

EFEK PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK DISTRIBUSI AMMONIA PADA ALIRAN GAS LAMINAR PADA SCR CATALYTIC FILTER DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI NUMERIK

Syaiful

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH. Tembalang Semarang 50255

Abstract

Selective catalytic reduction (SCR) and diesel particulate filter (DPF) as a combined systems are used to reduce NO_x and soot emissions emitted by the diesel combustors, respectively. The use of these methods in automotive application requires more space. Accordingly, a SCR catalytic filter is devised NO_x reacts with ammonia (as a reducing agent) at the certain temperatures through a catalyst producing a harmless matter. An optimal NO_x conversion is influenced by several additional factors including the homogeneity of NH₃/NO_x mixture, catalyst temperature (reaction temperature), space velocity (velocity of exhaust gas), uniformity of flow and spraying quality of urea solution droplets. To control NO_x emissions, the need for smooth gaseous flow distributions become more important. The most important of gaseous flow distributions is the distribution of ammonia and NO_x entering the SCR catalyst with the actual NH₃/NO_x ratio being the most frequently specified parameter. In SCR application, the important thing is not only on NO_x reduction but also on ammonia slip which is influenced by the ammonia distribution. A heating temperature is required to achieve a temperature window. However, the heating temperature affects the gaseous flow structure in SCR catalytic filter which influences the ammonia mass distribution. Therefore, the uniformity of flow with the effect of heating temperature is considered in this study. Two Reynolds numbers of 320 and 640 are imposed to investigate the ammonia mass distribution characteristics at the laminar flow. The heating temperature is imposed in the range from 473 to 1273 K with 200 K intervals. The results show that the uniformity of ammonia mass distribution indicated by the mixing index reduces as increasing the heating temperature at the laminar flow.

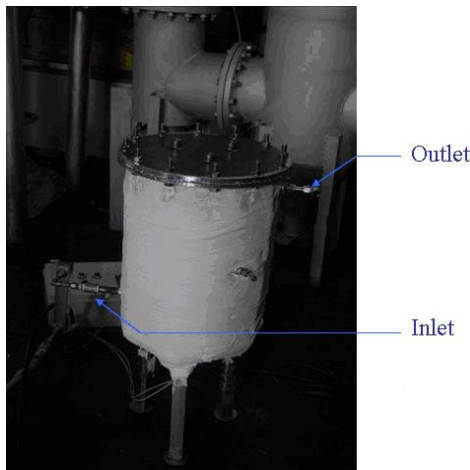
1. PENDAHULUAN

Polusi udara yang berasal dari motor disel merupakan isu yang serius akhir-akhir ini karena dampaknya terhadap manusia dan lingkungan. NO_x terbentuk dari Nitrogen dan Oksigen pada temperatur pembakaran yang tinggi di dalam ruang bakar. Ada beberapa kemungkinan reaksi yang membentuk NO yang mungkin terjadi selama proses pembakaran dan proses setelah pembakaran^[1]. Hampir semua NO_x dipancarkan sebagai nitrogen oksida (NO) yang kemudian teroksidasi secara cepat menjadi senyawa beracun nitrogen dioksida (NO₂). NO_x adalah komppnen utama polusi udara yang menghasilkan hujan asam dan asap fotokimia. Hujan asam dihasilkan dari konversi sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO dan NO₂) menjadi asam sulfat (H₂SO₄) dan asam nitrat (HNO₃) berturut-turut menghasilkan larutan asam dengan pH dibawah 5. Asap fotokimia adalah kabut tipis yang disebabkan oleh radiasi ultraviolet di dalam atmosfer yang terpolusi dengan hidrokarbon dan oksida nitrogen. Jelaga yang dihasilkan oleh karena oksidasi yang tak sempurna dari senyawa karbon dapat masuk ke dalam paru-paru dan mengakibatkan edema paru-paru dan kanker^[2-4].

