah. kelimpahannya lebih banyak di alam dibanding logam paladium, platinum dan rodium serta mudah diperoleh di pasaran. Selain itu, logam yang diketahui efektif sebagai bahan katalis oksida dan reduksi mulai dari yang besar sampai yang kecil adalah Pt, Pd, Ru > Mn, Cu > > Ni > Fe > Cr > Zn dan oksida dari logam-logam tersebut (Dowden, 1970). Beberapa logam transisi serta paduannya telah diteliti pengaruhnya dalam mengurangi emisi gas CO dan HC sebagai konverter katalitik, diantaranya adalah Tembaga (Cu) (Astika, 2000), Kuningan (paduan Cu dan Zn) (Warju, 2013), Kuningan berlapis Krom (Warju, 2003) dan Tembaga berlapis Mangan (Irawan, 2013). Di antara berbagai bahan konverter katalitik alternatif tersebut, logam paduan CuZn dipertimbangkan sebagai katalis yang prospektif mengurangi emisi gas CO dan HC karena dapat mengurangi kadar emisi secara signifikan, mudah didapatkan di pasaran dalam bentuk paduan sehingga tidak membutuhkan *treatment* tambahan untuk menggabungkan manjadi paduan, harganya relatif murah serta tersedia dengan berbagai bentuk.

Beberapa penelitian terdahulu yang mempelajari kinetika serta yang lebih spesifik membahas nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO adalah menggunakan konverter katalitik berbahan Nikel (Delgado, 2014), Tembaga (Zhu, 2002) dan Platinum (Kohse, 2013). Berdasarkan penelusuran pustaka yang telah dilakukan, penelitian yang mempelajari kinetika serta nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC menggunakan konverter katalitik berbahan logam paduan CuZn belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh penggunaan konverter katalitik berbahan logam paduan CuZn terhadap kadar emisi CO dan HC serta menentukan kinetika dan nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC pada sistem pembuangan kendaraan bermotor keluaran lama.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut :

1. Sektor transportasi berbahan bakar bensin paling banyak menyumbang emisi gas CO dan HC ke udara.
2. Diperlukan inovasi desain *catalytic converter* yang lebih efektif menurunkan konsentrasi emisi gas CO dan HC.
3. Kendaraan keluaran lama menghasilkan emisi gas buang lebih tinggi dibanding kendaraan keluaran baru.
4. Kendaraan keluaran lama belum dilengkapi *catalytic converter* pada sistem pembuangannya (*exhaust system*).
5. Kinetika dan nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC dengan konverter katalitik berbahan CuZn pada sistem pembuangan kendaraan keluaran lama belum pernah dipelajari.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Masalah yang diuraikan dalam penelitian ini dibatasi pada :

1. Kendaraan yang digunakan adalah sepeda motor empat langkah Supra Fit tahun 2004 110 cc.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah premium.
3. Konverter katalitik yang digunakan adalah logam paduan CuZn.
4. Emisi yang diteliti adalah gas karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC).
5. Kinetika yang dipelajari adalah orde. kecepatan dan energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## 1.4 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh desain *catalytic converter* berbahan logam paduan CuZn terhadap emisi gas CO dan HC pada sistem pembuangan kendaraan keluaran lama?
2. Bagaimana pengaruh penambahan katalis logam paduan CuZn terhadap orde, kecepatan dan nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC pada sistem pembuangan kendaraan keluaran lama?

## 1.5 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh penambahan katalis logam paduan CuZn terhadap kadar emisi gas buang kendaraan bermotor keluaran lama.
2. Mengetahui pengaruh penambahan katalis logam paduan CuZn terhadap orde, kecepatan dan nilai energi aktivasi reaksi oksidasi CO dan HC menggunakan model *pseudo-homogeneous reaction*.

## 1.6 Manfaat

1. Memberikan alternatif untuk menurunkan emisi gas CO dan HC pada kendaraan bermotor keluaran lama.
2. Mengetahui pengaruh penambahan katalis logam paduan CuZn terhadap nilai parameter kinetika reaksi oksidasi gas CO dan HC pada kendaraan bermotor keluaran lama.
3. Sebagai alternatif menurunkan emisi kendaraan bagi pemilik sepeda motor keluaran lama sehingga kadar gas buang CO dan HC yang dihasilkan berada dibawah nilai ambang batas yang ditetapkan oleh pemerintah
4. Memberikan kontribusi ilmu pengetahuan terutama yang berkaitan dengan teknologi *catalytic converter* untuk mengurangi emisi gas karbon monoksida dan hidrokarbon.

# BAB 2
# KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

## 2.1 Kajian Pustaka

### 2.1.1 Emisi Gas Buang Kendaraan

Emisi gas buang kendaraan adalah sisa hasil pembakaran yang dihasilkan oleh pembakaran di dalam mesin kendaraan bermotor. Gas sisa pembakaran mesin bersifat racun dan akan merusak lapisan ozon serta menjadi penyebab utama adanya pemanasan global (*global warming*). Beberapa gas yang ditimbulkan oleh sisa pembakaran mesin adalah :

1. Karbon monoksida (CO)
2. Karbon dioksida ($CO_2$)
3. Air ($H_2O$)
4. Timbal (Pb)
5. Nitrogen Oksida ($NO_x$)
6. Hidrokarbon (HC)

