

การออกแบบและพัฒนาระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ Design and Development of Synthetic Exhaust Gas Generating System

กิตติพงศ์ คงศรี, วรเทพ วชิรพันธุ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ผู้ติดต่อ: E-mail: kittipong.ksi@gmail.com, โทรศัพท์: 02 942 8555 ต่อ 1839

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ (Synthetic exhaust gas) เพื่อจำลององค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic converter) เช่น อุณหภูมิ, อัตราการไหล, องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย เป็นต้น เพื่อให้เอื้อต่อการสร้างขอบเขตการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถจำลององค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแต่ละ Species และควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียได้ โดยมีอัตราการไหลเหมือนกับไอเสียในรถยนต์

คำหลัก: ก๊าซไอเสียสังเคราะห์, เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ระบบบำบัดไอเสีย

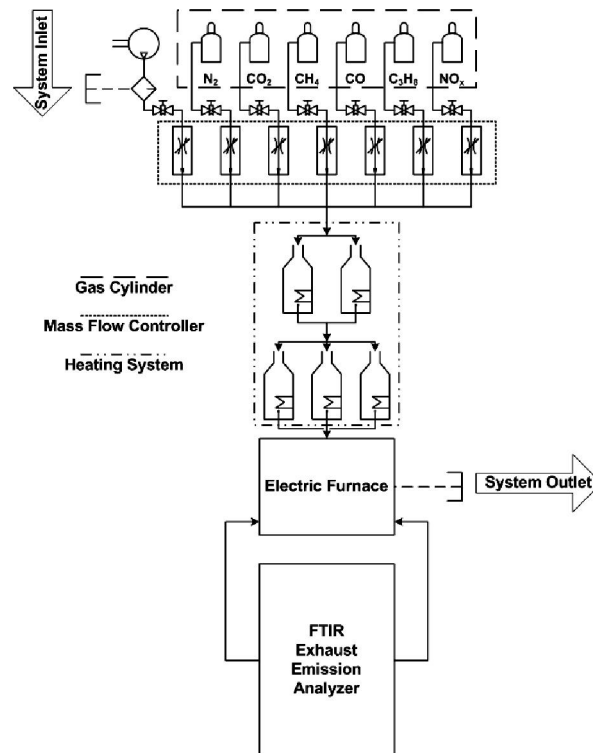
Abstract

This paper describes the design and development of the synthetic exhaust gas generating system which is aimed to mimic the exhaust gas compositions emitted from internal combustion engines. This system was capable to control various factors which affect the performance of a catalytic converter, such as temperature, flow rate and exhaust gas compositions etc. in order to accommodate the operating maps of a catalytic converter. The synthetic exhaust gas generating system can mimic exhaust gas composition emitted from engine effectively. Species concentrations and temperature of the exhaust gas are fully controlled as well as the exhaust flow rate.

Keywords: Synthetic exhaust gas, Catalytic converter, Aftertreatment system

1. บทนำ

ก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์นั้น ประกอบด้วย ก๊าซหลากหลายชนิดที่จะก่อให้เกิดหรือเพิ่มมลพิษทางอากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC), และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นต้น เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic converter) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยกำจัดหรือลดมลพิษที่เกิดขึ้น ปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาาระบบบำบัดไอเสีย (Aftertreatment) ของเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล รวมถึงเครื่องยนต์ที่มีกระบวนการเผาไหม้แบบใหม่ ๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ในการลดมลพิษไอเสียเพื่อให้อยู่ในระดับที่กฎหมายกำหนดก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ แต่การควบคุมปริมาณขององค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์โดยเฉพาะเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้แบบใหม่ ให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น เป็นไปได้ยาก เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น ชนิดของเครื่องยนต์, ชนิดของเชื้อเพลิง, สภาพการทำงานของเครื่องยนต์, คุณลักษณะของก๊าซไอเสีย เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและพัฒนา ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ขึ้น เพื่อจำลององค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่ สามารถใช้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในรถยนต์จริงได้ และสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เพื่อทำให้ง่ายต่อการกำหนดและจำลองเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการทำงานจริงในรถยนต์ ซึ่งแตกต่างจากระบบที่เคยมีในอดีตที่มีขนาดเล็ก [1-5] และไม่สามารถจำลองเงื่อนไขการทำงานให้เหมือนกับการทำงานจริงในรถยนต์ได้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์

2. ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์

ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 1). ระบบท่อ 2). ฮีตเตอร์ขนาด 10 kW และ 30 kW 3). เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) 4). Pressure transducer 5). เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) 6). Dosing pump 7). เตาอบ (Furnace) 8). ถังก๊าซ (Gas cylinder) โดยระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์นี้จะใช้อากาศอัดที่มีในห้องทดสอบนำมาผสมกับไนโตรเจน (N₂) ที่บรรจุในถังซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซไอเสีย จากนั้นจึงนำก๊าซอื่น ๆ เช่น โพรเพน (C₃H₈), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และมีเทน (CH₄) เป็นต้น ซึ่งถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตราการไหล และ Dosing pump จะทำหน้าที่ฉีดน้ำ (H₂O) เข้าสู่ระบบท่อ แล้วจึงป้อนเข้าสู่ระบบท่อเพื่อสร้างเป็นก๊าซไอเสีย โดยก๊าซไอเสียสังเคราะห์ที่ได้จะถูกควบคุมอุณหภูมิโดยฮีตเตอร์ จากนั้นจะไหลเข้าสู่เครื่องฟอก

ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ควบคุมอุณหภูมิภายนอกด้วยเตาอบ

2.1 การติดตั้งแผ่นกันสำหรับปรับทิศทางการไหล (Baffle) ของก๊าซไอเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าฮีตเตอร์

การกระจายตัวของการไหล (Flow distribution) ของก๊าซไอเสียก่อนเข้าฮีตเตอร์นั้นต้องมีลักษณะสม่ำเสมอ ถ้าหากมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอหรือไม่มีการกระจายตัวเข้าไปในฮีตเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเลย ก็ส่งผลเสียให้กับฮีตเตอร์ตัวดังกล่าว ขดลวดความร้อนของฮีตเตอร์ตัวนั้นก็ทำงานหนักเกินไปและจะขาดในที่สุด ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการทำงานของแผ่นกันสำหรับปรับทิศทางการไหลซึ่งมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมขนาด 2 นิ้ว หนา 10 มิลลิเมตร โดยจะยึดติดอยู่กับแกนในตำแหน่งที่ปิดการไหลครึ่งบน หรือครึ่งล่างของระบบท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2 แผ่นกันนี้จะทำหน้าที่ช่วยให้การกระจายตัวของการไหลในแต่ละท่อทางเข้าของฮีตเตอร์ดังรูปที่ 3 ดีขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และยืดอายุการใช้งานของฮีตเตอร์ได้อีกด้วย



รูปที่ 2 แผ่นกันสำหรับปรับทิศทางการไหล

โปรแกรม Fluent 6.2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้หลักการคำนวณด้วยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method) ได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองลักษณะการไหลของก๊าซไอเสียก่อนและหลังการติดตั้งแผ่นกันสำหรับปรับทิศทางการไหล ซึ่งในแบบจำลองจะใช้อากาศแทนก๊าซไอเสีย โดยมีการกำหนดรายละเอียด

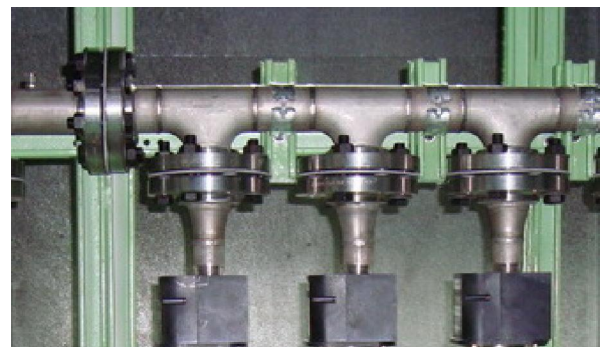
การตั้งค่าและการกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลองตามตารางที่ 1 และ 2 พบว่าหลังจากติดตั้งแผ่นกันเข้าไปในระบบท่อแล้ว ก๊าซไอเสียมีการกระจายตัวไหลเข้าฮีตเตอร์ได้ดีขึ้น และมีลักษณะการกระจายการไหลแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4 และ 5 จากนั้นได้นำระนาบพื้นผิว (Surface plane) บริเวณท่อทางเข้าของฮีตเตอร์ทั้งกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งแผ่นกันสำหรับปรับทิศทางการไหลไปคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรม Fluent 6.2 ด้วยวิธี Surface integrals แบบ Area-weighted average พบว่าในกรณีที่ติดตั้งแผ่นกันจะมีความเร็วเฉลี่ยในแต่ละท่อทางเข้าของฮีตเตอร์ตำแหน่งที่ 2 และ 3 (จากซ้ายไปขวา) ใกล้เคียงกันดังแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 1 การตั้งค่าแบบจำลอง

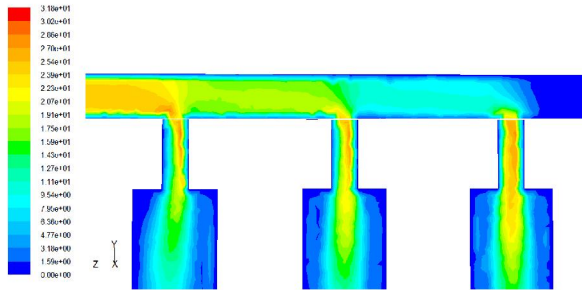
Input	
Type of mesh	Tetrahedral mesh
Number of mesh	~88,000
Inlet/Outlet	Velocity inlet/Outflow
Turbulence	k-epsilon standard