Pada kenyataannya, gas buang dari mesin disel berdampak pada kualitas udara yang mempengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu diperlukan perundang-undangan untuk membatasi

emisi karbon monoksida, hidrokarbon, nitrogen oksida dan jelaga sebagai akibat dari pembakaran mesin disel. Undang-undang untuk emisi gas buang ini sudah diperkenalkan sejak tahun 1966 di USA. Di Eropa diperkenalkan dengan nama EURO I, EURO II dan sekarang EURO VI yang mana standar ini dipakai di banyak negara termasuk Indonesia. Sampai saat ini Indonesia menerapkan EURO II dan akan menerapkan standar emisi EURO IV pada tahun 2012. Hal ini berarti bahwa emisi NO_x yang berasal dari gas buang mesin disel maksimum 3,5 g/kWh sedangkan jelaga maksimum 0,025 g/kWh. Oleh karena penurunan emisi NO_x dan jelaga sampai tingkat emisi yang diijinkan tidak dapat dicapai dengan pemodifikasian mesin, maka proses *aftertreatment* pada gas buang mesin disel mutlak diperlukan.

Ada beberapa metode dalam proses *aftertreatment* pada gas buang mesin disel antara lain *diesel oxidation catalyst* (DOC), *lean NO_x trap* (LNT), *selective catalytic reduction* (SCR) dan *diesel particulate filter* (DPF). DOC digunakan untuk menurunkan emisi HC dan CO. LNT digunakan untuk menurunkan emisi NO_x dengan mentrap emisi NO_x pada absorber yang dilapisi dengan katalis. SCR mempunyai fungsi seperti LNT, yaitu untuk menurunkan emisi NO_x hingga 95%^[5]. Sedangkan DPF digunakan untuk menurunkan jumlah emisi jelaga (*soot/carbon black*).



Gambar 1 SCR catalytic filter device.

Dalam aplikasinya, seringkali DOC, SCR dan DPF dipasang bersamaan pada mobil disel. Mesin disel membutuhkan ruang yang lebih besar apabila ketiga metode ini digunakan secara bersamaan. Akibat lainnya yang muncul adalah lebih tingginya hambatan aliran (*pressure drop*). Untuk mengatasi masalah tersebut, penulis mengembangkan metode yang dapat menurunkan NO_x dan jelaga sekaligus. Metode ini menggabungkan antara SCR dan DPF yang disebut sebagai SCR *catalytic filter*^[6-8] seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.

SCR ini menggunakan MnO₂-V₂O₅-WO₃/TiO₂-SiC sebagai katalitik filter yang terdiri dari MnO₂-V₂O₅-WO₃ sebagai katalis untuk mereduksi emisi NO_x, TiO₂ sebagai katalis pembantu untuk mempertinggi aktivitas katalis SCR, dan SiC sebagai filter untuk mereduksi emisi jelaga. SCR *catalytic filter* ini bekerja pada rentang temperatur 150°C – 450°C. Temperatur merupakan salah satu parameter yang penting dalam reaksi kimia selain distribusi ammonia. Konversi NO_x maksimum dalam SCR *catalytic filter* dicapai pada temperatur tertentu.

Pada penelitian sebelumnya penulis meneliti efek penambahan panas terhadap aliran gas di dalam SCR *catalytic filter*^[9]. Akan tetapi penelitian ini tidak membahas tentang efek penambahan panas terhadap distribusi ammonia di dalam SCR. Oleh karena itulah, efek penambahan panas terhadap distribusi ammonia di dalam SCR diteliti dengan menggunakan simulasi numerik dalam paper ini.

SCR CATALYTIC FILTER DAN DESAIN GEOMETRI

Pemodelan pada SCR *catalytic filter* mengacu pada SCR *catalytic filter* sebenarnya (lihat Gambar 1). Saluran masuk terletak 202.5 mm diatas dinding bagian bawah seperti yang diberikan oleh Gambar 2(a) dan (b). Saluran keluar ditempatkan dekat tutup bagian atas berlawanan arahnya dengan saluran masuk. Saluran masuk dan keluar mempunyai diameter 12.5 mm. SCR

catalytic filter mempunyai panjang 687 mm dan diameter 400 mm. Tiga *catalytic filter* mempunyai diameter 60 mm, tinggi 50 mm dan tebal 10 mm. Sisi bagian bawah dari ketiga *catalytic filter* ini ditutup dengan plat, sehingga aliran gas dari bawah melewati sisi dinding *catalytic filter* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(c). Tiga catalytic filter diletakkan menggantung pada sebuah plat dengan beda sudut 120° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(d). Sebuah pemanas yang berbentuk pipa U dengan diameter 20 mm seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2(e) diletakkan pada pusat dinding bagian bawah SCR. Sebuah injektor dengan diameter 1,5 mm diletakkan 70 mm dari dinding SCR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(f).