Emisi gas buang yang sangat dominan dihasilkan oleh kendaraan bermotor salah satunya adalah gas karbon monoksida (CO), seperti terlihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Sumber polusi udara

| SUMBER | Polusi (dalam juta ton/tahun) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CO | Part | $SO_x$ | HC | $NO_x$ | Total |
| Transportasi | 69,1 | 1,4 | 0,9 | 7,8 | 9,1 | 88,3 |
| Pembakaran bahan bakar | 2,1 | 1,4 | 19,0 | 0,2 | 10,6 | 33,3 |
| Proses industri | 5,8 | 3,7 | 3,8 | 10,8 | 0,7 | 24,8 |
| Pembuangan limbah padat | 2,2 | 0,4 | 0,0 | 0,6 | 0,1 | 3,3 |
| Lain-lain (kebakaran hutan, pertanian) | 6,2 | 0,9 | 0,0 | 2,4 | 0,2 | 9,7 |
| Total | 85,4 | 7,8 | 23,7 | 21,8 | 20,7 | 159,4 |

(Sumber: Howard, 1985)

Pengujian untuk menghitung jumlah emisi gas buang yang terabsorbsi dapat menggunakan alat gas analizer. Alat gas analizer dapat menunjukkan kadar zat-zat polutan yaitu CO, $CO_2$, $NO_x$, $O_2$, dan HC yang keluar dari sistem

pembuangan (*exhaust system*) kendaraan bermotor. Hasil pengukuran alat gas analizer dapat langsung diketahui melalui *print out* yang langsung keluar dari alat gas analizer. Hasil pengukuran meliputi kadar CO (%volume), HC (ppm volume), $CO_2$ (%volume), dan $O_2$ (%volume). Gas analizer dihubungkan dengan motor melalui pipa listrik yang dihubungkan ke baterai dan mesin motor, kemudian motor dihidupkan sementara gas analizer di set ke posisi nol. Sensor dimasukkan ke dalam knalpot kendaraan dan secara otomatis alat bekerja serta hasil langsung tertera pada monitor alat yang digunakan.

### 2.1.2 Gas Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) merupakan polutan yang tidak berwarna dan tidak berbau. Karbon monoksida merupakan racun. Apabila CO bercampur dengan oksigen dan terhirup oleh manusia, maka CO akan bereaksi dengan hemoglobin (Hb) yang menyebabkan kemampuan darah untuk mentransfer oksigen menjadi berkurang (Swisscontact, 2000).

Gas Karbon monoksida (CO) dihasilkan dari pembakaran yang tidak sempurna akibat campuran bahan bakar dan udara yang terlalu kaya (Swisscontact, 2000). Untuk mengurangi CO, perbandingan campuran harus dikurangi atau dibuat miskin (*excess air*). Namun akibatnya gas hidrokarbon (HC) lebih mudah timbul serta *output* mesin menjadi berkurang (Swisscontact, 2000). Bila karbon di dalam bahan bakar terbakar dengan sempurna, akan terjadi reaksi yang menghasilkan $CO_2$ sebagai berikut:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad \text{.....(2.1)}$$

Apabila unsur oksigen udara tidak cukup terjadi pembakaran tidak sempurna sehingga karbon di dalam bahan bakar terbakar dengan proses sebagai berikut:

$$C + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow CO \quad \text{.....(2.2)}$$

### 2.1.3 Gas Hidrokarbon (HC)

Bensin yang digunakan sebagai bahan bakar untuk proses oksidasi CO dan HC dimodelkan hanya mengandung iso-oktana. Iso-oktana dipilih sebagai komponen model dengan karena banyak digunakan sebagai komponen model

dalam kajian yang melibatkan motor bakar (*internal combustion engines*) (Marin, 2009). Reaksi oksidasi untuk HC jenis iso-oktana dinyatakan dalam Persamaan 2.3.

$$C_8H_{18} + 12{,}5\ O_2 \rightarrow 8\ CO_2 + 9\ H_2O \quad \text{.....} \quad (2.3)$$

Sumber emisi hidrokarbon (HC) dapat dibagi menjadi dua bagian, sebagai berikut:

1. Bahan bakar yang tidak terbakar dan keluar menjadi gas mentah.
2. Bahan bakar terpecah karena reaksi panas berubah menjadi gugusan hidrokabron (HC) lain yang keluar bersama gas buang

Sebab utama timbulnya hidrokarbon (HC) adalah:

1. Sekitar dinding-dinding ruang bakar bersuhu rendah, dimana suhu itu tidak mampu melakukan pembakaran.
2. *Missing* (*missfire*)
3. Adanya *overlaping* katup (kedua katup bersama-sama terbuka) sehingga merupakan gas pembilas atau pembersih.

Hidrokarbon memiliki karakteristik yaitu sebagai berikut:

a. Hidrokarbon jenuh (parafin). Hidrokarbon jenuh umumnya tidak berbau, mengandung efek narkotik dan menyebabkan iritasi ringan selapur lender.
b. Hidrokarbon tak jenuh (olefin, asetilen). Hidrokarbon tak jenuh umumnya agak berbau dan terkadang menyebabkan iritasi ringan pada selaput lender.
c. Hidrokarbon beraroma. Hidroakrbon jenis ini berbau, dapat meracuni urat saraf, pada konsumsi rendah menyebabkan iritasi pada mata dan hidung.

