

## การลดปริมาณก๊าซมีเทนของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำ โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

### Methane Reduction from DDF Engines under Low Load Condition by Use of Electrical Heater Coupled to Catalytic Converter

ณัฐมี ไทยะพันธ์<sup>1\*</sup> และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: mepoo\_top@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-942-8555 ต่อ 1839

#### บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญในการลดมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) ทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical Heater) โดยได้ทำการออกแบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ติดตั้งอยู่ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ทดสอบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า DOC จากการทดสอบพบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียจาก 120°C จนถึง 450°C ได้ภายในเวลาไม่เกิน 4 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นจนถึงจุดที่ DOC สามารถทำการออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนได้ ก๊าซมีเทนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำจะลดลงได้ในระดับมากกว่า 99.0% ที่อุณหภูมิ 350°C

**คำหลัก:** ฮีตเตอร์ไฟฟ้า, เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

#### Abstract

This research focuses on reducing emissions from Diesel Dual Fuels engines (DDF) under low load conditions by using Diesel Oxidation Catalyst (DOC) coupling with electrical heater. The electrical heater is designed to install in the exhaust system of the tested engine to increase the temperature of exhaust before the DOC. The result shows that the electrical heater can raise the temperature of exhaust from 120°C to 450°C in less than 4 minutes. When increasing the temperature of exhaust to the point that DOC can be oxidized Methane, the conversion efficiency can be up to 99.0% at 350°C.

**Keywords:** Electrical Heater, Diesel Oxidation Catalyst (DOC), Diesel Dual Fuel engines (DDF).

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันที่ราคาน้ำมันดีเซลมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel Dual Fuel engines, DDF) ซึ่งเป็นการ

ใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างน้ำมันดีเซลกับก๊าซธรรมชาติ (CNG) โดยจะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงรองจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคมีภาระค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงเนื่องจาก

ราคาแก๊สธรรมชาติมีราคาที่ถูกกว่าน้ำมันดีเซลอยู่มาก หลักการทำงานคือ ระบบจะจ่ายแก๊สธรรมชาติผสมกับอากาศในท่อร่วมไอดี แก๊สธรรมชาติจะถูกอัดพร้อมกับอากาศเพื่อให้มีอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น จากนั้นเมื่อถึงจังหวะที่เหมาะสมน้ำมันดีเซลจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อจุดระเบิดและเริ่มต้นการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าเครื่องยนต์แก๊สธรรมชาติชนิดอื่นคือ จากการที่ยังคงเป็นเครื่องยนต์ที่ยังทำงานอยู่บนพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซลทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง เนื่องจากการตัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลทำเพียงแค่ติดตั้งระบบจ่ายแก๊สธรรมชาติเข้าไป โดยยังคงค่าอัตราส่วนการอัดเอาไว้เท่าเดิม และเมื่อแก๊สธรรมชาติหมดไม่สามารถหาสถานีเติมได้ก็สามารถเปลี่ยนกลับไปใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวได้ตามปกติ

จากผลการศึกษาต่างๆพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมักประสบปัญหาทางด้านประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และทางด้านมลพิษ โดยพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณเขม่า (Soot) และไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ลดลงแต่มีคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล [1] โดยเฉพาะในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาขณะนั้นจะมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากและปริมาณแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่ง  $\text{CH}_4$  นี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดสถานะโลกร้อนและการลดปริมาณ  $\text{CH}_4$  โดยใช้เทคนิคต่างๆ ในกระบวนการเผาไหม้มีความซับซ้อนมากโดยเฉพาะในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำ แม้ว่าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) จะถูกนำมาใช้ในการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะเคลือบสารพาลาเดียม (Pd) และแพลตตินัม (Pt) ซึ่งเป็นโลหะที่เหมาะสมกับการใส่ในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการออกซิเดชัน  $\text{CH}_4$  [2, 3] โดยจะมีปริมาณ Pd ใน

สัดส่วนที่สูงกว่าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไป แต่การออกซิไดซ์  $\text{CH}_4$  ด้วยสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่อไอเสียมีอุณหภูมิสูง (ประมาณ  $400^\circ\text{C}$ ) [2] ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิไอเสียปกติจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

Light-off temperature (LT) คือ จุดอุณหภูมิการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถลดปริมาณแก๊สพิษลงได้ 50% เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการประเมินประสิทธิภาพของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์มันจะแสดงจุดของอุณหภูมิที่ทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำงานในการเริ่มลดมลพิษ