MODEL ANALISA NUMERIK

Persamaan untuk aliran gas di dalam SCR

Dalam pemodelan numerik aliran gas, distribusi temperatur dan distribusi ammonia di dalam SCR *catalytic filter* device membutuhkan pemecahan persamaan kekelan masa, momentum, energi dan persamaan difusi yang dapat diberikan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \beta g (T - T_0) \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial (\rho_p T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_p u_j T)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial p}{\partial t} - \sum_{m=1}^n (\rho_m T + \Delta_m) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + \sum_{m=1}^n \rho_m c_{pm} D \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_m)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Y_m)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \right) + \dot{w}_m \quad (4)$$

dimana u , p dan T adalah berturut-turut kecepatan, tekanan dan temperatur. T_0 adalah temperatur fluida dalam keadaan kesetimbangan statik. ρ , c_p , k , g dan β adalah berturut-turut masa jenis, panas jenis pada tekanan konstan, konduktivitas termal, percepatan gravitasi dan koefisien ekspansi termal. τ_{ij} adalah tensor tangan viskos, Y adalah fraksi masa, D adalah koefisien difusi, Δ_m adalah panas pembentukan dan \dot{w}_m adalah sumber-sumber kimia. Subskrip i dan j menyatakan besaran-besaran yang dihubungkan dengan arah koordinat dengan m merupakan unsur senyawa kimia. Tegangan viskos diberikan oleh persamaan berikut,

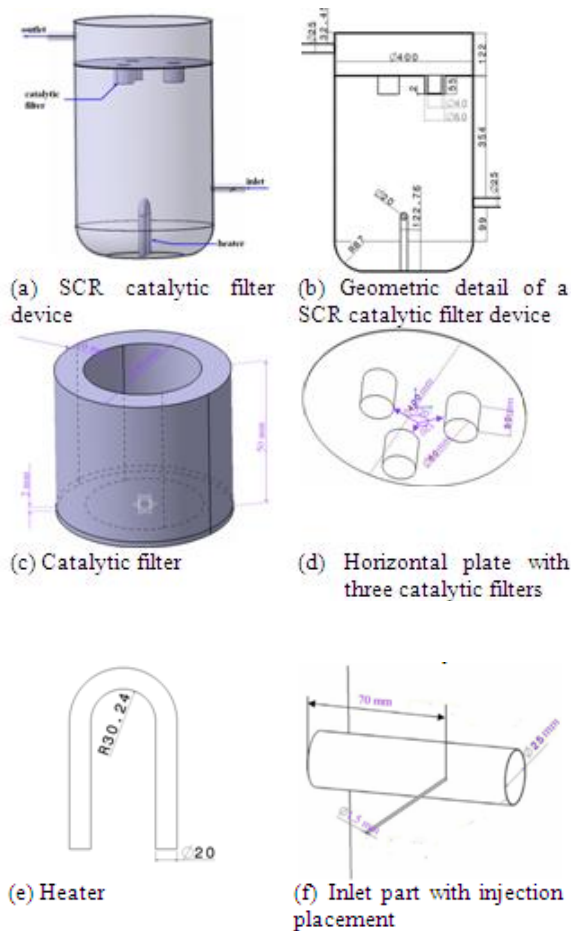
$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5)$$

dimana μ adalah viskositas campuran, s_{ij} adalah laju tensor regangan dan δ_{ij} adalah Kronecker delta

Aliran gas di dalam poros media dihitung dengan menggunakan model karakteristik pressure drop seperti yang diberikan sebagai berikut,