### 2.1.4 *Catalytic Converter*

*Catalytic converter* merupakan salah satu alternatif teknologi yang dapat digunakan untuk menurunkan polutan dari emisi kendaraan bermotor, khususnya motor berbahan bakar bensin (Heisler, 1995 dan Husselbee, 1985). *Catalytic converter* berfungsi untuk mempercepat oksidasi emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO). Tujuan pemasangan *catalytic converter* adalah merubah polutan-polutan yang berbahaya seperti CO, dan HC menjadi gas yang tidak

berbahaya seperti karbon dioksida ($CO_2$), dan uap air ($H_2O$) melalui reaksi kimia. Pengkonversian polutan-polutan berbahaya tersebut tergambar pada reaksi sebagai berikut:

1. $CO + ½ O_2 \rightarrow CO_2$ .....(2.4)
2. $HC + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ .....(2.5)

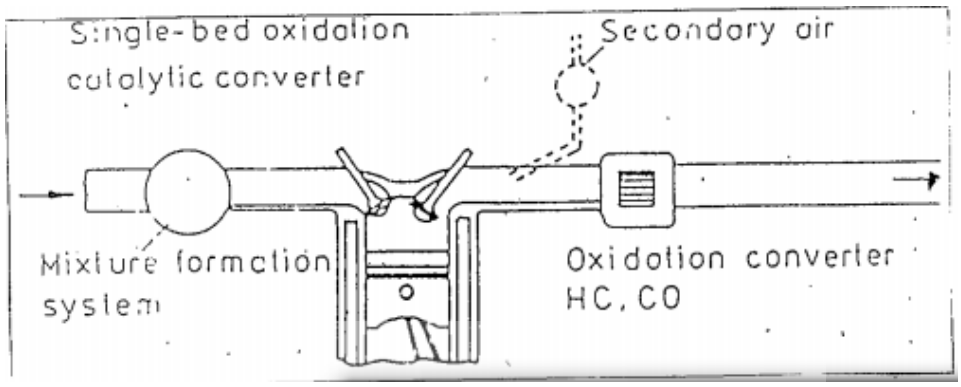
*Catalytic converter* terdiri atas bahan-bahan yang bersifat katalis yaitu bahan yang bisa mempercepat terjadinya reaksi kimia yang tidak mempengaruhi keadaan akhir kesetimbangan reaksi dan komposisi kimia katalis. Katalis dapat berfungsi sebagai zat pengikat. Contoh katalis yang berfungsi sebagai zat pengikat yaitu logam-logam seperti platinum (Pt), kromium (Cr), kuningan (CuZn), dan nikel (Ni). Permukaan logam-logam ini memiliki kemampuan mengikat zat yang akan bereaksi sehingga terbentuk spesi yang reaktif. Katalis logam paduan CuZn mempercepat reaksi-reaksi gas dengan cara membentuk ikatan lemah antara gas dan atom-atom logam pada permukaan (Amin, 2010). Proses ini disebut adsorpsi. Gas-gas yang terikat pada permukaan logam paduan CuZn lebih mudah bereaksi dibandingkan jika gas-gas tersebut berada di udara. Setelah terjadi reaksi, produk hasil reaksi melepas ikatannya dengan permukaan logam paduan CuZn. Proses ini disebut desorpsi. Jumlah katalis setelah reaksi berlangsung akan sama dengan jumlah katalis sebelum terjadinya reaksi.

### 2.1.5 Jenis – Jenis *Catalytic converter*

Secara garis besar, *catalytic converter* dapat digolongkan menjadi tiga golongan yaitu:

a. *Catalytic Converter* Oksidasi

Sistem ini sering disebut juga *Single Bed Oxidation*, mampu mengubah CO dan HC menjadi $CO_2$ dan $H_2O$. Namun *catalytic converter* oksidasi tidak memberikan pengaruh terhadap $NO_x$. *Catalytic converter* oksidasi beroperasi pada kendaraan udara berlebih (*excess air setting*). Udara berlebih yang digunakan untuk proses oksidasi dapat diperoleh melalui pengaturan campuran miskin ($\lambda > 1$) dengan sistem injeksi udara sekunder.




Gambar 2.1 *Catalytic Converter* Oksidasi

(Sumber: Scafer, 1995)

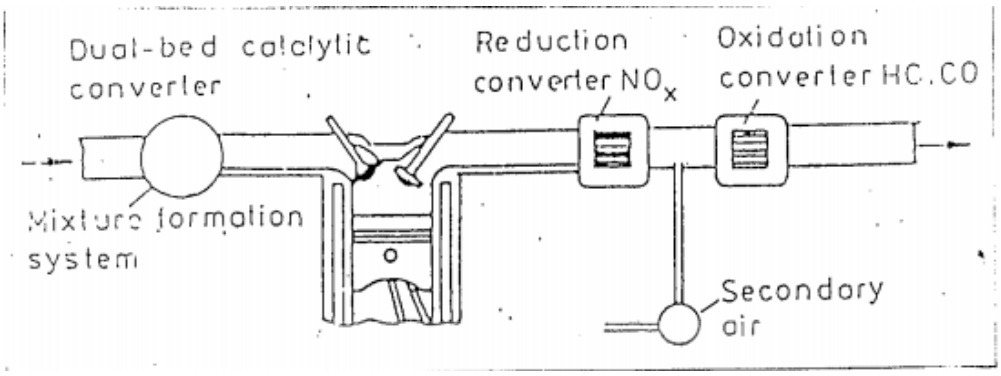
b. *Two-Way Catalytic Converter*

Sistem *two-way catalytic converter* terdiri dari sistem katalis yang dipasang segaris (Gambar). Dimana gas buang pertama mengalir melalui *catalytic* reduksi kemudian *catalytic* oksidasi. Sistem yang pertama (*catalytic* reduksi) merupakan katalis reduksi yang berfungsi untuk menurunkan emisi $NO_x$. Sedangkan sistem yang kedua (*catalytic* oksidasi) merupakan katalis oksidasi yang dapat menurunkan emisi gas karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC). Namun, sistem *two-way catalytic converter* tidak optimal dalam mengkonversikan gas $NO_x$. Reaksi yang terdapat pada dua sistem katalis yang dipasang segaris adalah sebagai berikut:

a. Oksidasi karbon monoksida (CO) menjadi karbon dioksida ($CO_2$)