Fast Light-off Temperature (FLT) คือ วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามารถเข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้เร็วยิ่งขึ้น โดยเทคนิค FLT ในปัจจุบันนั้นมีอยู่มากมายหลายเทคนิค แต่เทคนิคที่แพร่หลายในปัจจุบันคือการนำฮีทเตอร์ไฟฟ้า (Electrical heater) มาใช้คู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ดียิ่งขึ้นในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซลทำให้มลพิษที่ออกมานั้นลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว โดยการนำฮีทเตอร์ไฟฟ้ามาใช้กับเครื่องยนต์เบนซินนั้นจะเป็นการลดปัญหาในช่วง Cold start (ช่วงระยะเวลาประมาณ 1-2 นาทีแรกของการสตาร์ทเครื่องยนต์) ของเครื่องยนต์เบนซินเนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่ไอเสียมีอุณหภูมิต่ำทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ยังไม่สามารถเริ่มการออกซิเดชัน HC และ CO ที่ออกมาเป็นจำนวนมากได้ การใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเพื่อยกอุณหภูมิของไอเสียทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้เร็วขึ้นจะสามารถแก้ปัญหาจุดนี้ไปได้ [4-8] ส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลจะใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับ Diesel Particulate Filters (DPF) เพื่อเพิ่มความร้อนให้กับ DPF เพื่อช่วยในการเผาเขม่า (Soot) ที่ติดอยู่ใน DPF ให้หมดไปเนื่องจากในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำไอเสียที่ออกมาจะมีอุณหภูมิต่ำทำ

ให้ Soot ไม่ถึงจุดที่ Regenerate ตัวของมันเองได้ [9, 10]

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ออกมาเป็นปริมาณมากในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำโดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจุดเด่นที่ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเหมาะต่อการมาใช้คู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์คือ อุปกรณ์มีราคาที่ไม่สูงมาก การใช้งานไม่ยุ่งยาก ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย และสามารถยกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้นได้อย่างรวดเร็วจึงเหมาะต่อการออกซิไดซ์ CH<sub>4</sub> ที่ต้องการอุณหภูมิในการออกซิไดซ์ที่มากกว่า 400 °C [2]

## 2. การติดตั้งอุปกรณ์

### 2.1 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล TOYOTA 2KD-FTV ขนาด 2.5 ลิตร 4 สูบ 4 จังหวะ เทอร์โบชาร์จเจอร์จัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติแบบหัวฉีด ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์จะแสดงไว้ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

รายการ	รายละเอียด
ชนิดเครื่องยนต์	2KD-FTV
จำนวนกระบอกสูบและการจัดวาง	4 สูบ แถวเรียง
กลไกวาล์ว	DOHC 16 วาล์ว
ห้องเผาไหม้	แบบการฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง
ระบบเชื้อเพลิง	แบบคอมมอนเรล
ปริมาตรกระบอกสูบ	2,494 cc
กระบอกสูบ x ช่วงชัก	92.0 x 93.8 mm
อัตราส่วนกำลังอัด	18.5 : 1
กำลังสูงสุด	75 kW ที่ 3,600 rpm
แรงบิดสูงสุด	200 NM ที่ 1,400~3,200 rpm

### 2.2 แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ในการศึกษานี้ระบบ Aftertreatment จะประกอบไปด้วยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

(Diesel Oxidation Catalyst, DOC) จำนวนสองลูก ตำแหน่งติดตั้งจะแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ซึ่งแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองลูกนี้ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานแยกกัน แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกแรกหรือเรียกว่า “Pre-cat” เป็นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องยนต์ 2KD-FTV แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกนี้จะเคลือบแต่ Pt เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียวมีหน้าที่ลดมลพิษจำพวก HC และ CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์และเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียผ่านทางปฏิกิริยาออกซิเดชันของ HC ส่วนแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกที่สองหรือเรียกว่า “Main-cat” ภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกนี้จะเคลือบ Pt และ Pd เป็นสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ในการลด CH<sub>4</sub> โดยรายละเอียดของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองลูกจะแสดงไว้ดังตารางที่ 2