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = -\alpha_j |\mathbf{v}| + \beta_j \hat{y}_j \quad (6)$$

koefisien α dan β dalam Persamaan (6) merupakan nilai karakteristik dari poros media yang ditentukan dari substratnya. \mathbf{v} dan $|\mathbf{v}|$ adalah vektor kecepatan superficial dan nilai absolutnya. Menurut Dupuit-Forchheimer, vektor kecepatan superficial dinyatakan sebagai,



Gambar 2 Desain geometri dari SCR catalytic filter

$$\mathbf{v} = \chi \mathbf{V} \quad (7)$$

dimana χ menyatakan porositas medium dan \mathbf{V} adalah vektor kecepatan fluida di depan permukaan poros media.

Aliran gas di dalam SCR catalytic filter diasumsikan sebagai fluida yang kompresibel, keadaan tunak dengan sifat-sifat fisik fluida bergantung pada temperatur. Reaksi kimia tidak diperhitungkan dalam

penelitian ini. Dalam penelitian ini, hanya aliran laminar yang diteliti.

Condisi batas

Untuk memecahkan persamaan yang digunakan dalam pemodelan, maka diperlukan beberapa kondisi batas.

Kondisi batas pada pipa masuk

Distribusi aliran pada batas pipa masuk diberikan seragam kecuali dekat dengan dinding. Temperatur gas buang yang masuk adalah sebesar 298 K^[5],

$$u_1 = U, u_2 = u_3 = 0, u_j = 0 \text{ (di dinding) dan } T = T_\infty \quad (8)$$

dimana U adalah kecepatan aliran gas buang yang searah dengan aliran gas, T_∞ adalah temperatur gas buang. Dua kecepatan gas buang untuk aliran laminar diberikan dalam bentuk bilangan Reynolds, yaitu $Re = 320$ dan $Re = 640$. Komposisi gasnya adalah ammonia 800 ppm, NO 600 ppm, 7% O₂ dan sisanya N₂^[5]. Laju aliran gas buang diberikan sebesar 200 l/menit^[10].

Meskipun gas buang terdiri dari berbagai senyawa kimia, dalam pemodelan ini hanya diasumsikan 2 zat yaitu ammonia dan gas buang. (yang tersusun dari NO, O₂ dan N₂). Sifat-sifat fisik dari gas buang dihitung sebagai sifat-sifat campuran^[11].

Kondisi batas pada dinding

Kondisi batas pada dinding adalah tanpa slip yang berarti bahwa komponen vektor kecepatan di dinding adalah nol. Temperatur pada permukaan dinding pemanas dipertahankan konstan pada rentang 470 K sampai dengan 1273 K dengan interval 200.

$$u_j|_{wall} = 0 \text{ dan } T|_{wall} = T_{heater} \text{ (pada heater)} \quad (9)$$

Kondisi batas pada pipa keluar

Kondisi batas pada pipa keluar dipilih jauh dari gangguan aliran. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan keadaan aliran yang fully developed. Hal ini berarti bahwa semua gradien parameter (kecuali tekanan) dalam arah aliran adalah nol sesuai dengan kondisi batas Neumann.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \text{ (dalam arah aliran), } p = p_{atm} \quad (10)$$

Metode numerik

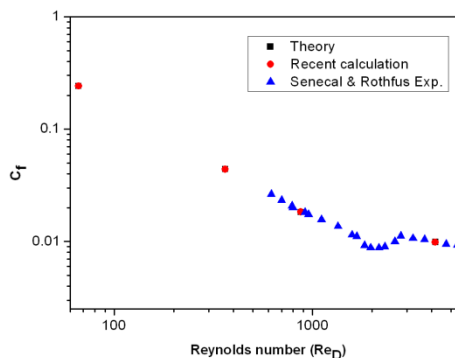
Grid yang dibangun untuk pemodelan SCR catalytic filter adalah polihedral takterstruktur dengan jumlah sel 125.784 seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3(a). Tiga catalytic filter yang dinyatakan sebagai CF1, CF2 dan CF3 juga ditunjukkan dalam gambar ini. Pemanjangan grid sel di pipa keluar dimaksudkan untuk mendapatkan aliran fully developed. Gambar potongan dari grid sel catalytic filter diberikan pada Gambar 3(b). Pada gambar ini, catalytic filter dinyatakan sebagai poros media.