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad \text{..... (2.6)}$$

b. Oksidasi senyawa hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar atau terbakar parsial menjadi karbon dioksida ($CO_2$) dan air ($H_2O$). *Two-way catalytic converter* secara luas digunakan pada mesin diesel untuk mengurangi senyawa hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO)




Gambar 2.2 *Two-Way Catalytic Converter*

(Sumber: Scafer, 1995)

c. *Three-Way Catalytic Converter*

*Three-way catalytic converter* dirancang untuk mengurangi gas-gas polutan seperti CO, HC, dan $NO_x$ yang keluar dari sistem gas buang dengan cara mengubah gas polutan melalui reaksi kimia menjadi karbon dioksida ($CO_2$), uap air ($H_2O$), dan nitrogen ($N_2$). Terdapat tiga reaksi simultan sebagai berikut:

a. Reaksi reduksi nitrogen oksida ($NO_x$) menjadi nitrogen dan oksigen

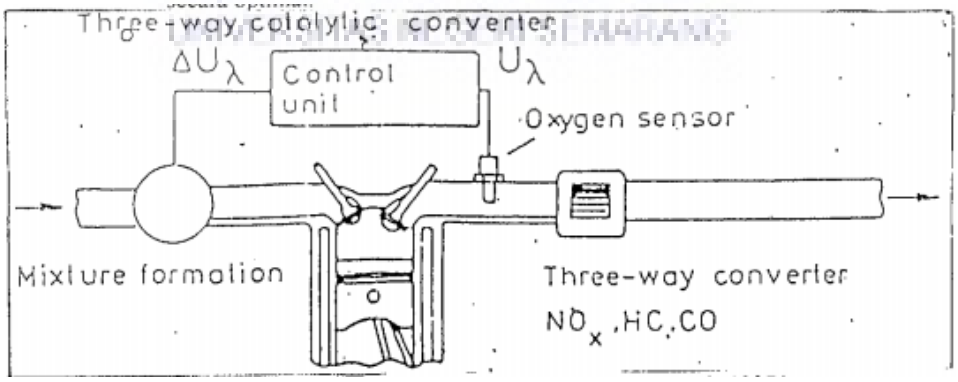
$$2NO_x \rightarrow {}_xO_2 + N_2 \quad \text{..... (2.7)}$$

b. Reaksi oksidasi karbon monoksida (CO) menjadi karbon dioksida ($CO_2$)

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad \text{..... (2.8)}$$

c. Reaksi oksidasi senyawa hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar menjadi karbon dioksida ($CO_2$) dan air ($H_2O$)

$$C_xH_{2x+2} + [(3x+1)/2]O_2 \rightarrow {}_xCO_2 + {}_{(x+1)}H_2O \quad \text{.....(2.9)}$$




Gambar 2.3 *Three-Way Catalytic Converter*

(Sumber: Scafer, 1995)

### 2.1.6 Katalis Logam Paduan CuZn atau Kuningan

Kuningan merupakan logam paduan *non ferro* antara tembaga (Cu) dengan seng (Zn). Bahan paduan utama kuningan adalah tembaga (Cu). Tembaga memiliki sifat-sifat antara lain: berat jenisnya 8,9 , titik lelehya sampai 1083$^{o}$C, mempunyai daya hantar listrik dan panas yang baik, dan tahan pengaruh udara lembab karena melindungi diri dengan karbonat tembaga (Suhardi, 1998). Bahan paduan utama kedua adalah seng (Zn). Seng memiliki sifat-sifat antara lain: berat jenisnya 6,9 – 7,2 , titik cairnya 419$^{o}$C, titik didih 402$^{o}$C, dan tahan udara lembab. Seng biasa digunakan untuk melapis pelat besi agar tidak terjadi korosi (Suhardi, 1998).

Dengan perpaduan kedua jenis logam tersebut, maka kuningan (paduan logam 70% Cu dan 30% Zn) memungkinkan untuk digunakan sebagai katalis pada saluran buang gas kendaraan karena mempunyai konduktivitas termal sebesar 110 W/m.$^{o}$K dan *melting point* 915$^{o}$C. Semakin tinggi konduktivitas termal dan *melting point* maka semakin bagus bahan tersebut digunakan sebagai katalis.