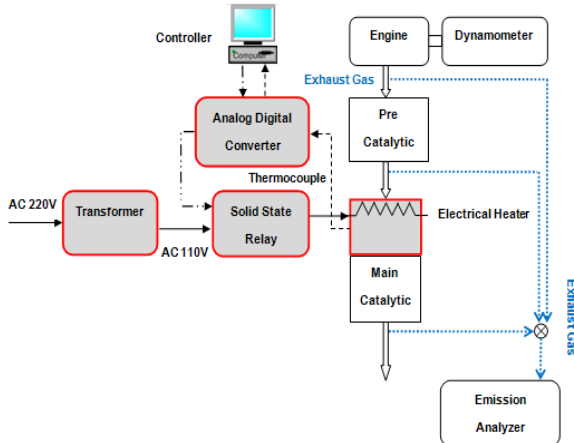
ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

Parameter Designation	1 <sup>st</sup> DOC (Pre-cat)	2 <sup>nd</sup> DOC (Main-cat)
Cell Per Square Inch	400	400
Cell Shape	Square	Square
Volume (L)	1.96	2 x 1.70
Pt : Pd	1:0	1:5
Precious Group Metal (g/ft <sup>3</sup> )	14	165

### 2.3 ฮีทเตอร์ไฟฟ้า

ระบบฮีทเตอร์ไฟฟ้านำมาติดคู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์นั้นจะถูกควบคุมการทำงานโดยตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) บนโปรแกรม NI LabVIEW โดยนำอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังออกจากฮีทเตอร์ไฟฟ้ามาผ่านตัวควบคุมข้างต้นเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3 ซึ่งฮีทเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นชนิดเส้นตรงนำมาตัดเป็นขดวงกลมเพื่อให้เหมาะสมกับการวางบริเวณหน้า Main-cat มีกำลังไฟฟ้าขนาด 3 kW ใช้แรงดันไฟฟ้า 110 V โดยติดตั้งชุดหม้อแปลงไฟฟ้า

(Transformer) แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 110 V เพื่อให้เหมาะสมต่อการทำงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้า หลังจากผ่านการแปลงไฟแล้วจะมีตัว Solid State Relay เป็นอุปกรณ์เปิดปิดกระแสไฟฟ้าก่อนเข้าฮีทเตอร์ไฟฟ้าโดยนำสัญญาณการเปิดปิดมาจากโปรแกรม NI LabVIEW โดยที่ตำแหน่งการติดตั้งจะแสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์

### 3. การทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3 ซึ่งอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์จะอยู่ที่ประมาณ 150 °C เมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะ Steady-state หลังจากผ่าน Pre-cat อุณหภูมิไอเสียบริเวณหน้า Main-cat จะลดลงอยู่ที่ประมาณ 120 °C ในการทดลองจะมีการปรับให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Main Catalytic Converter แตกต่างกันว่าที่ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C โดยทำการทดลองให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 15 นาที ส่วนทางด้าน Lambda นั้นโดยปกติในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม Lambda ที่เหมาะสมในการใช้งานจะอยู่ที่ประมาณ 1.0-2.0 แต่จากการศึกษาของ Noipheng et al. [11] พบว่าการลด Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (โดยใช้พื้นฐานเครื่องยนต์ดีเซล TOYOTA 2KD-FTV มาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม) ให้ต่ำลงเหลือประมาณ 1.3 จะทำให้การเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์โดยใช้วิธี Raw Fuel Injection มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH<sub>4</sub>

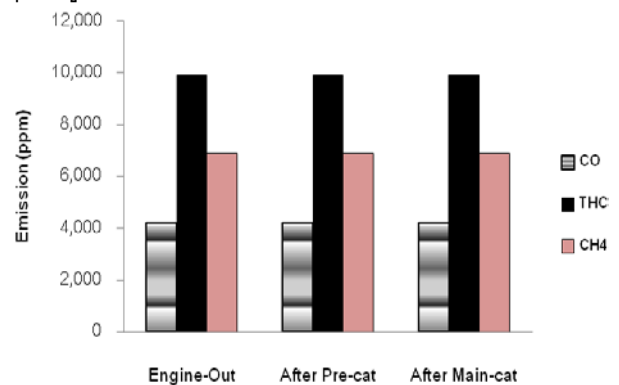
ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมากกว่า Lambda 1.7 และ 2.1 ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ Lambda 1.3 เป็นพื้นฐานในการใช้งานและด้านการจ่ายเชื้อเพลิงนั้น สามารถควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mototune ให้มีอัตราส่วนระหว่างการจ่ายก๊าซธรรมชาติ (CNG) ต่อน้ำมันดีเซลอยู่ที่ 70:30 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Case	Engine Speed (rpm)	Lambda	Energy Ratio (%)	Exhaust Temp. (°C)	Electrical Heater Temp. (°C)
1	1,300	1.3	70	150	300
2	1,300	1.3	70	150	350
3	1,300	1.3	70	150	400
4	1,300	1.3	70	150	450