Metode *control-volume finite difference* digunakan untuk mendiskritisasi persamaan fluida, Persamaan (1)-(6). Upwind differencing scheme digunakan untuk perhitungan masalah konveksi-difusi aliran. Korelasi distribusi tekanan dan kecepatan ditentukan dengan menggunakan algoritma SIMPLE^[12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi model

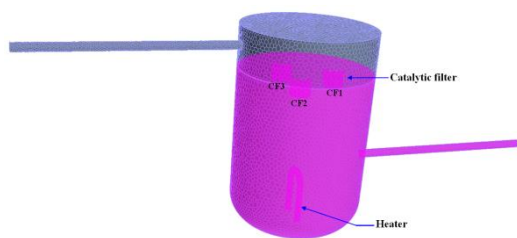
Untuk memastikan bahwa pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini benar, maka hasil simulasi yang diperoleh dibandingkan dengan teori dan experimental yang telah dilakukan oleh Senecal dan Rothfus seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4. Dalam Gambar 4 ditunjukkan bahwa hasil simulasi koefisien gesekan pada dinding pipa keluar menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil teori dan experimen untuk berbagai Reynolds number.



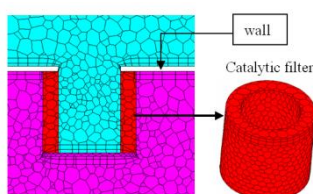
Gambar 4. Perbandingan teori, hasil simulasi dan experiment untuk faktor gesekan pada pipa keluar dari SCR catalytic filter.

Distribusi kecepatan aliran gas di dalam SCR

Pada $Re = 320$, dua sirkulasi aliran diketahui pada lokasi 13 dan 29 cm setelah fluida menumbuk dinding untuk kasus tanpa adanya pemanasan aliran seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5(a). Dua sirkulasi aliran fluida juga diamati setelah aliran fluida menumbuk dinding pada lokasi 13 dan 19 cm dengan pemanasan. Dua sirkulasi kecil dari fluida terletak berlawanan dengan letak sirkulasi utama di lokasi 13 cm dengan pemanasan dikarenakan kecepatan aliran gas yang tinggi disekitar pemanas. Besar kecepatan aliran gas diketahui terletak antara CF2 dan CF3 pada lokasi 45 cm dalam kasus tanpa pemanasan, sedangkan kecepatan maksimum terletak antara CF2 dan CF3 pada lokasi 45 cm dan diantara dua sirkulasi pada lokasi 29 cm dengan pemanasan.