### 2.1.7 Perbandingan Udara dan Bahan Bakar

Emisi gas buang sangat bergantung pada perbandingan campuran bahan bakar dengan udara. Oleh karena itu untuk mengetahui kadar emisi gas buang maka alat uji emisi dilengkapi dengan pengukur nilai lambda ($\lambda$) atau *Air Fuel Ratio* (AFR) yang dapat mengindikasikan campuran tersebut. Teori stoikiometri menyatakan untuk membakar 1 gram bensin dengan sempurna dibutuhkan 14,7 gram oksigen (Swisscontact, 2000). Dengan kata lain perbandingan campuran ideal adalah 14,7 : 1. Perbandingan campuran ini disebut AFR (*Air – Fuel Ratio*) atau perbandingan udara dan bahan bakar. Pada alat uji emisi yang menggunakan istilah AFR, ketika dilakukan emisi dapat menampilkan angka yang berbeda, dimana :

1. AFR = 14,7 berarti campuran ideal.
2. AFR > 14,7 berarti campuran miskin (*lean).*
3. AFR < 14,7 berarti campuran kaya *(rich).*

Untuk menyatakan perbandingan antara teori dan kondisi nyata suatu campuran bahan bakar dan udara dinyatakan dengan Lambda (Swisscontact, 2000). Secara sederhana dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{jumlah\ udara\ sesungguhnya}{teori\ Stoikiometri}$$

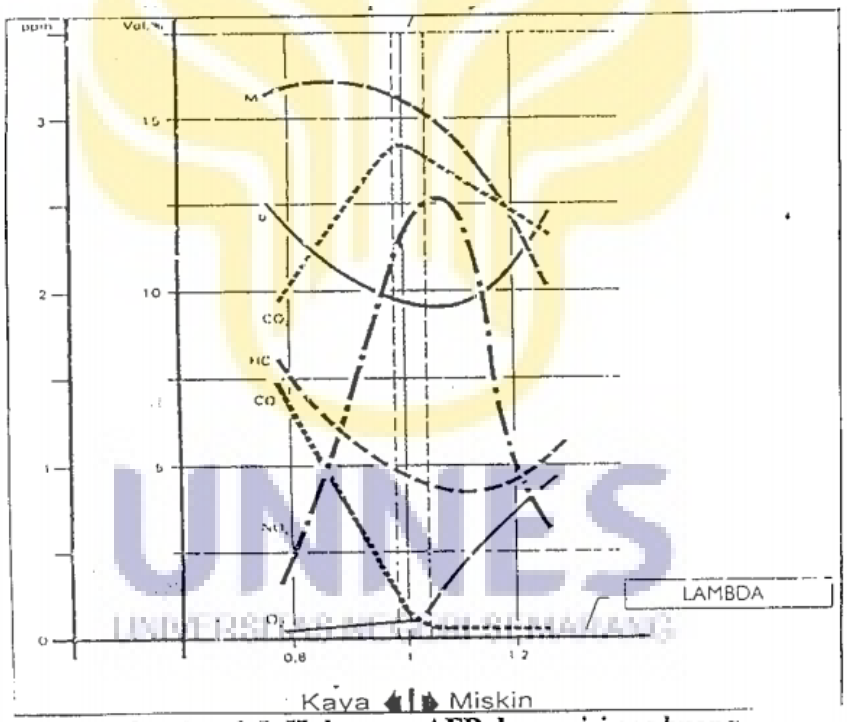
Jika jumlah udara sesungguhnya 14,7 maka,

$$\lambda = \frac{14,7}{14,7:1} = 1$$

artinya : $\lambda = 1$ berarti campuran ideal

$\lambda > 1$ berarti campuran miskin (*lean)*

$\lambda < 1$ berarti campuran kaya *(rich)*




Gambar 2.4 Hubungan AFR dan emisi gas buang

(Sumber: Obert, 1973)

Tabel 2.2 Pengaruh A/F pada daya, bahan bakar dan emisi

| **Parameter** | **A/F > 14,7** | **A/F = 14,7** | **A/F < 14,7** |
|---|---|---|---|
| Daya | Kecil | Rata – rata | Tertinggi |
| Konsumsi bahan bakar | Terbaik | Rata – rata | Tertinggi |
| CO | Rendah | Medium | Tinggi |
| HC | Rendah | Medium | Tinggi |
| $NO_x$ | Tinggi | Medium | Rendah |

(Sumber : Nevers, 1995)

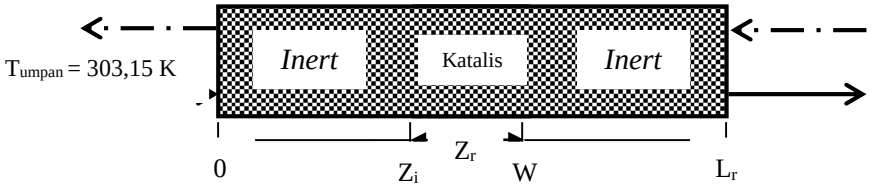
## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Model Reaktor

Reaktor dinamik adalah reaktor yang sengaja dioperasikan dalam kondisi dinamik, sehingga memiliki variabel proses yang berubah terhadap waktu. Perubahan variabel proses pada reaktor unggun tetap (FBR) dapat menyebabkan perubahan konsentrasi di permukaan katalis dan mempengaruhi kecepatan reaksi pada reaksi berkatalis. Konsep ini banyak digunakan untuk meningkatkan kinerja reaktor, khususnya dalam hal konversi (Silveston, 1995).

Jenis reaktor dinamik yang banyak dikembangkan untuk reaksi oksidasi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) adalah *fix bed reactor* (Silveston, 1995). *Fix Bed Reactor* (FBR) adalah reaktor unggun tetap dengan 3 zona yaitu: zona *inert*, zona katalis, dan zona *inert*, seperti terlihat pada Gambar 2.5. Unggun yang terdapat di dalam FBR berupa katalis dan *inert* yang dapat berfungsi sebagai penyimpan jika reaksi bersifat eksotermis seperti reaksi pembakaran, maka panas yang dihasilkan dapat disimpan di dalam unggun reaktor (Silveston, 1995). Reaksi oksidasi CO dan HC hanya terjadi di zona katalis.