### 4. ผลการทดลอง

ในรูปที่ 2 จะแสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันโดยไม่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

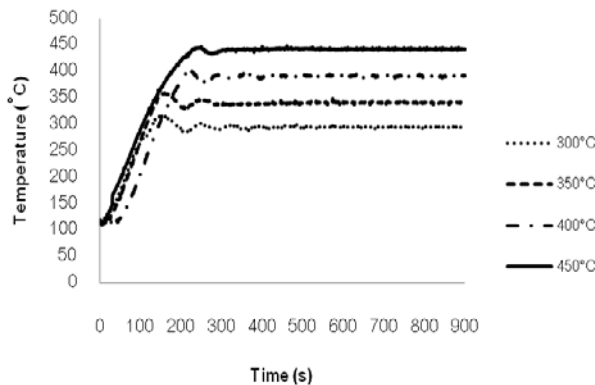


รูปที่ 2 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

จากรูปจะแสดงให้เห็นว่า Pre-cat และ Main-cat ไม่สามารถทำการออกซิไดซ์สารพิษชนิดใดที่ออกมาจากเครื่องยนต์ได้เลยเนื่องมาจากว่าในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นมีอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาเครื่องยนต์ต่ำมาก (ประมาณ 150 °C) ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ Pre-cat และ Main-cat จะสามารถเริ่มทำปฏิกิริยา

ออกซิไดซ์ในการลดสารพิษลงได้ แสดงให้เห็นว่า Pre-cat และ Main-cat ต้องการอุณหภูมิของไอเสียในการออกซิไดซ์มลพิษมากกว่า 150 °C ขึ้นไปจึงสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์มลพิษได้

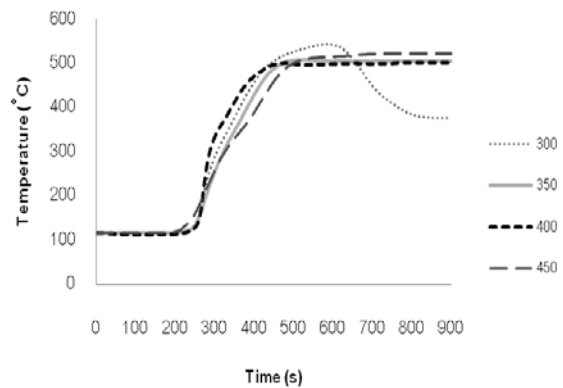
รูปที่ 3 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพให้การยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ของฮีทเตอร์ไฟฟ้าพบว่า การที่จะทำให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิจาก 120 °C จนถึงอุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C จะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 2 นาที, 2.30 นาที, 3.30 นาที และ 4 นาที ตามลำดับ จากการทดลองเปิดใช้งานฮีทเตอร์ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 15 นาที



รูปที่ 3 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้า

พบว่าหลังจากมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ส่งผลให้อุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก Main-cat สูงขึ้นตามรูปที่ 4 เนื่องจาก HC เกิดการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาภายใน Main-cat โดยการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C และ 450 °C สามารถทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก Main-cat มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 500 °C ซึ่งอุณหภูมิที่สูงดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้  $\text{CH}_4$  เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาใน Main-cat ซึ่งสามารถออกซิไดซ์  $\text{CH}_4$  ได้เกือบหมดดังรูปที่ 5 (ก) และสอดคล้องกับ  $\text{CH}_4$  ต้องการอุณหภูมิในการออกซิไดซ์ที่มากกว่า 400 °C [2] ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่อุณหภูมิ 300 °C จะพบพฤติกรรมที่ฮีทเตอร์ไฟฟ้าสามารถเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียได้ในช่วงแรกแต่ก็ไม่สามารถเลี้ยงอุณหภูมิของไอเสียให้คงที่ได้ทำให้