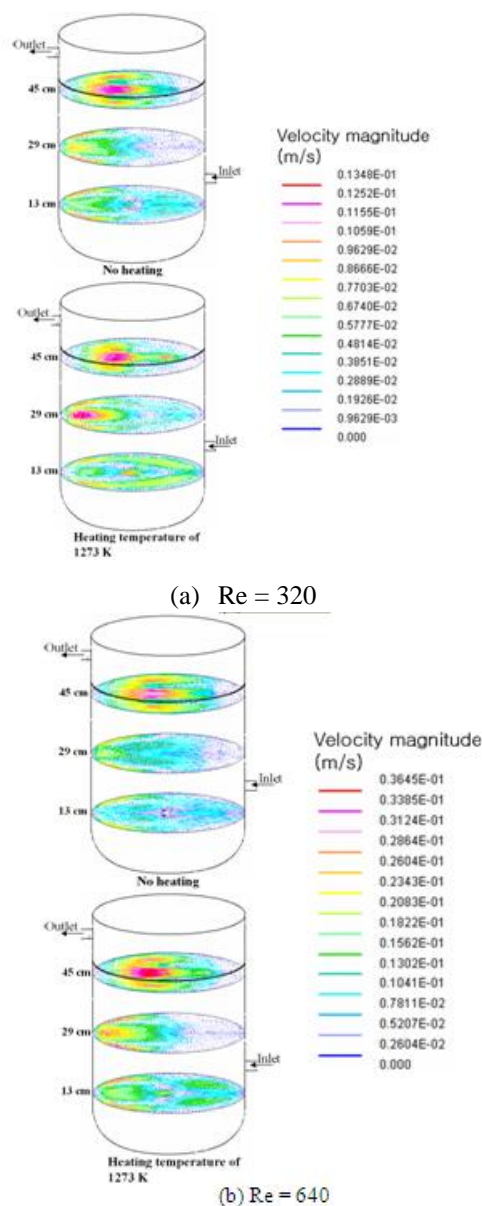


(a) Polyhedral-cell grids of SCR device model



(b) A part of SCR cell grids in cross sectional view with a catalytic filter

Dua aliran sirkulasi utama juga didapatkan di lokasi 13 dan 29 cm dengan dan tanpa pemanasan pada $Re = 640$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b). Fluida kecepatan tinggi terlihat diantara CF2 dan CF3

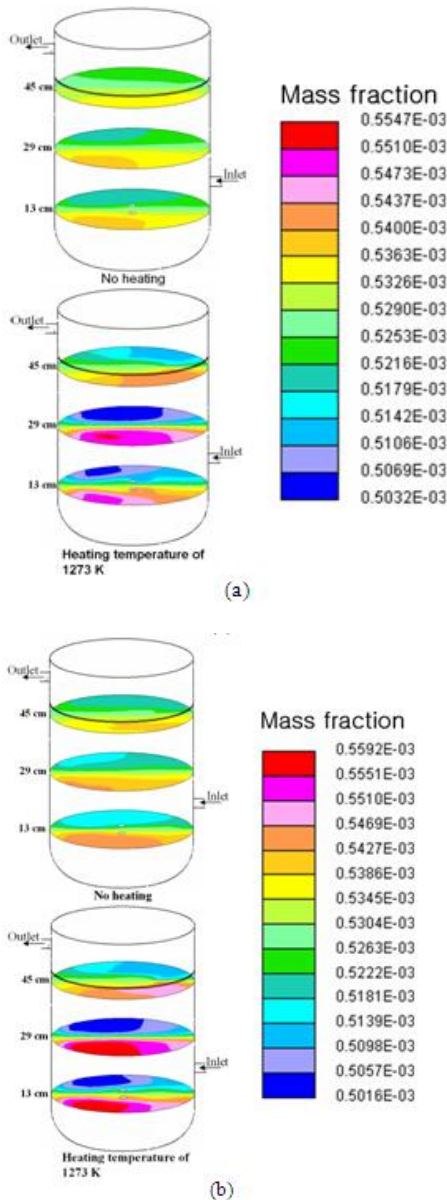


Gambar 5. Perbandingan tanpa pemanasan dengan pemanasan untuk distribusi kecepatan aliran gas pada penampang horizontal untuk lokasi yang berbeda-beda sepanjang SCR catalytic filter untuk kasus laminar

pada lokasi 45 cm untuk kasus tanpa pemanasan, sedangkan dengan adanya pemanasan fluida kecepatan tinggi teramati di antara CF2 dan CF3 pada lokasi 45 cm dan fluida di luar sirkulasi pada lokasi 29 cm.

Distribusi ammonia

Gambar 6 menunjukkan distribusi ammonia sepanjang SCR *catalytic filter* pada penampang horizontal dengan dan tanpa pemanasan untuk bilangan Reynolds 320 dan 640 (kasus laminar) seperti yang dinyatakan oleh Gambar 6 (a) dan (b).



Gambar 6.

Perbandingan pada kasus tanpa dan dengan pemanasan untuk konsentrasi masa ammonia pada penampang horizontal pada lokasi berbeda sepanjang SCR catalytic filter dalam kasus laminar; (a) $Re = 320$ dan (b) $Re = 640$.