Reaksi oksidasi CO dan HC adalah salah satu reaksi eksotermis sehingga dalam kajian ini dipelajari kemampuan FBR untuk mengurangi emisi CO dan HC melalui reaksi pembakaran, khususnya reaksi pembakaran berkatalis yang lebih dikenal dengan istilah reaksi oksidasi katalitik (Silveston, 1995).




Gambar 2.5 Konfigurasi reaktor untuk simulasi FBR

Kajian tentang penggunaan FBR untuk oksidasi CO dan HC telah diaplikasikan di dunia industri karena beberapa alasan:

1. Oksidasi katalitik berlangsung pada temperatur yang jauh lebih rendah daripada pembakaran fasa homogen dan mampu menghilangkan sebagian besar CO dan HC yang terkandung dalam emisi gas buang kendaraan bermotor (Matros & Bunimovich, 1996).
2. Proses oksidasi katalitik dengan menggunakan FBR memiliki kemampuan beroperasi secara ototermal (tanpa membutuhkan media pemanas) (Barresi, 2007).

### 2.2.2 Model Reaksi *Pseudo*-Homogen

Reaksi oksidasi katalitik Karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) merupakan salah satu cara untuk mengurangi emisi CO dan HC pada sistem pembuangan kendaraan bermotor (*exhaust system*). Reaksi oksidasi CO dan HC adalah reaksi eksotermik sehingga panas reaksi yang timbul dapat dimanfaatkan untuk memanaskan umpan agar reaktor dapat beroperasi secara ototermal

Reaksi oksidasi katalitik CO dan HC dimodelkan secara *pseudo*-homogen dengan asumsi bahwa di dalam reaktor hanya terdapat satu fase. Kondisi nyata sebenarnya adalah terdapat dua fase, yaitu fase padat katalis dan fase gas yang bereaksi (Elnashaie, 1993). Selain itu, gradien konsentrasi dan temperatur dianggap hanya terjadi di arah aksial reaktor. Hal ini dapat terjadi akibat aliran dalam sistem diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan aliran yang turbulen. Aliran turbulen juga menyebabkan pencampuran arah radial menjadi sangat baik sehingga tidak menyebabkan adanya perbedaan temperatur dan konsentrasi di

arah radial (Froment, 1979). Selain itu, model reaksi *pseudo*-homogen didekati dengan asumsi bahwa transfer massa reaktan ke dalam padatan (katalis) berlangsung sangat cepat, sehingga dapat diabaikan terhadap kecepatan reaksi (Froment, 1974). Secara matematis, model *pseudo*-homogen order satu dapat dinyatakan seperti Persamaan 2.10.

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k\,C_A \quad \text{(2.10)}$$

Sedangkan model *pseudo*-homogen orde dua dapat dinyatakan seperti Persamaan 2.11.

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = -\frac{dC_B}{dt} = kC_AC_B \quad \text{(2.11)}$$

dengan $C_A$ adalah konsentrasi gas karbon monoksida (CO) atau konsentrasi gas hidrokarbon (HC), $C_B$ adalah konsentrasi gas oksigen ($O_2$), dan k konstanta laju reaksi. Menurut persamaan Arrhenius, konstanta laju reaksi dipengaruhi oleh suhu dan dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.12.

$$k = A_r \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{(2.12)}$$

dengan $A_r$ adalah faktor tumbukan (L/mol.s), $E_a$ energi aktivasi (kJ/mol) dan R tetapan gas ideal (L.atm/mol.K).

## 2.3 Hipotesis

1. Konversi CO menjadi $CO_2$ dan konversi HC menjadi $H_2O$ dan $CO_2$ melalui katalis logam paduan CuZn pada sistem *catalytic converter* oksidasi dipengaruhi oleh suhu.
2. Mekanisme reaksi CO menjadi $CO_2$ dan mekanisme reaksi HC menjadi $H_2O$ dan $CO_2$ dapat digambarkan dengan model reaksi *pseudo-homogeneous.*

# BAB 5
# PENUTUP

## 5.1 Simpulan

1. Katalis CuZn mampu menurunkan konsentrasi emisi gas buang kendaraan karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC). Katalis CuZn untuk CO efektif pada 2000 rpm dengan persentase penurunan konsentrasi emisi sebesar 47,71%, sedangkan untuk HC efektif pada 2500 rpm dengen persentase penurunan konsentrasi emisi sebear 55,34%. Oleh karena itu, katalis CuZn telah dipertimbangkan sebagai katalis yang prospektif untuk menurunkan konsentrasi emisi CO dan HC.
2. Dengan menggunakan model *pseudo-homogeneous reaction*, parameter kinetika reaksi oksidasi CO dan HC adalah orde reaksi, konstanta laju reaksi (k), energi aktivasi (E), dan faktor pre-eksponensial (A). Reaksi oksidasi CO mengikuti orde 1, sedangkan reaksi oksidasi HC mengikuti orde 2. Nilai energi aktivasi CO adalah 132,54 kJ/mol, sedangkan nilai energy aktivasi HC adalah 37,55 kJ/mol.
3. Katalis tidak mengalami perubahan pada akhir reaksi sehingga tidak memberikan energi ke dalam sistem, tetapi katalis akan memberikan mekanisme reaksi alternatif dengan energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan dengan reaksi tanpa katalis sehingga adanya katalis akan meningkatkan laju reaksi.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## 5.2 Saran

1. Sebaiknya, asumsi pemodelan yang digunakan sesuai dengan kondisi nyata pada percobaan yaitu menggunakan pemodelan Eley-Rideal atau Langmuir-Hinshelwood sehingga perlu dilakukan perhitungan laju alir gas serta kondisi nyata tekanan pada saat melakukan percobaan.
2. Diharapkan pada penelitian selanjutnya meneliti tentang pengaruh penggunaan katalis CuZn terhadap konsentrasi emisi $NO_x$.