ตารางที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง

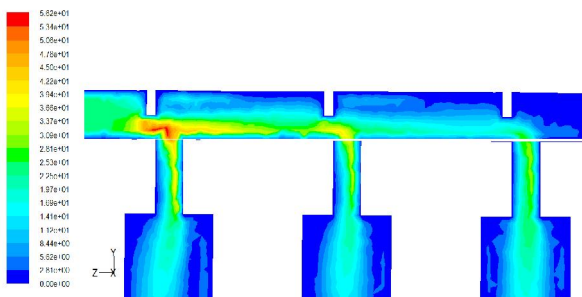
Boundary condition	
Velocity inlet (m/s)	23.8
Air temperature (K)	300
Wall temperature (K)	300
Operating pressure (Bar)	2



รูปที่ 3 ท่อทางเข้าของฮีตเตอร์ขนาด 30 kW



รูปที่ 4 แบบจำลองลักษณะการไหลก่อนติดตั้งแผ่นกัน



รูปที่ 5 แบบจำลองลักษณะการไหลหลังติดตั้งแผ่นกัน

ตารางที่ 3 ความเร็วเฉลี่ยในแต่ละท่อทางเข้าของฮีตเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธี Surface integrals แบบ Area-weighted average

ตำแหน่งท่อทางเข้า ของฮีตเตอร์ (ซ้ายไปขวา)	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)	
	กรณีไม่มี baffle	กรณีมี baffle
1	18.73	26.74
2	20.40	22.63
3	24.67	22.99

3. การประยุกต์ใช้ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์

3.1 การจำลองก๊าซไอเสียจากปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียที่ต้องการ

ก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์นั้นไม่สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียตามต้องการได้ จึงต้องอาศัยระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ในการจำลองปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสีย โดยใช้วิธีการคำนวณเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดที่ต้องการเป็นอัตราการไหล (Flow rate) ซึ่งถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตราการไหล

$$LPM_{Gas} = \left[\frac{PPM_{Gas}}{10^6} \right] \cdot \left[\frac{mol_{Gas}}{mol_{ExhGas}} \cdot \frac{MW_{Gas}}{MW_{ExhGas}} \right] \cdot \left[\frac{\dot{m}_{ExhGas}}{\rho_{Gas}} \right] \quad (1)$$

โดย LPM_{Gas} เป็นอัตราการไหลของก๊าซ, PPM_{Gas} เป็นปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ, mol_{Gas} เป็นจำนวนโมลของก๊าซ, mol_{ExhGas} เป็นจำนวนโมลของก๊าซไอเสีย, MW_{Gas} เป็นมวลโมเลกุลของก๊าซ, MW_{ExhGas} เป็นมวลโมเลกุลของก๊าซไอเสีย, $\dot{m}_{ExhGas}$ เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสีย และ ρ_{Gas} เป็นความหนาแน่นของก๊าซที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

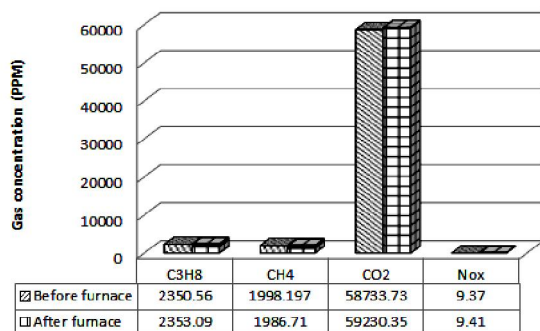
จากการจำลองสร้างก๊าซไอเสียโดยการทดสอบวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ใช้เทคนิควิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR (FTIR Exhaust emission analyzer) ซึ่งจะวัดที่ตำแหน่งหน้าและหลังเตาอบซึ่งมีท่อขนาด 2 นิ้ว ที่ใช้แทนเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำการทดสอบเป็นแบบร้อน (Hot test) ซึ่งมีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าเตาอบ 300 องศาเซลเซียส และแบบเย็น (Cold test) ซึ่งมีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าเตาอบ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะกำหนดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดตามต้องการและนำไปคำนวณหาอัตราการไหลที่เหมาะสมดังแสดงตามตารางที่ 4 พบว่าระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์นี้สามารถจำลองปริมาณความเข้มข้นก๊าซไอเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงตามรูปที่ 6 และ 7 โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแต่ละก๊าซไอเสียอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ดังแสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ปริมาณความเข้มข้นและอัตราการไหลขององค์ประกอบก๊าซไอเสีย

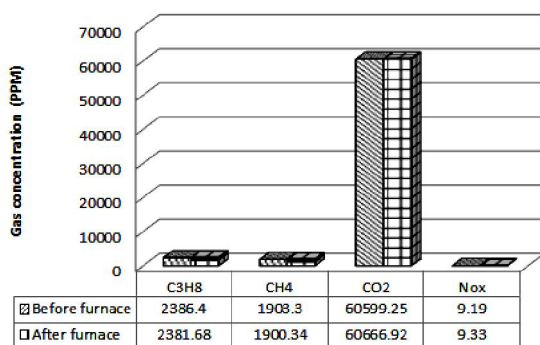
ก๊าซไอเสีย	ปริมาณความเข้มข้น (PPM)	อัตราการไหล (LPM)
C ₃ H ₈	2500	1.05
CH ₄	2000	0.84
CO ₂	60000	75
NO _x	10	2

ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสีย	เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน	
	แบบร้อน	แบบเย็น
C ₃ H ₈	5.28	4.64
CH ₄	2.64	4.91
CO ₂	0.32	-1.055
NO _x	6.75	7.4



รูปที่ 6 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียโดยวิธีการทดสอบแบบร้อน

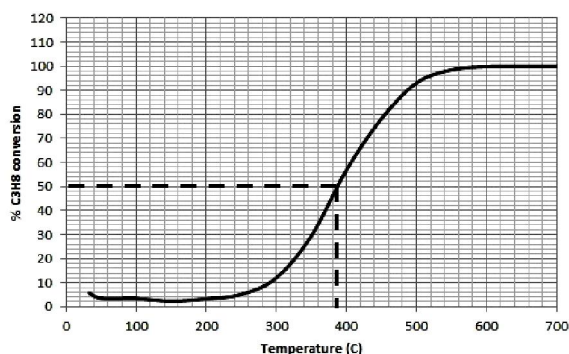


รูปที่ 7 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียโดยวิธีการทดสอบแบบเย็น

3.2 การทดสอบหา Light-off temperature สำหรับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

Light-off temperature คืออุณหภูมิที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถลดปริมาณมลพิษไอเสียได้ 50 เปอร์เซนต์ โดยเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์สามารถสร้างการทดสอบนี้ได้โดยการฉีดก๊าซไอเสียที่สนใจศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในการลดปริมาณมลพิษไอเสียเข้าไปในระบบ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิภายนอกของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยเตาอบ และทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียที่ตำแหน่งก่อนและหลังเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิทุกๆ 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้อัตราการลดปริมาณมลพิษไอเสีย 100 เปอร์เซนต์ และนำข้อมูลไปสร้างกราฟรูปตัวเอส (S-curve) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอเสียกับอุณหภูมิภายนอกของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟรูปตัวเอสแสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโพรเพน (C_3H_8) ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ติดตั้งมากับรถยนต์โตโยต้าชนิดเครื่องยนต์ 2KD-FTV

4. สรุป

ระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถจำลองปริมาณองค์ประกอบ อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซไอเสียได้เหมือนกับการทำงานจริงในรถยนต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่สามารถควบคุมได้กับการทำงานจริงบนเครื่องยนต์ ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายงานวิจัย เช่น การทดสอบหา Light-off temperature การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยและการอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และห้องทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jobson, E., Laurell, M., Högborg, E., Bernler, H., Lundgren, S., Wirmark, G. and Smedler, G. (1993). Deterioration of Three-Way Automotive Catalysts, Part I – Steady State and Transient Emission of Aged Catalyst, *SAE International* (930937).
- [2] Jobson, E., Smedler, G., Malmberg, P., Bernler, H., Hjortsberg, O., Gottberg, I. and

Rosén, Å. (1994). Nitrous Oxide Formation over Three-Way Catalyst, *SAE International* (940926).

[3] Choi, B., Son, G., Kim, E. and Lee, K. (1996). Effective Parameters on the Catalytic Reaction of NGV Catalytic Converter, *SAE International* (960239).

[4] Skoglundh, M., Thormählen, P., Fridell, E., Hajbolouri, F. and Jobson, E. (1999). Improved Light-off Performance by Using Transient Gas Compositions in the Catalytic Treatment of Car Exhausts, *Chemical Engineering Science*, vol. 54, pp. 4559 – 4566.

[5] Sumiya, S., Oyamada, H., Fujita, T., Nakamura, K., Osumi, K. and Tashiro, Y. (2009). Highly Robust Diesel Oxidation Catalyst for Dual Mode Combustion System, *SAE International* (2009-01-0280).