Masa ammonia yang terkonsentrasi di dalam inti sirkulasi teramati dengan jelas pada $Re = 320$ dengan dan tanpa pemanasan seperti yang ditunjukkan oleh

Gambar 6(a). Konsentrasi ammonia yang tinggi dan rendah didapati di dalam inti sirkulasi pada lokasi 13 dan 29 cm dengan pemanasan. Sirkulasi yang kuat disebabkan oleh adanya pemanasan membatasi transport masa ammonia dari inti ke bagian luar sirkulasi. Perbedaan konsentrasi ammonia yang rendah teramati pada kasus tanpa pemanasan.

Fenomena serupa pada $Re = 320$ juga diperoleh pada $Re = 640$ seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6(b). Konsentrasi ammonia yang tinggi dan rendah diperoleh di dalam inti sirkulasi dengan pemanasan. Pemanasan mempercepat kecepatan sirkulasi yang mengakibatkan pembatasan transport masa ammonia dari inti ke daerah luar sirkulasi. Perbedaan yang kecil dari konsentrasi masa ammonia diperlihatkan dalam kasus tanpa pemanasan daripada dengan pemanasan.

Keseragaman distribusi ammonia

Keseragaman dari distribusi masa ammonia di dalam SCR *catalytic filter* dinyatakan oleh sebuah index pencampuran. Nilai dari index ini terletak pada rentang 0 hingga 1. Nilai 1 mengindikasikan pencampuran yang sempurna yang berarti tidak terdapat gradien konsentrasi pada sebuah area. Nilai ini diinginkan di dalam desain SCR. Nilai 0 berarti masa satu senyawa yang terdapat pada area yang sangat kecil. Persamaan untuk penghitungan index pencampuran, Γ , diberikan sebagai berikut:

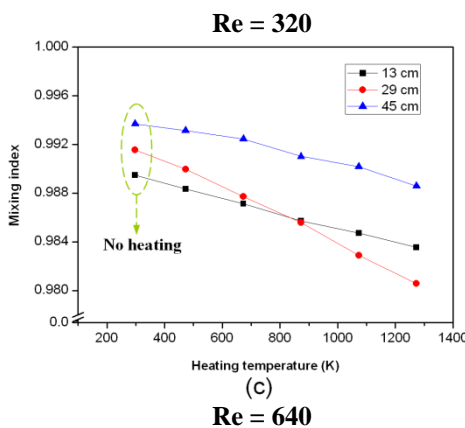
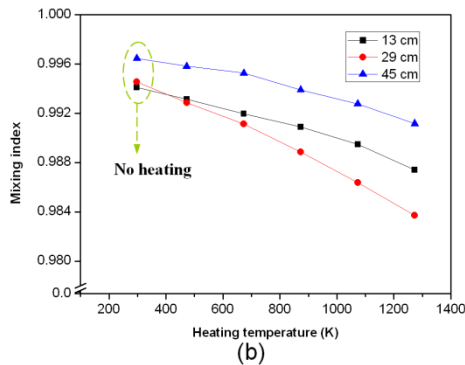
$$\Gamma = 1.0 - \frac{\int_{A_0} |C - C_0| dA}{2A_0 C_0} \quad (11)$$

dimana $C_0 = \frac{\int C dA}{A_0}$ C adalah fraksi masa ammonia melalui penampang A . A adalah luas penampang dimana konsentrasi senyawa terdapat dan A_0 adalah luas penampang total yang dilalui oleh semua senyawa.

Gambar 7 menunjukkan efek pemanasan terhadap index pencampuran dari konsentrasi masa ammonia di dalam SCR catalytic filter pada lokasi yang berbeda untuk $Re = 320$ dan 640. Dalam kasus ini, sumbu absis menyatakan temperatur pemanasan. Index pencampuran dihitung sepanjang SCR catalytic filter pada lokasi 13, 29 dan 45 cm diatas dinding dasar.

Pada $Re = 320$, index pencampuran pada lokasi yang berbeda menurun dengan kenaikan temperatur pemanasan seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 7(a). Index pencampuran pada $Re = 320$ menurun tajam karena sirkulasi aliran yang kuat yang menyebabkan pembatasan transport masa ammonia dari inti ke bagian luar sirkulasi. Index pencampuran yang tinggi didapatkan dalam kasus tanpa pemanasan karena sirkulasi mejnadi lebih kuat dengan adanya pemanasan yang berakibat pada penghambatan transport masa ammonia dan akhirnya menyebabkan index pencampuran menurun.