# DAFTAR PUSTAKA


Aghalayam, P., Y.K. Park, dan D.G. Vlaches. 2000. A Detailed Surface Reaction Mechanism for CO Oxidation on Pt. *Proceedings of The Combustion Institute:* 1331- 1339.

Anderson, R.B. and Dawson, P.T. 1976. *Experimental Methods in Catalytic Research.* Preparation and Examination of Practical Catalysts. Vol 2. pp. 2-51. London: Academic Press Inc.

Arends, BPM dan Berenschot, H. 1980. *Motor Bensin*. Translated by Sukrisno, U. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Astika, I Komang. 2000. Studi Eksperimental Pengaruh Tembaga sebagai Catalytic Converter Muffler terhadap Emisi CO. HC. dan NOx pada Mesin Bensin 4 Langkah. *Tugas Akhir*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Bachrun. 1993. *Polusi Udara Perkotaan Pemantauan dan Pengaturan.* Lab Termodinamika PAU. Bandung: ITB.

Barresi, A.A., Baldi, G., and Fissore, D. 2007. *Forced Unsteady-State Reactors as Efficient Devices for Integrated Processes: Case Histories and New Perspectives*. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol. 46(25): 8693-8700.

Cahyono, A., Razif, M., dan Mursid, M. 2006. Pengaruh Katalis Oksida Tembaga + Krom Terhadap Emisi Gas CO, $CO_2$, dan HC pada Kendaraan Bermotor. Teknik Lingkungan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Cesarina, F. 2013. Pemodelan dan Simulasi Reaktor Unggun Tetap untuk Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana. Tesis. Universitas Indonesia. Depok

Degobert, P. 1995. *Automobiles ad Pollution.* Society of Automotive Engineers. Inc. Pp: 24 – 372.

Delgado, K.H., Rica, Costa. 2014. Surface Reaction Kinetics for Oxidation and Reforming of $H_2$, CO, dan $CH_4$ over Nickel-based Catalysts. *Disertation*. Karlsruher Institut fur Terchnologie. Germany.

Dowden, D. 1970. Catalytic Handbook. Verlag Inc. New York.

Elnashaie, S, S., and Elshishini, S, S,. 1993. Modelling, Simulation, and Optimization of Industrial Fixed Bed Catalytic Reactors. Gordon and Breach Science Publishers.

Fogler, H.S. 1999. *Elements of Chemical Reaction Engineering*. 3rd edition. New Delhi: Prentice-Hall, Inc.

Froment, G,F., 1974. Analysis and Design of Fixed Bed Catalytic Reactor. Universitat Ghent. Belgium.

Froment, G, F., and Kenneth, B, B,. 1979. Chemical Reactor Analysis and Design. John Willey & Sons Inc. New York.

Heghes, and Crina I,. 2006. $C_1$ – $C_4$ Hydrocarbon Oxidation Mechanism. *Dissertation*. University of Heidelberg. Germany.

Heisler, H. 1995. Advanced Engine Technology. *Willesden Centre*. London.

Hudaya, T., Halim, M., dan Santosa, R, A., 2011. Simulasi Reaktor *Steam Reforming* Gas Alam dengan Model One Dimensional Pseudo Homogenenous. *Prosiding Seminar Nasional Tekni Kimia "Kejuangan"*. ISSN 1693-4393.

Husselbee., and William. 1985. *Automotive Cooling Exhaust. Fuel and Lubricating System.* A Prentice Hall Company. Reston. Virginia.

Howard, S.P., Rowe, D.R. and Tchaobanoglous, G. 1985. *Environmental Engineering*. Mc. Graw Hill. Los Angeles.

Irawan, B. 2006. *Pengaruh Catalytic Converter Kuningan terhadap Keluaran Emisi Gas Carbon Monoksida dan Hidrokarbon Motor Bensin*. Majalah Traksi. Semarang.

Irawan, RM. B. dan Subri, M. 2005. *Unjuk Kemampuan Catalytic Converter dengan Katalis Kuningan untuk Mereduksi Gas Hidrokarbon Motor Bensin*. Traksi Vol. 03 No. 02. Semarang: Universitas Muhammadiyah Semarang.

Irawan, B., Purwanto, dan Hadiyanto. 2013. Unjuk Kemampuan Katalis Tembaga Berlapis Mangan Dalam Mengurangi Emisi Gas Carbon Monoksida Motor Bensin. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Semarang*. Universitas Diponegoro.

Iskandar, A. 2010. Pengaruh Penggunaan Kuningan sebagai Katalis pada Saluran Buang Yamaha Jupiter Z tahun 2004 terhadap Konsentrasi HC. *Skripsi*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.

JICA (*Japan International Cooperation Agency)* dan EIMA *(Environmental Impact Management Agency of Indonesia).* 1995. *The Study Integrated Air Quality Management for Jakarta Metropolitan Area*. Bapedal. Indonesia.

Keulks, G. W., and Charles C. 1970. The Kinetics and Mechanism Of Carbon Monoxide Oxidation Over Silver Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry* 74(13): 2590 – 2595.

Kohse, K., and Jeffries, J.B. 2013. Applied Combustion Diagnostics "Diagnostics for Catalytic Combustion".