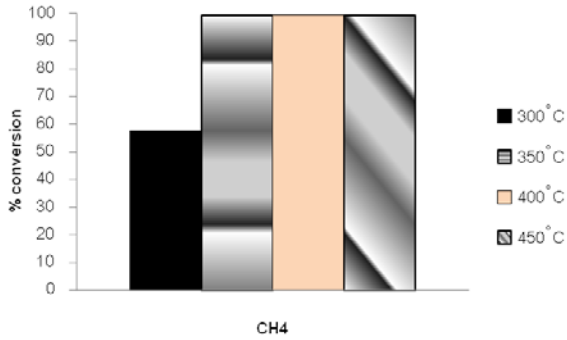
อุณหภูมิของไอเสียตกเหลืออยู่ที่ประมาณ 380 °C ซึ่งสามารถทำการออกซิไดซ์  $\text{CH}_4$  ได้ประมาณ 58% ตามรูปที่ 5 (ก) ซึ่งในส่วนนี้จะดำเนินการศึกษาในลำดับต่อไปในอนาคต



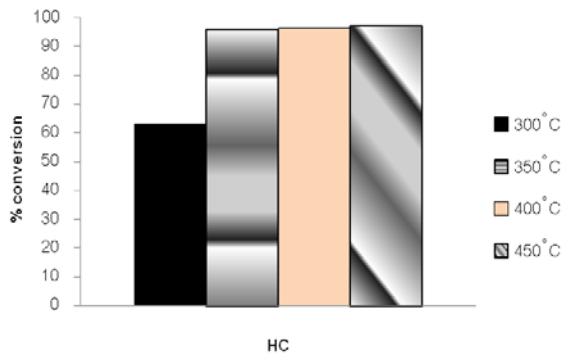
รูปที่ 4 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจาก Main-cat ภายหลังจากการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า

เมื่อมีการใช้งานฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ให้เพิ่มขึ้นพบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก Main-cat ลดลง โดยการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C สามารถลดปริมาณ  $\text{CH}_4$  ลงได้ 58%, 99%, 99% และ 99% ตามลำดับดังรูปที่ 5 (ก) ส่วน HC สามารถลดลงได้ 63%, 96%, 96% และ 97% ตามลำดับดังรูปที่ 5 (ข) และสามารถลด CO ลงได้ 98%, 99%, 99% และ 99% ตามลำดับดังรูปที่ 5 (ค) จะสังเกตเห็นว่าการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียตั้งแต่ 350 °C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษของอุปกรณ์ลดไอเสียมีมากกว่า 95% ขึ้นไป

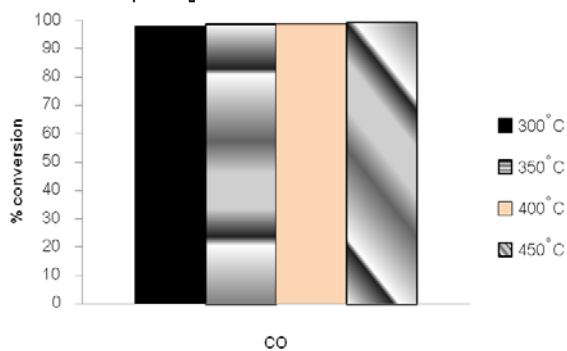
เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Main-cat จนถึงจุดอุณหภูมิที่เหมาะสมสารเร่งปฏิกิริยาใน Main-cat ทำงานจะเกิดการออกซิเดชันกับมลพิษทำให้มลพิษที่ผ่าน Main-cat ลดลง แต่ที่ Pre-cat ไม่สามารถทำการลดมลพิษชนิดใดได้เลยเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมา มีอุณหภูมิประมาณ 150 °C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิที่ต่ำเกินกว่าจะทำให้สารเร่งปฏิกิริยาใน Pre-cat ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันลดมลพิษลงได้ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 5 (ก) แสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ของ Main-cat เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า ช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า Main-cat ที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 5 (ข) แสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณ HC ของ Main-cat เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า ช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า Main-cat ที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 5 (ค) แสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CO ของ Main-cat เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า ช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า Main-cat ที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน

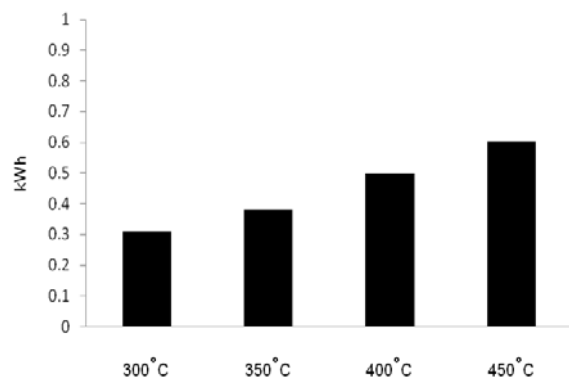
จากรูปที่ 5 (ค) สังเกตได้ว่าการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า ยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิ 300 °C นั้นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามารถลดปริมาณ CO ลงได้มากกว่า 98% ทั้งนี้สืบเนื่องจากการที่ CO มีค่า LT อยู่

ในช่วงอุณหภูมิ 200-250 °C (โดยค่า LT ที่แตกต่างกัน ของมลพิษแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> เป็นต้น) [12-14] และในสถานการณ์ทดลองนี้ได้ ออกแบบให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียเริ่มต้นที่ 300 °C ซึ่งเกินจุด LT ของ CO ไปแล้ว ในขณะที่การลดปริมาณของ HC และ CH<sub>4</sub> ทำได้เพียงประมาณ 60% ที่อุณหภูมิ 300 °C เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ รูปที่ 5 (ข) การศึกษาเรื่องการหาช่วงอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมของฮีทเตอร์ไฟฟ้าเพื่อลดมลพิษ HC และ CH<sub>4</sub> จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จะดำเนินการศึกษาในลำดับต่อไปในอนาคต

ด้านการหาปริมาณการใช้พลังงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ตามวิธีการของ Kaiser et al. [15] ดังสมการที่ 1

$$\text{Electrical energy consumption} = W(\text{kW}) \times t(\text{h}) \quad (1)$$

โดยที่ W เป็นกำลังไฟฟ้าของตัวฮีทเตอร์ (kW) และ t เป็นระยะเวลาที่ใช้งานฮีทเตอร์ไฟฟ้า (ชั่วโมง) จากการคำนวณจะได้ผลดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีความต้องการใช้ฮีทเตอร์ในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่สูงขึ้นความต้องการพลังงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C จะมีปริมาณการใช้พลังงานที่ 0.310 kWh, 0.382 kWh, 0.501 kWh และ 0.605 kWh ตามลำดับ



รูปที่ 6 แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

## 5. สรุป

ในการศึกษานี้ คณะผู้จัดทำได้ประสบความสำเร็จในการลดปริมาณ  $\text{CH}_4$ , HC และ CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาวะการทำงานต่ำของเครื่องยนต์โดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ติดตั้งเข้าไปในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

- ฮีทเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้คือใช้เวลาไม่เกิน 4 นาที ในการยกอุณหภูมิจาก  $120^\circ\text{C}$  จนถึง  $450^\circ\text{C}$
- ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ  $\text{CH}_4$  สูงถึง 99% เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่  $350^\circ\text{C}$
- ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ HC สูงถึง 99% เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่  $350^\circ\text{C}$
- ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CO สูงถึง 98% เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Main-cat ที่  $300^\circ\text{C}$
- การให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียให้สูงมากขึ้นความต้องการพลังงานของฮีทเตอร์ก็จะมากขึ้นตาม โดยที่การยกอุณหภูมิไอเสียที่  $300^\circ\text{C}$  ฮีทเตอร์มีความต้องการพลังงานต่ำสุดที่ 0.310 kWh ส่วนการยกอุณหภูมิไอเสียที่  $450^\circ\text{C}$  ฮีทเตอร์มีความต้องการพลังงานสูงสุดที่ 0.605 kWh
- จุดอุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$  เป็นจุดอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า Main-cat เป็นจุดที่มีประสิทธิภาพในการช่วยให้ Main-cat เข้าสู่จุดการทำงานในการลดมลพิษได้เร็วขึ้นและมีความต้องการพลังงานที่ต่ำ

ในการศึกษาในลำดับต่อไปจะศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของรอบการทำงานเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่แตกต่างกัน (Engine speed), ผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิของไอเสียที่แตกต่างกัน (Exhaust Temperature), ผลกระทบของอัตราการไหลเชิงมวลที่แตกต่างกัน (Mass flow rate) และ

ผลกระทบที่เกิดจากปริมาณก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกัน ( $\lambda$ ) ก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อหาขอบเขตการทำงานที่เหมาะสมต่อฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการช่วยลดปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อแหล่งทุนสนับสนุนและสถานที่ทำการวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bahr, O., G.A., Karim. and B., Liu. (1999). An examination of the flame spread limits in a dual fuel engine, *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, pp. 1071-1080.
- [2] Moallemi, F., Batley, G., Dupont, V., Foster, T.J., Pourkashanian, M. and Williams, A. (1999). Chemical modelling and measurements of the catalytic combustion of  $\text{CH}_4/\text{air}$  mixtures on platinum and palladium catalysts, *Catalysis Today*, vol. 47, pp. 235-244.
- [3] Lapisardi, G., Urfels, L., Gélin, P., Primet, M., Kaddouri, A., Garbowski, E., Toppi, S. and Tena, E. (2006). Superior catalytic behaviour of Pt-doped Pd catalysts in the complete oxidation of methane at low temperature, *Catalysis Today*, vol. 117, pp. 564-568
- [4] Laing, Paul M. (1994). Development of an Alternator-Powered Electrically-Heated Catalyst System, *SAE Technical Paper*, No. 941042.
- [5] Hanel, Franz-Josef., Otto, Erhard. and Brück, Rolf. (1996). Electrically Heated Catalytic Converter (EHC) in the BMW ALPINA B12 5.7 Switch-Tronic, *SAE Technical Paper*, No. 960349.
- [6] Hanel, Franz-Josef., Otto, Erhard., Brück, Rolf., Nagel, T. and Bergau, N. (1997). Practical Experience with the EHC System in the BMW ALPINA B12, *SAE Technical Paper*, No. 970263.

- [7] Shimasaki, Yuichi., Kato, Hiroaki., Muramatsu, Hiroaki., Teshirogi, Tetsu., Aoki, Takuya., Saito, Akihisa. and Rodrigues, Greg. (1996). Study on Conformity Technology with ULEV Using EHC System, *SAE Technical Paper*, No. 960342.
- [8] Yaegashi, Takehisa., Yoshizaki, Kouji., Nagami, Tetuo., Sugiura, Shigeki., Yoshinaga, Tohru. and Ohsawa, Katsuyuki. (1994). New Technology for Reducing the Power Consumption of Electrically Heated Catalysts, *SAE Technical Paper*, No. 940464.
- [9] RANALLI, M., ZELENKA, Paul., SCHMIDT, Stefan. and ELFINGER, Gerhard. (2001). An Active Regeneration Aid as a Key Element for Safe Particulate Trap Use, *SAE Technical Paper*, No. 2001-01-062.
- [10] Wagner, Uwe., Velji, Amin. and Spicher, Ulrich. (2005). Development and Testing of a Diesel Particulate Filter with an Electrical Regeneration Starting Module, *SAE Technical Paper*, No. 2005-01-3703.
- [11] Noipheng, Anirut., Waitayapat, Napumee., Aroonsrisopon, Tanet., Wirojsakunchai, Ekathai., Thummadetsak, Thummarat and Wannatong, Krisada. (2011). Experimental Investigation of Applying Raw Fuel Injection Technique for Reducing Methane in Aftertreatment of Diesel Dual Fuel Engines Operating under Medium Load Conditions, *SAE Technical Paper*, No. 2011-01-2093.
- [12] Knafel, Alexander., Busch, Stephen B., Han Manbae., Bohac, Stanislav V., Assanis, Dennis N., Szymkowitz, Patrick G. and Blint, Richard D. (2006). Characterizing Light-Off Behavior and Species-Resolved Conversion Efficiencies during In Situ Diesel Oxidation Catalyst Degreening, *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-0209.
- [13] Sumiya, Satoshi., Oyamada, Hanako., Fujita, Tetsuya., Nakamura, Keisuke., Osumi, Kazuo. and Tashiro, Yoshihisa. (2009). Highly Robust Diesel Oxidation Catalyst for Dual Mode Combustion System, *SAE Technical Paper*, No. 2009-01-0280.
- [14] Watanabe, Tetsuya., Kawashima, Kazuhito., Tagawa, Yoshio., Tashiro, Keisuke., Anoda, Hiroshi., Ichioka, Kazuyuki., Sumiya, Satoshi. and Zhang, Geng. (2007). New DOC for Light Duty Diesel DPF System, *SAE Technical Paper*, No. 2007-01-1920.
- [15] Kaiser, Friedrich W., Maus, Wolfgang., Swars, Helmut. and Brück, Rolf. (1993). Optimization of an Electrically-Heated Catalytic Converter System Calculations and Application, *SAE Technical Paper*, No. 930384.