Dengan membandingkan Gambar 7(a) dan (b), kecenderungan yang serupa dari index pencampuran pada $Re = 320$ diperoleh pada $Re = 640$ Index pencampuran pada lokasi berbeda menurun dengan kenaikan temperatur pemanasan. Index pencampuran pada $Re = 640$ menurun lebih tajam daripada index pencampuran pada at $Re = 320$. Hal ini disebabkan oleh sirkulasi aliran yang lebih kuat pada $Re = 640$ daripada pada $Re = 320$ yang berakibat pada penghambatan transport masa ammonia dari inti ke bagian luar sirkulasi. Index pencampuran yang tinggi diperoleh dalam kasus tanpa pemanasan.



Gambar 7. Efek pemanasan pada index pencampuran dari konsentrasi masa ammonia di dalam SCR catalytic filter pada lokasi yang berbeda untuk aliran laminar: (a) $Re = 320$ dan (b) $Re = 640$.

KESIMPULAN

Efek pemanasan pada karakteristik distribusi masa ammonia di dalam SCR catalytic filter telah dilakukan melalui simulasi numeric. Di dapatkan kesesuaian antara teori, hasil simulasi saat ini dan eksperimen untuk penghitungan faktor gesekan pada pipa keluar dari SCR catalytic filter.

Sirkulasi aliran teramati di dalam SCR catalytic filter. Sirkulasi utama diperoleh setelah aliran gas menumbuk dinding. Struktur aliran dipengaruhi oleh pemanasan.

Index pecampuran di dalam SCR catalytic filter menurun dengan kenaikan temperatur pemanasan. Index pencampuran pada $Re = 640$ menurun lebih tajam dibandingkan dengan pada $Re = 320$.

REFERENSI

1. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw Hill Company, USA, 1988.
2. S. T. Holgate, J. M. Samet, H. S. Koren and R. L. Maynard, "Air Pollution and Health," Academic Press, USA, 1999.
3. E. Sher, "Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines Pollutant Formation and Control," Academic Press, New York, 1998.
4. A. Faiz, C. S. Weaver and M. P. Walsh, "Air Pollution from Motor Vehicle," The International Bank, USA, 1996.
5. Kim, Y. A. (2007). The Effect of MnO₂ Addition on The V₂O₅/TiO₂ Catalytic Filters for NO Reduction. Master Thesis Gyeongsang National University, Korea.
6. Myung-whan Bae and Syaiful, "Numerical Simulation on Effect of Heating Temperature upon the Gaseous Flow in a SCR Catalytic Filter Device," SAE International, 2009-01-2628, 2009.
7. Syaiful, M. W. Bae and Kichang Im, "Three Dimensional CFD Simulation of Gaseous Flow in SCR Catalytic Filter Device," Proceedings of the 3rd International Symposium on Mechanic, Aerospace and Informatics Engineering (ISMAI-03 2009), pp. 96-102, Japan, 2009.
8. Myung-whan Bae, Syaiful and Yoshihiro Mochimaru, "A Study on Numerical Simulation of Gaseous Flow in SCR Catalytic Filter of Diesel Exhaust Gas Aftertreatment Device", Journal of Korean Society of Marine Engineering, Vol.34, No.3, pp.360-367, 2010.
9. Syaiful and M. W. Bae, "Numerical Simulation of Heat Input Effect on Laminar Gaseous Flow in SCR Catalytic Filter System," The 4th International Symposium on Mechanic, Aerospace and Informatics Engineering (ISMAI-04 2009), pp. 55-60, Changwon, Korea, 2009.
10. Han, Y. W., Bae, M.W., Choi, J. H. and Kim, J. H. . Development of a Combined Urea-SCR Catalytic Filter System for Simultaneous of Soot and NO_x Emissions in Diesel Engines. KSAE Annual Conference, Korea, 2008
11. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E. . The Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill. New York., 1997
12. Patankan, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, USA., 1980.