Kristanto, P. 2015. *Motor Bakar Torak – Teori & Aplikasinya*. Yogyakarta: Penerbit Andi.

Levenspiel, O. 1999. Chemical Reaction Engineering. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. Toronto.

Matros,Y.S., and Bunimovich, G.A. 1996. *Reverse-Flow POperation in Fixed Bed Catalytic Reactors,* Catalyst Reviews Science and Engineering. Vol.38(1): 1-68.

Marin, P., Ordonez, S., and Diez, F.V. 2009. Systematic Study of The Performance of a Reverse Flow Reactor for the Treatment of Lean Hydrocarbon. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 84(9), 1292 – 1302.

Miro', E., Lambar, Do., and Petunchi, J.O. 1987. Kinetics and Mechanism of CO Oxidation Over Cu Mordenite. *Journal of Catalysis* 104: 176- 185.

Muhaji. 2001. Pengaruh Zeolit Alam dan Mangan (Mn) sebagai Katalis Silincer Sepeda Motor 4 Langkah terhadap Kadar Emisi Gas Buang. *Tesis*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Obert, and Edward. F. 1973. Internal Combustion Engine and Air Pollution. 3th Edition. Harper & Row Publisher, Inc. New York.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup. 2006. Jakarta.

Rohman, M.N.K dan Maharani, D.K. 2014. Sintesis dan Karakterisasi Padatan Silika-Alumina dengan Variasi Suhu Kalsinasi sebagai Pendukung Katalis Campuran Oksida Logam Cu/Zn. *Journal of Chemistry*. Vol. 3(2)

Ruktiningsih, R. 2006. Model Hubungan antara Kecepatan Lalu-lintas dan Konsentrasi CO Ambient pada Jalan Raya. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Dipublikasikan oleh Teknik Lingkungan. Institut Teknologi Bandung.

Saepudin, A., dan Admono, T. 2005. *Kajian Pencematan Udara Akibat Emisi Kendaraan Bermotor di DKI Jakarta*. Jurnal Teknologi Indonesia 28 (2) 2005. 29-39. LIPI Press.

Sastranegara, I.P., Suyasa, I.W., dan Suarna, I.W,. 2009. Pengaruh Nilai Oktan Bahan Bakar dan Putaran Mesin pada Kendaraan Bermotor Terhadap Karakteristik Emisi Gas Buang. *Journal Ecotrophic 4(2): 73-79*.

Scafer, F. 1995. *Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engine.* Springer-Verlag Wien, New York.

Silveston, P., Hudgins, R.R., and Renken, A. 1995. *Periodic Operation of Catalytic Reactors-Introduction and Overview*. Catalysis Today, Vol 25(2), 91 – 112.

Springer, and Verlag. 1970. *Catalyst Handbook*. Walfe Scientific Book. New York Inc. England.

Suhardi. 1998. *Ilmu Bahan*. Sebelas Maret University Press. Surakarta.

Suharti, P, H., Budhi, Y, W., dan Bindar, Y,. 2011. Kajian Pemanfaatan Reverse Flow Reactor untuk Oksidasi Katalitik Uap Bensin. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia* 10(1): 26-36.

Suyanto, W. 1989. *Teori Motor Bensin*. Jakarta: P2LPTK.

Susantya, R. dan Pramudijanto, J. 2016. *Perancangan Sistem Pengaturan Perbandingan Udara Bahan Bakar (Air Fuel Ratio) pada Mesin Pengapian Busi Menggunakan Metode Fuzzy*. Departemen Mekanik dan *CNC-VEDC*. ITS. Surabaya.

Swisscontact. 2000. Program Udara Bersih Uji Emisi. Seri Otomotif. Jakarta.

Wardhana, A. 1999. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Cetakan Kedua. Andi Offse. Yogyakarta.

Warju. 2003. Pengaruh Penggunaan Catalytic Converter Kuningan (Cu+Zn) Berlapis Krom (Cr) terhadap Emisi Gas Buang CO dan HC. Da dan Sfc pada Mesin Toyota Kijang Tipe 4K. *Skripsi*. Universitas Negeri Surabaya. Surabaya.

Warju. 2006. Pengaruh Penggunaan Catalytic Converter Tembaga Berlapis Mangan Terhadap Kadar Polutan Motor Bensin Empat Langkah. *Tesis.* Program Studi Magister Institut Teknologi Surabaya. Surabaya.

Warju. 2013. Pengaruh Penggunaan Metallic Catalytic Converter Berbahan Kuningan dan Aplikasi Teknologi SASS Terhadap Emisi Sepeda Motor Honda New Mega Pro. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya* 1(2): 102-109.

Westley, F. 1980. *Table of Recommended Rate Constants for Chemical Reactions Occuring in Combustion*. Washington D C.

Winarno, J. 2014. *Studi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermesin Bensin pada Berbagai Merk Kendaraan dan Tahun Pembuatan.* Yogyakarta: Universitas Janabadra.

Zhang, C., Hu. P, and Alavi. A. 1999. A General Mechanism for CO Oxidation on Close-Packed Transition Metal Surfaces. *Journal American Chemical Society* 121: 7931 – 7932.

Zhang, Y., Yanding Wu, Haifeng Wang, and Yun Guo. 2015. The Effects of the Presense of Metal Fe in Oxidation Over Ir/Feox Catalyst. *Catalysis Communication* 61: 83- 87.

Zhu, Y., Mimura, K., and Isshiki, M. 2002. Oxidation Mechanism of Copper at 623 – 1073 K. *Materials Transactions*, Vol. 43. No. 9: 2173-2176.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG