



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การลดปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำ
โดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

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

นามผู้วิจัย นายณภูมิ ไทพะพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้ฮีทเตอร์
ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

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

โดย

นายณฐภูมิ ไวกะพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณภูมิ ไวทยะพันธ์ 2555: การลดปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
ในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D. 132 หน้า

ในการศึกษานี้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าถูกเลือกใช้เป็นเครื่องมือในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับ
แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สำหรับลดปริมาณก๊าซมีเทนในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิง
ร่วม ข้อดีของการใช้วิธีนี้คือ อุปกรณ์มีราคาต่ำ ใช้พื้นที่น้อย รวมทั้งการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก ระบบ
นี้ถูกติดตั้งไว้ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ที่บริเวณก่อนทางเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์
ตัวที่สอง (MAIN-CAT) เพื่อที่จะลดก๊าซมีเทน อุณหภูมิของไอเสีย Λ ปริมาณของ
Mass flow rate และ %Energy Ratio ที่แตกต่างกันถูกนำมาศึกษาเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการ
ลดมีเทนด้วยวิธีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิไอเสียให้
สูงขึ้น จนทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้อย่างรวดเร็ว ทำให้
สามารถลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้ จากการทดลองพบว่า
ไม่เพียงแต่การเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้สูงขึ้นเท่านั้น แต่คุณลักษณะของ
ไอเสีย (ปริมาณก๊าซออกซิเจนในไอเสีย และองค์ประกอบทางเคมีของก๊าซไอเสีย) เป็นปัจจัย
สำคัญของการลดก๊าซมีเทนด้วยเหมือนกัน ผลจากการทดลองพบว่าปริมาณอากาศจากเครื่องยนต์
ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมและปริมาณของ CO มีผลต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการ
ยกอุณหภูมิไอเสีย และส่งผลต่อการลดปริมาณก๊าซมีเทนของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ โดยถ้ามี
ปริมาณอากาศและปริมาณของ CO ที่เหมาะสม การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียก่อน
เข้า MAIN-CAT ไปที่ 350°C ก็สามารถลดปริมาณก๊าซมีเทนได้มากกว่า 95%

Napumee Waitayapat 2012: Methane Reduction from DDF Engines under Low Load Conditions by Use of Electrical Heater Coupled to Catalytic Converter. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Ekathai Wirojsakunchai, Ph.D. 132 pages.

In this research, an electrical heater system was chosen as a tool to increase the exhaust temperature of DDF's catalytic converter system in order to decrease methane. The advantage of this system is that the tool has low price, requires less area, and installs easily. The system was installed in The exhaust pipe system of the prototyped DDF engine, which was located before the entrance of the second catalytic converter (MAIN-CAT) for reducing methane gas. The temperature of exhaust, Lambda, the volume of Mass Flow Rate and percent of Energy Ratio are brought to the study to analyze the factors which can reduce methane gas from the electrical heater system.

The result showed that the electrical heater system can raise the temperature of exhaust, affecting catalytic converter do go to light-off temperature rapidly. This can reduce methane emissions from the DDF engine. Moreover, we found that not only the increasing temperature of exhaust before entrance to MAIN-CAT but also the characteristics of exhaust (the volume of oxygen in exhaust and chemical compositions of exhaust) were important factors of reducing methane gas. The result also showed that the exhaust mass flow rate and the level of CO emission have strongly affected the increasing temperature of exhaust and the efficiency of catalytic converter with proper exhaust conditions the electrical heater can raise the temperature of the exhaust before MAIN-CAT to 350 °C, and reduce methane gas more than 95%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชเนศ อรุณศรีโสภณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับ ทฤษฎีและข้อมูลต่างๆ ในการวิจัยตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย เครื่องยนต์ทดสอบ อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ น้ำมันเชื้อเพลิง และสถานที่ในการทดสอบเครื่องยนต์

ขอขอบคุณ ดร.กฤษฎา วรรณทอง คุณธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์ และนักวิจัย ฝ่ายเทคนิค พลังงานประยุกต์และเครื่องยนต์ทดสอบ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. จังหวัดอยุธยา สำหรับที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบเครื่องยนต์ รวมถึงให้คำแนะนำและความรู้ ที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ ทีมนักวิจัย นิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากห้องปฏิบัติการการเผาไหม้เชิง ประยุกต์ (ACL Lab) และห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสันตะเทียน (CRV Lab) อันได้แก่ คุณธนันชัย เตพิมลรัตน์ คุณกิตติศักดิ์ คำสินลา คุณวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ คุณวรเทพ วชิรพันธุ์ และคุณอนิรุทธิ์ น้อยเพ็ง สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และแก้ไขปัญหาห้องทดสอบ คุณกิตติพงษ์ เยาวจา คุณบัณฑิต จิรนนทศักดิ์ คุณนิติรงค์ พงษ์พานิช และคุณกาญจนะ ชาวบ้านเกาะ สำหรับการ พัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมตัวแปรในการทดสอบเครื่องยนต์ ทีมงานวิศวกรจากบริษัท AVL SEA & Australia CO., Ltd. สำหรับคำปรึกษาเรื่องการใช้งานอุปกรณ์ และทีมช่างเทคนิคบริษัท ปตท. สำหรับความช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และซ่อมบำรุงอุปกรณ์วิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ณภูมิ ไวทยะพันธ์
มีนาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	98
สรุป	98
ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	102
ภาคผนวก	109
ภาคผนวก ก เครื่องยนต์และอุปกรณ์ทดสอบ	110
ภาคผนวก ข วงจรควบคุมการยกอุณหภูมิของระบบฮีเตอร์ไฟฟ้า	122
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ	124
ภาคผนวก ง การเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีเตอร์ไฟฟ้า ต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	127
ภาคผนวก จ Space velocity	130
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวแปรที่ใช้ควบคุมเครื่องยนต์ใน โหมดการทำงานแบบเชื้อเพลิงร่วมที่ ระดับการควบคุมต่างๆ	4
2	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ ในกระบอกสูบ	13
3	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Active Systems	17
4	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Passive Systems	18
5	แสดงการเปรียบเทียบแหล่งจ่ายไฟให้อิทธิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างอัลเทอร์เนเตอร์ เครื่องยนต์กับแบตเตอรี่	32
6	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	40
7	ข้อมูลจำเพาะของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์	42
8	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 ถึง 5	53
9	ปริมาณมลพิษหลักที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงที่ ไม่มีการใช้อิทธิเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสีย	54
10	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1	59
11	ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 1 หลังจากมีการใช้งาน อิทธิเตอร์ไฟฟ้า	62
12	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 2	67
13	ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 2 หลังจากมีการใช้งาน อิทธิเตอร์ไฟฟ้า	71
14	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 3	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 3 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า	79
16	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 4	83
17	ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 4 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า	87
18	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 2 และ 5	90
19	ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 5 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า	94
ตารางผนวกที่		
ก1	รายละเอียดของเครื่อง AVL Fuel balance & Fuel temperature control	116
ก2	ข้อมูลของเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR	119
ก3	ข้อมูลการทำงานของเครื่องยนต์ Case 1 ถึง 5	121
ค1	รายละเอียดคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2)	125
ค2	รายละเอียดคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ	126
ง1	ผลการเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของการทดลอง Case 1-5	128
จ1	แสดงค่า Space velocity ของแต่ละ Case การทดลอง	131

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงรูปแบบการติดตั้งชุดจ่ายก๊าซธรรมชาติและระบบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	3
2	ปริมาณมีเทนในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีการควบคุมตัวแปรในระดับที่ต่างกันเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ทำงานที่ภาระ 3.1 bar IMEP, ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ไอเสียถูกวัดที่ตำแหน่งออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์	5
3	ประสิทธิภาพเบรคของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีการควบคุมตัวแปรในระดับที่ต่างกันเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ทำงานที่ภาระ 3.1 bar IMEP, ความเร็วรอบ 2000 rpm	6
4	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพของสารพาเลเดียมและแพลตตินัมในการลดก๊าซมีเทนที่ส่วนผสมต่างๆ โดยแผนภูมิทางด้านซ้ายเป็นสภาวะที่ไม่มีการฉีดน้ำเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ โดยแผนภูมิทางด้านขวามีการฉีดน้ำเข้ามาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำการวัดทุก 50 °C	15
5	แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบ Raw Fuel Injection	19
6	เปรียบเทียบการใช้เทคนิค Raw Fuel Injection ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสีย โดยภาพที่ 6A อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมอยู่ที่ 170 °C จะเห็นได้ว่าเทคนิค Raw Fuel Injection ไม่สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียได้โดยที่อุณหภูมินี้ ภาพที่ 6B อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมอยู่ที่ 200 °C จะเห็นได้ว่าเทคนิค Raw Fuel Injection สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียได้	20
7	แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH ₄ โดยใช้วิธี Raw Fuel Injection หลังจากผ่าน PRE-CAT (7A) หลังจากผ่าน MAIN-CAT (7B) โดยที่ Case 1, Case 4 และ Case 6 เครื่องยนต์มีค่า Lambda อยู่ที่ 1.7, 2.1 และ 1.3 ตามลำดับ	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
8	แสดงประสิทธิภาพเมื่อมีการใช้แคตตาไลติกคอนเวอร์เพียงอย่างเดียว (Stock catalyst) เปรียบเทียบกับแคตตาไลติกคอนเวอร์ที่มีการนำเอาระบบฮีเตอร์ไฟฟ้าเข้ามาทำงานร่วม (EHC) ในการลดปริมาณ HC ที่ออกมาจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟในช่วง Cold start	23
9	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ BPEHC กับ APEHC	25
10	แสดงปริมาณ HC ที่ออกมาในช่วง Cold start (ช่วง 60 วินาทีแรกนับตั้งแต่เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์) โดย Engine-out คือ จุดวัด HC ก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ส่วน Tail-pipe คือ จุดวัด HC หลังออกจากแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์	26
11	แสดงอุณหภูมิและพลังงานของระบบท่อไอเสียที่เวลา 20 วินาทีหลังจากเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์	26
12	ภาพแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวางขดลวดแบบ Fully Heated (A) กับแบบ Front Face Heated (B) โดยภาพทางด้านซ้ายเป็นการเปรียบเทียบการกระจายความร้อนส่วนภาพทางด้านขวาเป็นการเปรียบเทียบการกักอุณหภูมิของขดลวดความร้อน	27
13	แสดงตำแหน่งการติดตั้ง EHC ในรถ BMW ALPINA B12 (ซ้าย) และภาพตัดขวางแสดง EHC ที่ใช้ในรถ BMW ALPINA B12 (ขวา)	28
14	แสดง Battery Voltage ของแบตเตอรี่ขนาดต่างๆ	28
15	เปรียบเทียบมลพิษที่ออกมาระหว่างการใช้ EHC และไม่ใช่ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบ MVEG II ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20 °C	29
16	เปรียบเทียบมลพิษที่ออกมาระหว่างการใช้ EHC และไม่ใช่ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบ MVEG II ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ -7 °C	29
17	แสดงรูป EHC จัดเรียงตัวแบบ Spiral (ซ้าย) และ EHC จัดเรียงตัวแบบ Hot spot (ขวา)	30
18	แสดงรูปแบบและการติดตั้ง EHC และระบบปั๊มช่วยเติมอากาศ	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปิดใช้งาน EHC เป็นเวลา 40 วินาทีนับตั้งแต่การเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์ EHC สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ Light-Off Catalyst และ Main Catalyst เข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงาน (ซ้าย) ส่งผลให้สามารถลดปริมาณ HC ลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ใช้งาน EHC (ขวา)	31
20	แสดงลำดับขั้นตอนในการยกอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นโดยใช้วิธี EICHHC (ซ้าย) และรูปแสดงการติดตั้งระบบ EICHHC ในระบบไอเสียของรถยนต์ (ขวา)	33
21	แสดงถึงความสามารถในการยกอุณหภูมิของสารเคมีชนิดต่างๆที่ถูกฉีดเข้าไปในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อยกอุณหภูมิของไอเสีย โดยเส้นต่างๆจะแสดงถึงจุดตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในฮีทเตอร์	34
22	แสดงถึงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์	34
23	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง EHC 4 kW, 2 kW และ Absorber ในการยกอุณหภูมิของไอเสีย (ซ้าย) และแสดงการเปรียบเทียบ HC-Conversion Rate ของ EHC 4 kW, 2 kW และ Absorber (ขวา)	35
24	แสดงลักษณะการทำงานของ DPF	36
25	แสดงถึงอุณหภูมิของไอเสียเมื่อมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทำงานร่วมกับฮีเตอร์ไฟฟ้าไว้บริเวณด้านหน้าฮีเตอร์ไฟฟ้าเพียงอันเดียว (a) แสดงอุณหภูมิของไอเสียเมื่อมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทำงานร่วมกับฮีเตอร์ไฟฟ้าไว้บริเวณด้านหน้าฮีเตอร์ไฟฟ้าและด้านหลัง SiC-DPF (b) โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายใน SiC-DPF จะแสดงไว้ดังภาพด้านขวา	37
26	แสดงรูปแบบการติดตั้งฮีเตอร์ไฟฟ้าด้านหน้า DPF	38
27	แสดง Backpressure ที่ลดลงเมื่อมีการใช้ฮีเตอร์ไฟฟ้า	38
28	แสดงถึงตำแหน่งในการติดตั้งฮีเตอร์ไฟฟ้าใน DPF (ซ้าย) และภาพแสดงถึงระยะเวลาในการเผาไหม้ของฮีเตอร์ใน DPF ลูกที่มีเขม่าเปรียบกับ DPF ลูกที่ไม่มีเขม่า (ขวา)	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	แสดงการติดตั้งระบบไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	41
30	แสดงรูปแบบของฮีทเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	43
31	แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณมลพิษและวงจรของสาย Sampling Line ก่อนเข้าเครื่องมือวัดไอเสีย HORIBA MEXA 7100DEGR และ Opacimeter 439	45
32	แสดงการติดตั้งที่ท่อไอเสียของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดของ Opacimeter 439	46
33	แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบฮีทเตอร์ไฟฟ้า	49
34	แสดงการทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC) ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	50
35	แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับแบบในตัวเมืองและแบบนอกตัวเมืองของการทดสอบแบบ NEDC	50
36	แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 1 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่าง กันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย	60
37	แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 1	60
38	แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 1	61
39	ประสิทธิภาพการลด CH ₄ (39A), THC (39B) และ CO (39C) ของ MAIN-CAT เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกันของ Case 1	63
40	พฤติกรรมของ NO _x ขณะฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงาน	64
41	แสดงตัวอย่างข้อมูลระยะเวลาการทำงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าซึ่งถูกบันทึก ข้อมูลโดยโปรแกรม NI LabVIEWTM 8.6 โดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายก อุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C ข้อมูลในแกน นอนคือระยะเวลาการทดลอง ข้อมูลแกนตั้งในที่นี้ 0 หมายถึง ฮีทเตอร์ ไฟฟ้า ไม่ทำงาน และ 1 หมายถึง ถึงฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงาน	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	แสดงให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ของ Case 1	66
43	แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 2 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine	68
44	แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 2 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย	69
45	แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 2	70
46	แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 2	70
47	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH_4 (47A), THC (47B) และ CO (47C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 2 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	73
48	เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 2	74
49	แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 3 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine	77
50	แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 3 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย	77
51	แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 3 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ใน Case 3	78
52	แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 3	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH_4 (53A), THC (53B) และ CO (53C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 3 เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	81
54	เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 3	82
55	แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 4 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine	84
56	แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 4 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย	85
57	แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 4	86
58	แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 4	86
59	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH_4 (59A), THC (59B) และ CO (59C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 4 เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	88
60	เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 4	89
61	แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 4 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine	91
62	แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 5 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย	92
63	แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 5	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 5	93
65	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH_4 (65A), THC (65B) และ CO (65C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 2 กับ Case 5 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	95
66	เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 2 เทียบกับ Case 5	96
ภาพผนวกที่		
ก1	แสดงรูปเครื่องยนต์ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ	111
ก2	แสดงแบบหุ้มฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ซ้าย) และลักษณะการขดของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ขวา)	111
ก3	แสดงการติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับ MAIN-CAT	112
ก4	ภาพถ่าย Transformer ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจาก 220V AC เป็น 110V AC	112
ก5	ภาพถ่าย Solid State Relay	113
ก6	ภาพถ่าย Analog to Digital Converter	113
ก7	ภาพถ่าย AC Dynamometer	114
ก8	ภาพถ่าย AVL Fuel balance & Fuel temperature control	116
ก9	ภาพถ่ายเครื่องมือวัดไอเสีย HORIBA MEXA 7100 DEGR และ แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณมลพิษ	118
ก10	แสดงตำแหน่งการอุปกรณ์ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	120
ข1	วงจรควบคุมการยกอุณหภูมิของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ของโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6	123

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ง1 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าต่อ
พลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมระหว่าง Case 1
กับ Case 4

129



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

λ	=	Lambda
%	=	เปอร์เซ็นต์, ร้อยละ
%ER	=	อัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด (%)
%Mass	=	เปอร์เซ็นต์โดยมวล
%vol.	=	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
A/F	=	อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง
AC	=	Alternating Current; ไฟฟ้ากระแสสลับ
APEHC	=	แกลดดาไลต์คิกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าอยู่ภายในตัวเองซึ่งใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากอัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์
B0	=	น้ำมันดีเซล 100%
B2	=	น้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของ Diesel 98% กับ Biodiesel 2%
B5	=	น้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของ Diesel 95% กับ Biodiesel 5%
bar	=	หน่วยวัดความดัน (100,000 N/m ²)
BPEHC	=	แกลดดาไลต์คิกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าอยู่ภายในตัวเองซึ่งใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รถยนต์
°C	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
cc	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
CH ₄	=	ก๊าซมีเทน (ppm)
CI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
CLD	=	การวัดแบบ A Chemi-Luminescence Detector
CNG	=	ก๊าซธรรมชาติสามารถอัดตัวได้
CO	=	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Vol%)
CO ₂	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Vol%)
CPSI	=	Cell Per Square Inch
DC	=	Direct Current; ไฟฟ้ากระแสตรง
DDF	=	Diesel Duel Fuel engines; เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

DOC	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
DOHC	=	ระบบเปิด-ปิดวาล์วแบบ Double Over Head Camshaft
DPF	=	เครื่องกรองเขม่าอนุภาค
ECU	=	อุปกรณ์ Electronic Control Unit
EGR	=	ระบบ Exhaust Gas Recirculation คือ การนำเอาก๊าซไอเสียหลังจากกระบวนการเผาไหม้กลับมาเผาไหม้ใหม่เพื่อลดการชิงจุดระเบิด (Knock) และ ลด NO_x
FID	=	การวัดแบบ Flame Ionization Detector
FLT	=	วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้น
g/ft^3	=	หน่วยวัดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี (กรัมต่อลูกบาศก์ฟุต)
H_2	=	ก๊าซไฮโดรเจน (ppm)
H	=	อะตอมของไฮโดรเจน
H/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน
HC	=	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
H_2O	=	น้ำ
IMEP	=	ความดันยังผลเฉลี่ย (bar)
K	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
kg/hr	=	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
kg/kmol	=	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)
kW	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
kWh	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้าต่อชั่วโมง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
L	=	ลิตร
LHV_D	=	ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันดีเซล (MJ/kg)
LHV_{NG}	=	ค่าความร้อนต่ำของก๊าซธรรมชาติ (MJ/kg)
LT	=	Light-off Temperature
MAIN-CAT	=	เครื่องฟอกไอเสียตัวที่สองสำหรับลดปริมาณก๊าซมีเทน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\dot{m}_A$	=	ปริมาณการใช้ของอากาศ (kg/hr)
$\dot{m}_D$	=	ปริมาณการใช้ของน้ำมันดีเซล (kg/hr)
$\dot{m}_G$	=	ปริมาณการใช้ของก๊าซธรรมชาติ (kg/hr)
mg/m^3	=	หน่วยวัดปริมาณมลพิษอนุภาค
MJ/kg	=	หน่วยวัดพลังงาน (มีลิจูลต่อกิโลกรัม)
mm.	=	มิลลิเมตร
MW	=	น้ำหนักของอะตอม
N	=	อะตอมของไนโตรเจน
N/A	=	Not Available
N/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของไนโตรเจนต่อคาร์บอน
NDIR	=	การวัดแบบ Nondispersive Infrared
NEDC	=	การทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle
NM	=	นิวตันเมตร
NO	=	ไนตริกออกไซด์ (ppm)
NO_x	=	ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)
NO_2	=	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)
NVO	=	ระบบ Negative Valve Overlap
O	=	อะตอมของออกซิเจน
O/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน (%)
O_3	=	ก๊าซโอโซน
O/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน
Pd	=	สารพาราเดียม
PGM	=	Precious Group Metal
PID	=	Proportional Integral Derivative
PM	=	มลพิษอนุภาค
Pt	=	สารแพลตินัม
ppm	=	อัตราหนึ่งในล้านส่วน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ppmC	=	อัตราหนึ่งในล้านส่วนของคาร์บอน 1 อะตอม
PRE-CAT	=	เครื่องฟอกไอเสียตัวแรกสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ
rpm	=	รอบต่อนาที
S	=	ซัลเฟอร์
s	=	หน่วยวัดเวลา (วินาที)
SG	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ
SI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
SO ₃	=	ซัลเฟต
SOF	=	Soluble Organic Fraction
t	=	Time; เวลา
Temp.	=	Temperature; อุณหภูมิ
THC	=	ผลรวมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
TWC	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
V	=	หน่วยวัดแรงดันทางไฟฟ้า (โวลต์)
W	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้า (วัตต์)

การลดปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำ โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

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

คำนำ

ในปัจจุบันที่ราคาน้ำมันดีเซลมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel Dual Fuel, DDF) ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างน้ำมันดีเซลกับก๊าซธรรมชาติ (CNG) โดยจะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงรองจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคมิภาระค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงเนื่องจากราคาก๊าซธรรมชาติมีราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซลอยู่มาก จากผลการศึกษาต่างๆพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมักประสบปัญหาทางด้านประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และทางด้านมลพิษ โดยพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณเขม่า (PM) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ลดลงแต่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยเฉพาะในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาขณะนั้นจะมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากและปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) ที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งก๊าซมีเทนนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนและการลดก๊าซมีเทนโดยใช้เทคนิคต่างๆ ในกระบวนการเผาไหม้มีความซับซ้อนมากโดยเฉพาะในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระการทำงานต่ำ แม้ว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) จะถูกนำมาใช้ในการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม แต่การออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนด้วยสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่อไอเสียมีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 400°C) ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิไอเสียปกติจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญในการลดมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical Heater) โดยได้ทำการออกแบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ติดตั้งอยู่ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ทดสอบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์โดยมี อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ปริมาณของออกซิเจน (Lambda) ปริมาณของ Mass flow rate และ %Energy Ratio ที่แตกต่างกัน เพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการลดก๊าซมีเทนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในการลดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
2. เพื่อศึกษาขอบเขตการทำงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณก๊าซมีเทน

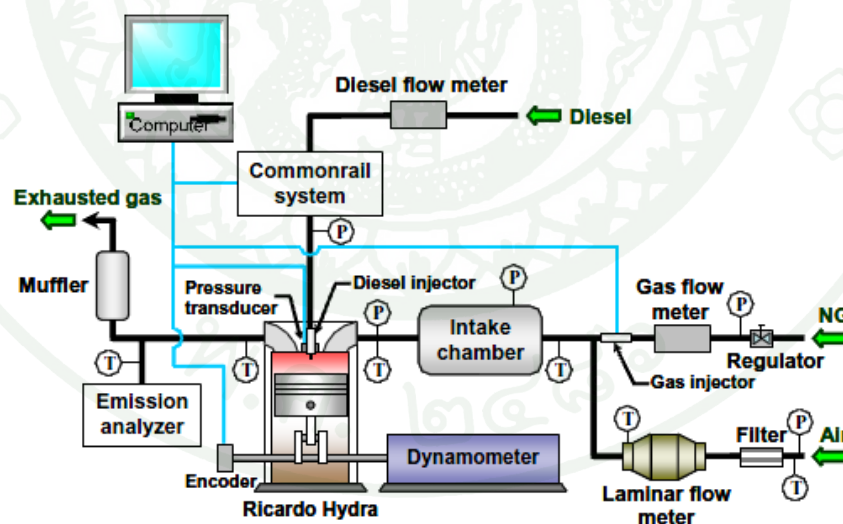
ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเฉพาะช่วงภาระการทำงานต่ำ
2. งานวิจัยนี้ไม่รวมผลกระทบของเขม่าไอเสีย ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และน้ำในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมต่อการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

การตรวจเอกสาร

1. หลักการของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซธรรมชาติคือ เครื่องยนต์ดีเซลที่มีการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติ (CNG) เพิ่มเข้าไปในเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลัก และใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงรอง หลักการทำงานคือ ระบบจะจ่ายก๊าซธรรมชาติผสมกับอากาศในท่อร่วมไอดี ก๊าซธรรมชาติจะถูกอัดพร้อมกับอากาศเพื่อให้มีอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น จากนั้นเมื่อถึงจังหวะที่เหมาะสมน้ำมันดีเซลจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อจุดระเบิดและเริ่มต้นการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติชนิดอื่นคือ จากการที่ยังคงเป็นเครื่องยนต์ที่ยังทำงานอยู่บนพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซลทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง เนื่องจากการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลทำเพียงแค่ติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติเข้าไป โดยยังคงค่าอัตราส่วนการอัดเอาไว้เท่าเดิม และเมื่อก๊าซธรรมชาติหมดไม่สามารถหาสถานีเติมได้ก็สามารถเปลี่ยนกลับไปใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวได้ตามปกติ



ภาพที่ 1 แสดงรูปแบบการติดตั้งชุดจ่ายก๊าซธรรมชาติและระบบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ที่มา: Aroonsrisopon *et al.* (2009)

Wannatong *et al.* (2009) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีการดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซลระบบคอมมอนเรลไดเร็กอินเจกชัน ขนาด 2,500 cc 4 สูบ 4 จังหวะ ที่มีการควบคุมตัวแปรในระดับที่ต่างกันเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลเดิมที่ภาระต่ำ (3.1 bar IMEP) ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ในการทดสอบการทำงานโดยใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว (conventional diesel) ตัวแปรที่ใช้ควบคุมเครื่องยนต์จะกำหนดตามสมองกลจากโรงงาน (OEM ECU) สำหรับการทำงานในโหมดเชื้อเพลิงร่วมจำนวนตัวแปรที่ใช้จะเปลี่ยนไปตามระดับการควบคุมดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมเครื่องยนต์ในโหมดการทำงานแบบเชื้อเพลิงร่วมที่ระดับการควบคุมต่างๆ

Parameter	Simple Conversion	Concept 1	Concept 2
CNG injection quantity and timing	X	X	X
Diesel injection quantity and timing		X	X
Dual pilot injection		X	X
EGR			X
Throttling			X

ที่มา: Wannatong *et al.* (2009)

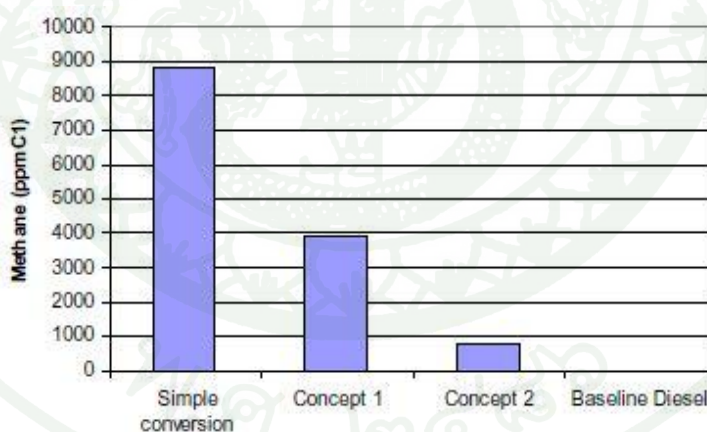
สำหรับโหมดการทำงานแบบเชื้อเพลิงร่วมได้ควบคุมปริมาณ %NG ให้คงที่ๆ 70% ตลอดทุกการทดสอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับการควบคุมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Simple Conversion (ซึ่งการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลให้เป็นเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมที่พบโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Simple Conversion) สำหรับวิธีนี้ OEM ECU จะควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น มุมการฉีดน้ำมันดีเซล, ปริมาณ EGR, การเปิดปิดวาล์วปีกผีเสื้อ และอื่นๆ ในแบบที่เหมือนกับการทำงานในโหมดดีเซล สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงดีเซลที่ฉีดต่อวัฏจักรจะถูกฉีดเสมือนกับเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระต่ำทุกความเร็วรอบ มีเพียงหัวฉีดก๊าซเท่านั้นที่ถูกควบคุมโดย DDF ECU ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบเครื่องยนต์และแรงบิดที่ต้องการ

2. Concept 1 สำหรับในระบบนี้ OEM ECU จะควบคุมปริมาณ EGR และการเปิดปิด วาล์วปีกผีเสื้อตามแบบที่เป็นในการทำงานในโหมดดีเซล ส่วน DDF ECU จะควบคุมมุมและ ปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลด้วยตัวเอง รวมถึงหัวฉีดก๊าซตามความเร็วรอบเครื่องยนต์และแรงบิดที่ ต้องการ

3. Concept 2 สำหรับในระบบนี้ DDF ECU ควบคุมทุกตัวแปรตามความเร็วรอบ เครื่องยนต์และแรงบิดที่ต้องการ โดยตัวแปรการฉีดน้ำมันดีเซลรวมถึงเชื้อเพลิงก๊าซ, การเปิดปิด วาล์วปีกผีเสื้อ และ EGR จะถูกปรับแต่งให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่ดีและ มลพิษที่ผ่านมาตรฐาน

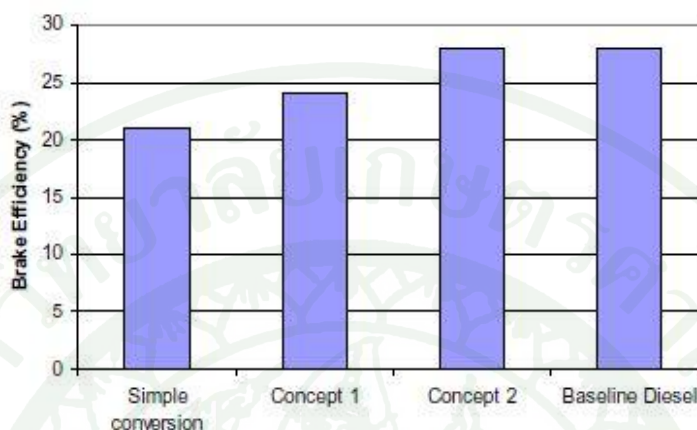
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณมีเทนในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์สำหรับแต่ละ Concept พบว่า ปริมาณมีเทนในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมแบบ Simple conversion มีปริมาณสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการทำงานในแบบอื่นๆ ทั้งนี้ปริมาณมีเทนจะลดลงจาก Simple conversion 51% เมื่อ เครื่องยนต์ทำงานในแบบ Concept 1 และ 90% สำหรับ Concept 2 ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ปริมาณมีเทนในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีการควบคุมตัวแปรใน ระดับที่ต่างกันเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ทำงานที่ภาระ 3.1 bar IMEP, ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ไอเสียถูกวัดที่ตำแหน่งออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: Wannatong *et al.* (2009)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพ Brake ของเครื่องยนต์พบว่า Concept 2 ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการทำงานแบบดีเซล และประสิทธิภาพที่ได้จาก Simple conversion ให้ประสิทธิภาพ Brake ต่ำสุดดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพ Brake ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีการควบคุมตัวแปรในระดับที่ต่างกันเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ทำงานที่ภาระ 3.1 bar IMEP, ความเร็วรอบ 2000 rpm

ที่มา: Wannatong *et al.* (2009)

จะเห็นได้ว่าตัวแปรการฉีดเชื้อเพลิงดีเซล, การเปิดปิดวาล์วปีกผีเสื้อ และปริมาณ EGR มีความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ถ้าเครื่องยนต์ที่ปรับแต่งตัวแปรดังกล่าวอย่างเหมาะสมจะสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ดีเซล แต่จากภาพที่ 2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีปริมาณ CH_4 ที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออกมาเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ถึงแม้ว่าจะมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ (Concept 2) แล้วก็ตาม

2. มลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีปริมาณเขม่าและไนโตรเจนออกไซด์ลดลงแต่มีคาร์บอนมอนนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล (Bahr *et al.*, 1999) นอกจากนี้การนำก๊าซธรรมชาติซึ่งมีกำมะถันเป็นส่วนประกอบหลักของชนิดเชื้อเพลิงมาเผาไหม้จะทำให้มีกำมะถันออกมากับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วย โดยในส่วนนี้จะอธิบายถึงลักษณะเฉพาะของมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) เป็นมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ระคายเคืองต่อจมูกตา หลอดลม และปอด ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ โดยไฮโดรคาร์บอนที่สถานะของเหลวจะเป็นส่วนประกอบของเขม่า (Particulate matter, PM) โดยในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI Engine) การเกิดไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นจากสารผสมบางส่วนไหลเข้าไปในซอกระหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบ และผนังห้องเผาไหม้ในจังหวะการอัด ซึ่งแก๊สที่อยู่ในซอกนี้ส่วนใหญ่จะไม่ถูกเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากทางเข้าของซอกเหล่านี้แคบเกินกว่าที่เปลวไฟสามารถเข้าไปได้ หลังจากนั้นแก๊สที่อยู่ในซอกดังกล่าวจะไหลออกจากซอกในช่วงหลังของกระบวนการขยายตัวและในช่วงกระบวนการคาย ส่วนการเกิดไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI Engine) นั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากสองสาเหตุหลัก สาเหตุแรกเกิดจากอากาศและน้ำมันที่ผสมบางเกินไปที่จะเกิดการเผาไหม้ เนื่องจากลักษณะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้น เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่เข้าใกล้ศูนย์ตายบน ซึ่งส่งผลให้การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่สม่ำเสมอ ทำให้ภายในห้องเผาไหม้บางส่วนมีสารผสมหนา และบางส่วนมีสารผสมบาง ซึ่งการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีสารผสมหนา แต่สารผสมบางส่วนอาจถูกเจือจางด้วยอากาศจนทำให้เกิดสารผสมบางเกินไป เปลวไฟที่แพร่ขยายมาไม่สามารถเผาไหม้สารผสมเหล่านั้นได้ จึงส่งผลให้เกิดไฮโดรคาร์บอนขึ้น สาเหตุที่สองเกิดจากระบบการฉีดเชื้อเพลิงในจังหวะที่การฉีดเชื้อเพลิงสิ้นสุดลงอาจมีเชื้อเพลิงบางส่วนหลุดเข้าไปในรูของหัวฉีดซึ่งส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนบางส่วนไม่เกิดการเผาไหม้ (Heywood *et al.*, 1988)

จากลักษณะการเกิด HC ของทั้งสองเครื่องยนต์ สามารถนำมาอธิบายการเกิด HC ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้เช่นกัน กล่าวคือการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีความคล้ายคลึงกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและการทำงานที่ใช้ส่วนผสมบางเหมือนเครื่องยนต์ดีเซล ส่งผลให้ลักษณะการเกิด HC ใกล้เคียงกันคือ เกิดจากสารผสมระหว่างอากาศและก๊าซธรรมชาติเข้าไปอยู่ตามซอกระหว่างลูกสูบ แวนลูกสูบ และผนังกระบอกสูบในช่วงจังหวะอัด ทำให้สารผสมเหล่านี้ไม่เกิดการเผาไหม้รวมถึงบริเวณที่ส่วนผสมบางจนเปลวไฟไม่สามารถลามไปได้

Papagiannakis and Hountalas (2004) ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ที่ความเร็วรอบ 1500 และ 2500 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษในแก๊สไอเสียที่ภาระการทำงานต่างๆของเครื่องยนต์ (bmep 1.21 ถึง 4.92 bar) โดยอัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดจะถูกควบคุมไว้อยู่ที่ประมาณ 74% ถึง 86% พบว่าที่ภาระการทำงานต่ำ (bmep 1.21 bar) ไฮโดรคาร์บอนของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากที่ภาระการทำงานต่ำมีอุณหภูมิไอเสียต่ำและอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงต่ออากาศบาง ส่งผลให้การเผาไหม้ช้า มีสารผสมบางส่วนหลุดออกมาจากกระบวนการเผาไหม้ แต่เมื่อเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้สูงขึ้น (bmep 4.92 bar) พบว่าแนวโน้มปริมาณไฮโดรคาร์บอนลดลง ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่เพิ่มสูงขึ้น จึงช่วยให้การเกิดออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากสถานะทั้งหมดที่ทำการทดสอบ ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ออกมาก็มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล

โดยในรถยนต์เราสามารถลดไฮโดรคาร์บอนได้โดยการติดตั้ง Three-Way Catalyst (TWC) ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์เบนซิน (SI engines) และติดตั้ง Diesel Oxidation Catalyst (DOC) ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล (CI engines)

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากสารผสมหนา (Fuel Rich) ทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้คาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงให้เป็น CO₂ และอีกปัญหานั้นเกิดจากประสิทธิภาพการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงต่ำ (Poor mixing) ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้ไฮโดรคาร์บอนบางส่วนไม่เกิดการเผาไหม้ โดยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์สามารถรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเลือดได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน ดังนั้นถ้าเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลให้ความสามารถในการ

ส่งก๊าซออกซิเจนไปยังกล้ำมน้ำหรือวัชระต่างๆได้น้อยลง แต่โดยปกติแล้วกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จะเปิดด้วยการอัดนั้นจะใช้สารผสมบางจึงทำให้ปัญหาการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์นั้นไม่ใช่ปัญหาหลักในเครื่องยนต์จะเปิดด้วยการอัด ยิ่งโดยในปัจจุบันเครื่องดีเซลนั้นเปลี่ยนระบบการฉีดน้ำมันมาเป็นแบบ Commonrail ทำให้สามารถแก้ปัญหา Poor mixing ได้ โดยระบบการฉีดน้ำมันแบบ Commonrail นั้นจะฉีดน้ำมันด้วยแรงดันที่สูงมาก (ประมาณ 1,300-2,000 bar) ทำให้น้ำมันที่ถูกฉีดออกมาเป็นฝอยละเอียดทำให้มีการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเป็นเนื้อเดียวกันยิ่งขึ้น

Papagiannakis and Hountalas (2003) ได้ศึกษาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง (Direct Injection) พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และเขม่าที่ลดลง แต่มีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมสารผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิต่ำทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และในช่วงภาระการทำงานต่ำเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดจาก 41% เป็น 84% จะส่งผลให้ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ 41%

โดยในรถยนต์เราสามารถลด CO ได้โดยการติดตั้ง TWC ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์เบนซินและติดตั้ง DOC ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะประกอบไปด้วยก๊าซ 2 ชนิดคือ ไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและกลิ่น ละลายน้ำได้เล็กน้อย และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ การเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จะเปิดด้วยการอัด เนื่องจากการเผาไหม้แบบบาง (Lean Burn) จึงมีปริมาณก๊าซออกซิเจนพอที่จะเกิดกระบวนการออกซิเดชันกับก๊าซไนโตรเจนในกระบอกสูบ ซึ่งในจังหวะอัดเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบสูงทำให้เกิดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น และในจังหวะขยายตัวอุณหภูมิในกระบอกสูบจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ไม่สามารถแตกตัวได้ ดังสมการที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุด โดยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,800 K ขึ้นไป (Heywood *et al.*, 1988)



รถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งสำคัญของการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เช่นกันนอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศเกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนดั่งสมการที่ 4 โดยทำปฏิกิริยาที่ความดันต่ำทำให้เกิดฝนกรด (Acid rain) (Martin, 1984; Turn, 2006)



นอกจากนี้แสงแดดทำปฏิกิริยาย้อนกลับกับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศและแตกตัวเกิดมลพิษทางอากาศเป็นหมอกสีเหลือง (Smog) ดังสมการที่ 5 ทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ (Kelly and Gunst, 1990; Haywood *et al.*, 1988)



การลดการเกิดไนตริกออกไซด์ (NO) สามารถทำได้ 2 วิธีคือ ลดบริเวณที่มีสารผสมบางในกระบวนการเผาไหม้ และลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ของสารผสมบาง

สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้น ออกไซด์ของไนโตรเจนโดยส่วนใหญ่เกิดจากบริเวณที่น้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและระยะเวลาที่ปฏิกิริยายาวนานพอ นอกจากนี้ออกไซด์ของไนโตรเจนบางส่วนยังสามารถเกิดขึ้นจากส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลได้อีกเช่นกัน ดังนั้นปริมาณของน้ำมันดีเซลที่ฉีดต่อวัฏจักรเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน เพราะปริมาณน้ำมันดีเซลต่อวัฏจักรเป็นตัวกำหนดขนาดของบริเวณที่จะเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเอง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกับดีเซลพบว่าการทำงานแบบเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณที่ต่ำกว่าเนื่องจากลักษณะการเผาไหม้แบบผสมมาก่อนที่ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำกว่า (Karim, 1993)

โดยในรถยนต์เราสามารถลดการเกิด NO_x ได้โดยการติดตั้ง TWC ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์เบนซินและติดตั้ง Exhaust Gas Recirculation (EGR), Lean NO_x Trap (LNT), Diesel Particulate NO_x Reduction system (DPNR) และ Selective Catalytic Reduction (SCR) ในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นก๊าซที่เป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ ซึ่งก๊าซมีเทนนั้นเป็นตัวการหลักที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะเรือนกระจก (Green House Effect) หรือสภาวะโลกร้อน โดยก๊าซมีเทนจะมีความรุนแรงมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 23 เท่าในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Graham *et al.*, 2008) โดยการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกันจะนำก๊าซธรรมชาติซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักผสมเข้าไปแบบ Premixed Charge เมื่อก๊าซมีเทนทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) อย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), และน้ำ (H_2O) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 K ดังสมการที่ 6, 7, 8 และ 9



การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีก๊าซมีเทนหลุดอยู่ตามร่องแหวนของลูกสูบ (Crevice) จะเป็นสาเหตุหลักของการเกิดก๊าซมีเทน (Korakianitis *et al.*, 2010) แต่การออกซิไดส์ก๊าซมีเทนด้วยสารเร่งปฏิกิริยาใน DOC จะเกิดขึ้นได้เมื่อไอเสียมีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 400°C) (Moalllemi *et al.*, 1999) ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิไอเสียปกติจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

มลพิษอนุภาค (Particulate Matter, PM) เป็นมลพิษหลักที่เกิดจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยมีองค์ประกอบหลักคือ เขม่า (Soot), Soluble Organic Fraction (SOF), ซัลเฟต (SO_3) และขี้เถ้า (Ash) โดย PM นั้นจะมีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งสามารถเดินทางเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและปอดได้เป็นอย่างดี จึงก่อให้เกิดความผิดปกติต่อระบบทางเดินหายใจได้ เนื่องจากในเขม่ามีสารหลายชนิดที่เป็นสารก่อมะเร็ง สาเหตุของการเกิดเขม่ามีขึ้นจากการผสมหนาและมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 2,800 K สภาวะการเกิดเขม่ามีอยู่ 2 สภาวะคือ สภาวะแรกเรียกว่า Particle Formation เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเชื้อเพลิงจากสภาวะก๊าซแล้วกลั่นตัวอยู่ในสภาวะ

ของแข็งขนาดเล็กโดยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในรูปของไฮโดรคาร์บอนอะตอมหรือไฮโดรคาร์บอนอโรมาติก และสถานะที่สองเรียกว่า Particle growth ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการ Surface growth, Coagulation และ Aggregation โดยกระบวนการ Surface growth เป็นกระบวนการของก๊าซซึ่งล้อมรอบโมเลกุลเชื้อเพลิงรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ต่อมากระบวนการ Coagulation เป็นกระบวนการชนกันของอนุภาคขนาดเล็กทำให้จำนวนอนุภาคขนาดเล็กลดลงแต่ปริมาณเขม่าเท่าเดิม สุดท้ายคือกระบวนการ Aggregation เป็นกระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ โดยขนาดและน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของไฮโดรคาร์บอนถ้ามีการจับตัวกันเป็นจำนวนมากจะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากขึ้น (Heywood *et al.*, 1988)

ส่วนวิธีการกำจัดมลพิษอนุภาคในรถยนต์นั้นทำได้โดยการติดตั้ง Diesel Particulate Filters (DPF) เข้าไปในระบบไอเสีย

3. การลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

วิธีการลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองระบบหลัก คือ การลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบ และการลดมลพิษด้วยระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ระบบแรกการลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบ (Combustion System) วิธีการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบนั้นเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในกระบอกสูบในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ได้แก่เทคนิค Exhaust Gas Recirculation (EGR), Negative Valve Overlap (NVO) และ Injection Strategies ซึ่งจะแสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยวิธีการที่กล่าวไปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบ

วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Exhaust Gas Recirculation (EGR) ¹	- ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน - ลดการชิงการจุดระเบิด (Knock) - ส่งผลกระทบต่อความดันและอัตราการสูญเสียความร้อนในกระบอกสูบน้อย - ลด NO_x	- เมื่อใช้ไปนานๆ ประสิทธิภาพของ EGR จะลดลงเนื่องจากเขม่าจะถูกดูดกลับเข้ามาพร้อมกับไอเสีย เข้าไปเกาะในระบบ EGR ทำให้ต้องถอดออกมาทำความสะอาด
Negative Valve Overlap (NVO) ²	- ลด HC, CO และ Soot เนื่องจากมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	- ในภาวะสูง NO_x มากขึ้น - เกิด Knock ที่ High load - เกิด Pumping loss ทำให้ Thermal efficiency ลดลง ส่งผลให้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น
Injection Strategies ³	- สามารถปรับเปลี่ยนองศาการฉีดน้ำมันและรูปแบบการฉีดน้ำมันให้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานของเครื่องยนต์ได้ ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพในการควบคุมการเผาไหม้และการลดมลพิษได้ดี	- การควบคุมการฉีดน้ำมันให้เหมาะสมกับกระบวนการเผาไหม้มีความซับซ้อน

ที่มา: ¹ Kim and Lee (2006); Canova *et al.* (2007)

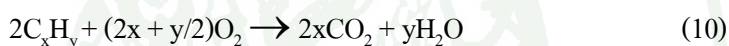
² Tepimaorat *et al.* (2011)

³ Aroonsrisopon *et al.* (2009)

โดยการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบนั้น เป็นขั้นตอนหนึ่งที่ช่วยให้มลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ลดน้อยลงไปได้ แต่ก็มีมลพิษบางส่วนที่ไม่สามารถจัดได้ในขั้นตอนนี้หลุดออกมาพร้อมกับไอเสีย ซึ่งเราจัดมลพิษส่วนที่เหลือนี้ได้ด้วยการติดตั้งระบบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ระบบที่สองการลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Converter System) โดยใช้ Diesel Oxidation Catalyst (DOC)

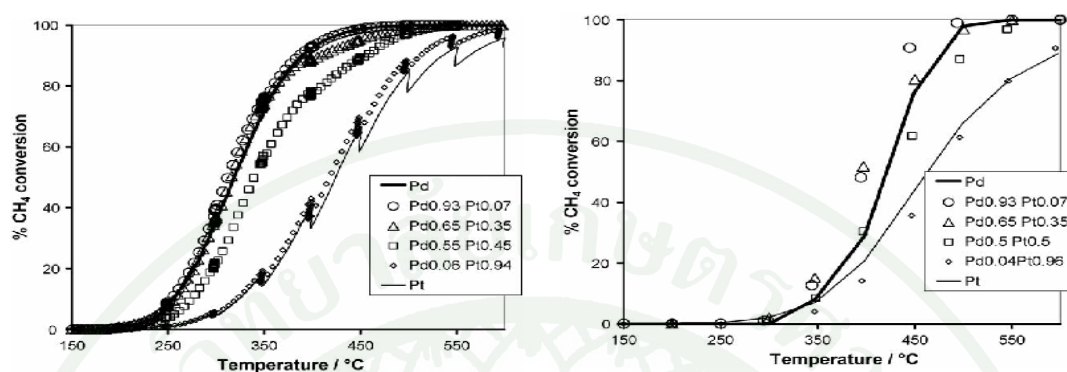
Diesel Oxidation Catalyst (DOC) หรือ เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานี้จะเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังสมการที่ 10, 11 และกระบวนการรีดักชันกับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ในสมการที่ 12



Moallemi *et al.* (1999) ได้กล่าวว่าก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่มีความยุ่งยากในการกำจัด ต้องใช้ความร้อนที่สูงถึงจะกำจัดก๊าซมีเทนได้ และได้เสนอให้ใช้สารพาเลเดียม (Pd) และแพลตตินัม (Pt) ซึ่งเป็นโลหะที่เหมาะสมกับการใส่ในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการออกซิเดชันก๊าซมีเทน โดยสารพาเลเดียมต้องการความร้อนที่มากกว่า 400 °C เพื่อที่จะให้ตัวของมันเองทำปฏิกิริยาในการดูดซับ CO และ CH₄

Lapisardi *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการลดก๊าซมีเทนที่ช่วงอุณหภูมิต่ำในเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) โดยใช้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ โดยได้มีการศึกษาปริมาณ Pd และ Pt ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อช่วยลดก๊าซมีเทน พบว่า Pd สามารถลดปริมาณของก๊าซมีเทนและใช้อุณหภูมิในการกำจัดก๊าซมีเทนที่ต่ำกว่า Pt และยังพบว่าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มี Pd เป็นส่วนประกอบหลักแล้วมีการเติม Pt เข้าไปด้วยเล็กน้อยจะมีประสิทธิภาพการลดปริมาณของก๊าซมีเทนและใช้อุณหภูมิในการกำจัดก๊าซมีเทนที่ต่ำกว่า แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มี Pd เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการฉีดน้ำเข้าไปในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

พบว่าในสภาวะเดียวกันเมื่อมีน้ำเข้ามาในแคตตาลิติกคอนเวอร์เตอร์ประสิทธิภาพในการลดก๊าซมีเทนจะลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพของสารพาเลเดียมและแพลตตินัมในการลดก๊าซมีเทนที่ส่วนผสมต่างๆ โดยแผนภูมิทางด้านซ้ายเป็นสภาวะที่ไม่มีการฉีดน้ำเข้าแคตตาลิติกคอนเวอร์เตอร์ โดยแผนภูมิทางด้านขวามีการฉีดน้ำเข้ามาในแคตตาลิติกคอนเวอร์เตอร์ทำการวัดทุก 50 °C

ที่มา: Lapisardi *et al.* (2006)

4. วิธีเพิ่มอุณหภูมิให้อุณหภูมิถึงจุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว (Fast Light-off Temperature, FLT)

Fast Light-off Temperature (FLT) คือ วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแคตตาไลต์ดิกคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถเข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้เร็วขึ้น

Light-off Temperature (LT) คือ จุดอุณหภูมิการทำงานของแคตตาไลต์ดิกคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ 50% เช่น ใน Three-Way catalyst จุด Light-off Temperature อยู่ที่ประมาณ 250°C ส่วน Diesel Particulate Filter จุด Light-off Temperature อยู่ที่ประมาณ 350°C (Wirojsakunchai, 2009) ทั้งนี้ Light-off Temperature ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการทั้งปัจจัยที่เกิดจากคุณลักษณะของไอเสียและคุณสมบัติของแคตตาไลต์ดิกคอนเวอร์เตอร์เอง

โดยเทคนิค FLT ในปัจจุบันนี้มีอยู่มากมายหลายเทคนิค แต่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบหลัก คือ Active Systems และ Passive Systems

ระบบแรก Active Systems คือ ระบบที่มีการนำเอาพลังงานจากภายนอกเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอเสีย เช่น เครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า (Electrically Heater Catalyst), หัวเผา (Fuel Burner) และ ไมโครเวฟ (Microwave) โดยจะแสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยวิธีการที่กล่าวไปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Active Systems

วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Electrically Heated Catalyst (EHC) ¹	- ราคาอุปกรณ์ไม่สูงมากวิธีการไม่ซับซ้อน - สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ได้รวดเร็วตั้งแต่ภาระการทำงานของเครื่องยนต์ต่ำ - อุปกรณ์มีอายุการใช้งานยาวนาน - ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย - สามารถนำไปใช้งานได้จริง	- มีปัญหาเรื่องการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของรถยนต์ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งานของ EHC ต้องเปลี่ยนไปใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุไฟฟ้ามากกว่าหรือใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการจ่ายไฟที่เพียงพอให้กับฮีตเตอร์
Fuel Burner ²	- สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วเกือบทุกภาระและรอบการทำงานของเครื่องยนต์	- การออกแบบระบบค่อนข้างยากและมีความซับซ้อน - ระบบต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเยอะ - การควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟในช่วงภาระการทำงานต่างๆของเครื่องยนต์ทำได้ยาก
Microwave ³	- สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว	- ราคาสูง - ระบบมีความซับซ้อน - มีปัญหาด้านการนำไปใช้จริง

ที่มา: ¹ Yaegashi *et al.* (1994); Hanel *et al.* (1996, 1997); Shimasaki *et al.* (1997)

² Wirojsakunchai *et al.* (2007)

³ Garner *et al.* (1989)

ระบบที่สอง Passive Systems คือ ระบบที่ไม่ได้นำพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกมาใช้เพิ่มอุณหภูมิของไอเสียแต่ใช้ประโยชน์จากแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในการลด Light-off Temperature ลง เช่น Reverse Flow, Post Fuel Injection และ Raw Fuel Injection โดยจะแสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยวิธีการที่กล่าวไปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Passive Systems

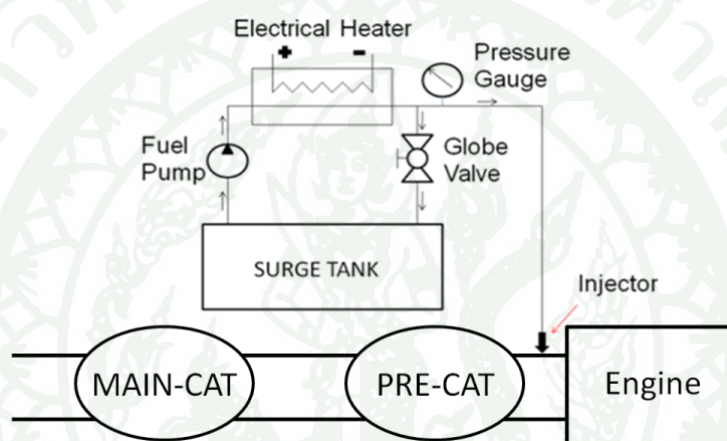
วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Reverse Flow ¹	- สามารถรักษาอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ดี	- มีการทำงานที่ซับซ้อนยากต่อการควบคุม - อุปกรณ์มีความอายุการใช้งานน้อย
Post Fuel Injection ²	- เป็นการให้ความร้อนโดยใช้ประโยชน์จากระบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ทำให้ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม	- ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น - มีน้ำมันเชื้อเพลิงหลุดมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นทำให้เป็นอันตรายต่อน้ำมันหล่อลื่นและเครื่องยนต์ (Oil dilution effect)
Raw Fuel Injection ³	- วิธีการไม่ซับซ้อน - มีราคาถูก - ใช้พลังงานน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ	- ไม่สามารถใช้เพิ่มอุณหภูมิในช่วงภาระเครื่องยนต์ต่ำ (Low Load) ได้เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ไม่สูงมากพอที่จะทำให้ น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไประเหยตัวแล้วทำปฏิกิริยา - อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์มากขึ้น

ที่มา: ¹ Liu *et al.* (2001); Salomons *et al.* (2004)

² Blakeman *et al.* (2003); Deconninck (2005); Asad *et al.* (2007)

³ Chiew *et al.* (2005); Asad *et al.* (2007); Noipheng *et al.* (2011)

อนิรุทธิ์ (2554); Noipheng *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (โดยใช้พื้นฐานเครื่องยนต์ TOYOTA 2KD-FTV มาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม) โดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Raw Fuel Injection) โดยมีปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคือ 5%, 10% และ 15% ได้ทดลองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1900 และ 2400 rpm, Lambda ในช่วง 1.3 ถึง 2.1, และ อุณหภูมิของไอเสียในช่วง 170 ถึง 230 °C ควบคุมอัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด (%NG) ไว้อยู่ที่ 70% ในช่วงภาระปานกลาง (IMEP 2 ถึง 5 bar) โดยรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์จะแสดงไว้ดังภาพที่ 5



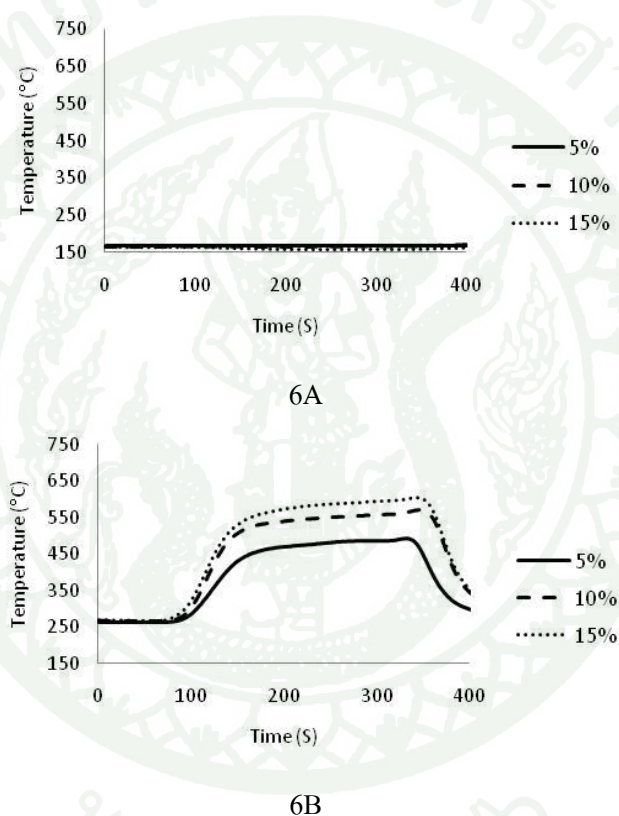
ภาพที่ 5 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบ Raw Fuel Injection

ที่มา: Noipheng *et al.* (2011)

ได้พบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลด CH_4 ของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราส่วนผสมของ Pd ล้วนมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียและมีประสิทธิภาพในการลด CH_4 โดยวิธี Raw Fuel Injection ได้ดีกว่าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราส่วนผสมของ Pt ล้วน

2. ในส่วนของอุณหภูมิของไอเสียพบว่าอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 200°C สูงเพียงพอที่จะใช้เทคนิค Raw Fuel Injection ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียได้แล้วทำให้เกิดตะไคคคอนเวอร์เตอร์สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ แต่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 170°C เป็นอุณหภูมิที่เกิดตะไคคคอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ไม่สูงมากพอที่จะทำให้ น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไประเหยตัวแล้วทำปฏิกิริยา ถึงแม้ว่ามีปริมาณ CO, THC, และ CH_4 ที่ออกจากเครื่องยนต์มากก็ตาม โดยภาพการเปรียบเทียบจะแสดงไว้ดังภาพที่ 6



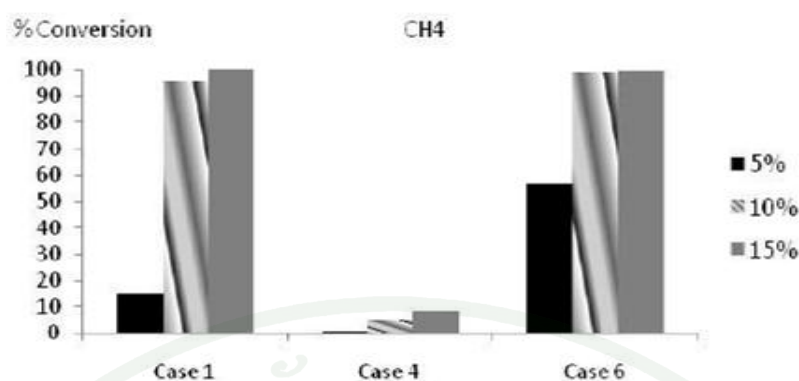
ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการใช้เทคนิค Raw Fuel Injection ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสีย โดยภาพที่ 6A อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมอยู่ที่ 170°C จะเห็นได้ว่าเทคนิค Raw Fuel Injection ไม่สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียได้เลยที่อุณหภูมินี้ ภาพที่ 6B อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมอยู่ที่ 200°C จะเห็นได้ว่าเทคนิค Raw Fuel Injection สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียได้

ที่มา: Noipheng *et al.* (2011)

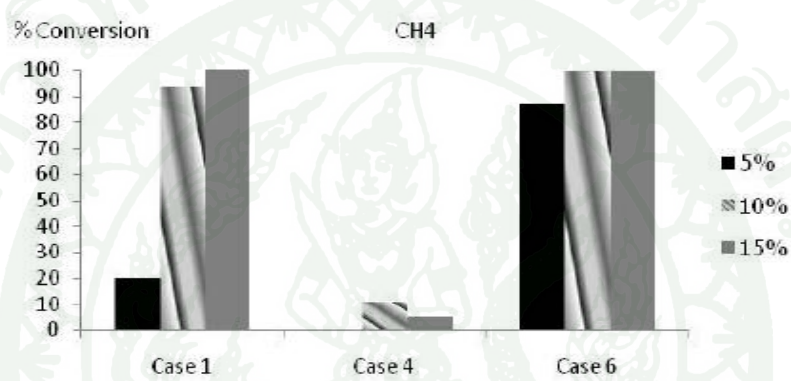
3. คุณลักษณะของไอเสียเองเช่น ความเข้มข้นของ CO, THC และ CH₄ รวมถึงปริมาณของ Mass flow rate นั้นมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH₄ ของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

4. ที่ Engine out lambda และ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกัน ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine speed) ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH₄ โดยใช้วิธี Raw Fuel Injection

5. การลด Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้ต่ำลงเหลือประมาณ 1.3 ทำให้ความเข้มข้นของ O₂ และปริมาณ Mass flow rate ลดลง แต่มีปริมาณ CO, THC และ CH₄ จะสูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Lambda 1.7 และ 2.1 ผลจากการทดลองพบว่าถ้าลดค่า Lambda ของเครื่องยนต์ให้เข้าใกล้สภาวะเผาไหม้พอดี ($\lambda=1$) ที่ Lambda 1.3 จะทำให้วิธี Raw Fuel Injection สามารถเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็วและทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้เร็วยิ่งขึ้น ส่งผลให้สามารถลดปริมาณ CH₄ ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้มากกว่า เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ Lambda เข้าใกล้สภาวะเผาไหม้บาง ($\lambda=2$) ที่ Lambda 2.1 และ 1.7 โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 7



7A



7B

ภาพที่ 7 แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH₄ โดยใช้วิธี Raw Fuel Injection หลังจากผ่าน PRE-CAT (7A) หลังจากผ่าน MAIN-CAT (7B) โดยที่ Case 1, Case 4 และ Case 6 เครื่องยนต์มีค่า Lambda อยู่ที่ 1.7, 2.1 และ 1.3 ตามลำดับ

ที่มา: Noipheng *et al.* (2011)

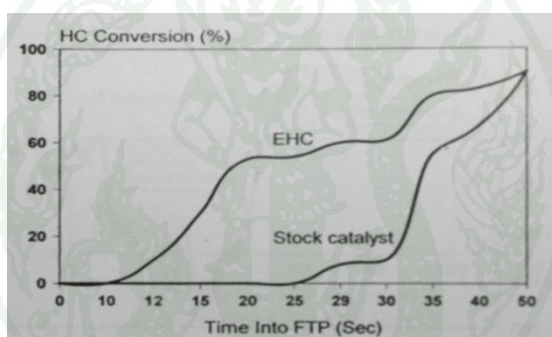
จากที่กล่าวไปจะพบว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากและมีประสิทธิภาพในการลดมลพิษจากเครื่องยนต์ตั้งแต่ภาระงานต่ำ โดยที่ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้กับระบบไอเสียเป็นเวลานานแล้วในสมัยก่อนนั้นจะนิยมนำไปใช้กับรถบรรทุกขนาดใหญ่ โดยนำตัว Electrical Heater มาใช้คู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้อุณหภูมิในการกำจัดไอเสียดีขึ้น แต่ข้อเสียที่พบก็คือตัวฮีตเตอร์ไฟฟ้าเองนั้นมีขนาดใหญ่และมีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากทำให้เป็นที่ไม่แพร่หลาย ปัจจุบันนี้เราสามารถออกแบบให้ขนาดของฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็กลงมากกว่าสมัยก่อนและมีความสามารถในการให้ความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

จนสามารถนำมาติดตั้งในรถยนต์ขนาดเล็กเพื่อช่วยในการลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์อย่างแพร่หลายทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล

5. การนำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

5.1 การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

ในเครื่องยนต์เบนซินจะติดตั้ง Electrical Heater คู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เป็นวิธีการเพิ่มความร้อนให้กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่อุณหภูมิการทำงานได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถออกซิไดซ์มลพิษที่ออกมาพร้อมกับไอเสียได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับไม่ได้ใช้ตามภาพที่ 8

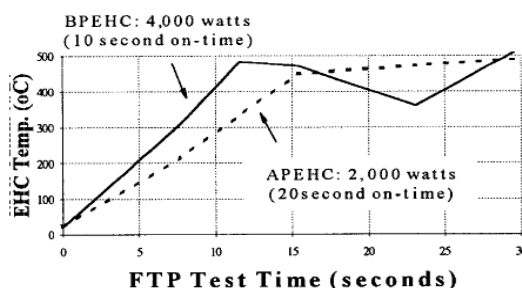


ภาพที่ 8 แสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณ HC เมื่อมีการใช้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว (Stock catalyst) เปรียบเทียบกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการนำเอาระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้ามาทำงานร่วม (EHC) ในการลดปริมาณ HC ที่ออกมาจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟในช่วง Cold start

ที่มา: Heck and Farrauto (2002)

Whittenberger *et al.* (1992) ได้นำระบบ EHC ไปทดสอบในรถยนต์เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ปัญหาที่พบคือแบตเตอรี่ของรถยนต์มีอายุการใช้งานที่สั้นและระบบการประจุไฟกลับเข้าแบตเตอรี่มีปัญหาไม่สามารถใช้ระบบ EHC ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

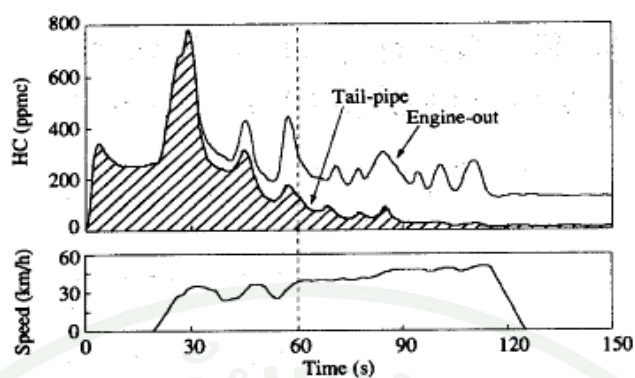
Laing (1994) ได้ทำการทดลองบนเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI engine) พบว่าในช่วงประมาณ 1-2 นาทีแรกของการสตาร์ทเครื่องยนต์ (Cold start) รอบเครื่องยนต์ประมาณ 1,500 rpm มลพิษจำพวก HC และ CO จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับไอเสียเป็นจำนวนมาก โดยมีปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยที่ส่งผลให้มลพิษสูงในช่วงเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์ประการแรกคือแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถเริ่มการออกซิเดชัน HC และ CO ได้เพราะไม่ถึงจุดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน แก้ไขด้วยการออกแบบและติดตั้ง EHC ให้ใกล้ท่อร่วมไอเสีย (Exhaust Manifold) เพื่อที่จะได้ใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ประการที่สองคือ โดยส่วนใหญ่เครื่องยนต์ในช่วงเริ่มสตาร์ทจะเดินเครื่องแบบ Little rich ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการออกซิเดชัน แก้ไขด้วยการติดตั้งชุดเติมอากาศ (Air Pump) เข้าไปในชุดระบบไอเสียด้วยโดยชุดเติมอากาศมีหน้าที่ช่วยเพิ่มออกซิเจนในช่วง 20-40 วินาทีของการเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์นอกจากนี้ยังได้เสนอให้มีการปรับ A/F ratio ให้เข้าใกล้ Stoichiometric เพื่อให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามารถเข้า Light-off Temperature ได้อย่างรวดเร็ว และยังได้ศึกษาแหล่งกำเนิดไฟให้กับ EHC เพื่อหาทางเลือกใหม่ โดยที่ EHC จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่มากในช่วง 25-30 วินาทีแรกของการใช้งานและถ้าเครื่องยนต์มีภาระการทำงานเพิ่มมากขึ้นปริมาณไอเสียของเครื่องยนต์ที่ออกมาก็จะมากขึ้นความต้องการพลังงานของ EHC ก็เพิ่มขึ้น ปัญหาแบตเตอรี่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของ EHC จะหมดไปถ้าเพิ่มขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) อีก 5-10% จากขนาดปกติและยังมีการเปรียบเทียบกันระหว่างอัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์ (Alternator Powered EHC, APEHC) กับแบตเตอรี่ (Battery Powered EHC, BPEHC) พบว่า APEHC ที่ได้ทำการพัฒนาแล้วจะสามารถลดมลพิษที่ออกมาได้และลดความต้องการพลังงานจากแบตเตอรี่ลงได้ทำให้ไม่ต้องเพิ่มความจุของแบตเตอรี่และส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่ในระบบรถยนต์น้อยมาก โดยได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ BPEHC กับ APEHC ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ BPEHC กับ APEHC

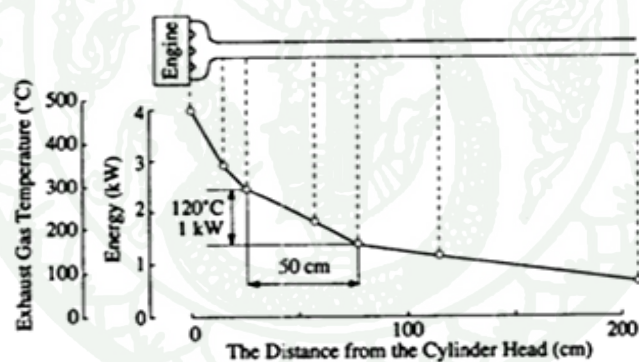
ที่มา: Laing (1994)

Yaegashi *et al.* (1994) ได้ทำการศึกษาเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟขนาด 2,200 ซีซี. พบว่าในช่วง Cold start (ช่วง 60 วินาทีแรกนับตั้งแต่เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์) จะมีปริมาณ HC ออกมาเป็นจำนวนมากเนื่องจากแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำการออกซิเดชัน HC ได้ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดอุณหภูมิการทำงาน ดังรูปภาพที่ 10 จึงได้มีการนำ EHC มาใช้เพิ่มความร้อนให้กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดปริมาณ HC ที่เกิดขึ้นในช่วง Cold start ซึ่งการนำ EHC มาใช้ในรถยนต์นั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพิ่มชุดแบตเตอรี่อีกหนึ่งชุดเพื่อให้มีความจุมากขึ้นและเปลี่ยนสายไฟให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ผลที่ตามมาคือมีภาระค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้นเพราะรถยนต์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ที่ใส่เพิ่มและพื้นที่ใช้สอยลดลง โดยยังพบอีกว่าพลังงานที่สูญเสีย (Energy loss) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้งท่อไอเสียถ้าระยะห่างระหว่างตำแหน่งติดตั้งระบบมากขึ้นอุณหภูมิไอเสียจะลดลง ดังรูปภาพที่ 11 และได้มีการทดสอบหาประสิทธิภาพขนาดของ EHC ที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 50 cm³, 100 cm³ และ 200 cm³ โดยดูประสิทธิภาพการให้ความร้อนจนถึง 400°C พบว่า EHC ขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการลด HC ได้ดีกว่าขนาดใหญ่ EHC ขนาดเล็กมีอัตราการบริโภคพลังงานน้อยกว่าขนาดใหญ่และ EHC ขนาดเล็กสามารถทำอุณหภูมิได้ถึง 400°C ได้เร็วกว่าขนาดใหญ่ และยังได้มีการทดสอบประสิทธิภาพการกระจายอุณหภูมิภายใน EHC โดยจัดวางขดลวดความร้อนหลากหลายรูปแบบ พบว่าการให้ EHC วางขดลวดความร้อนแบบกระจายตัวแบบเป็นจุด (Front face heated EHC) ขนาด 0.75 kW เป็นแบบดีที่สุดสามารถประหยัดพลังงานมากกว่า 20% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเดิมคือแบบที่ให้ขดลวดความร้อนวางตัวเต็มผิวหน้า (Fully heated) ที่มีขนาด 4 kW และการวางขดลวดความร้อนกระจายแบบเป็นจุดยังมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนใกล้เคียงกับกับแบบวางขดลวดความร้อนวางตัวเต็มผิวหน้าอีกด้วย ดังรูปภาพที่ 12



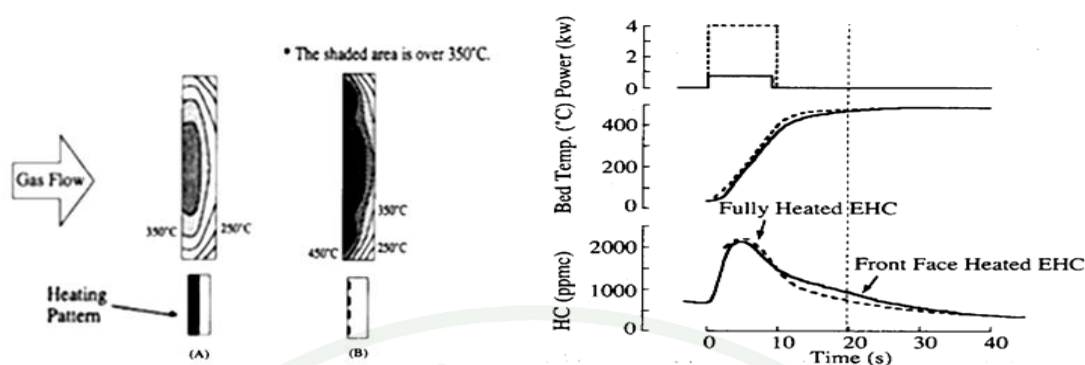
ภาพที่ 10 แสดงปริมาณ HC ที่ออกมาในช่วง Cold start (ช่วง 60 วินาทีแรกนับตั้งแต่เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์) โดย Engine-out คือ จุดวัด HC ก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ส่วน Tail-pipe คือ จุดวัด HC หลังออกจากแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: Yaegashi *et al.* (1994)



ภาพที่ 11 แสดงอุณหภูมิและพลังงานของระบบท่อไอเสียที่เวลา 20 วินาทีหลังจากเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์

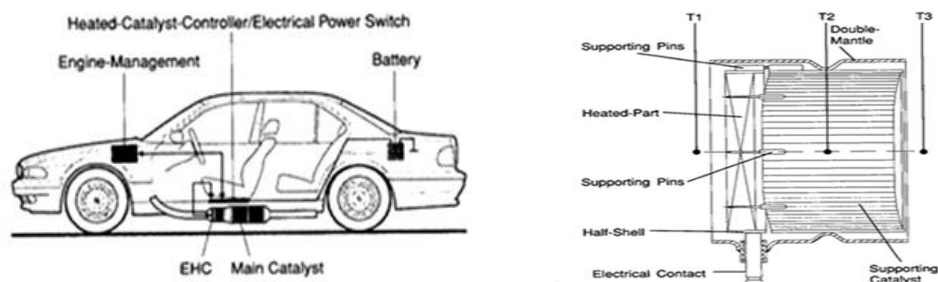
ที่มา: Yaegashi *et al.* (1994)



ภาพที่ 12 ภาพแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวางขดลวดแบบ Fully Heated (A) กับแบบ Front Face Heated (B) โดยภาพทางด้านซ้ายเป็นการเปรียบเทียบการกระจายความร้อนส่วนภาพทางด้านขวาเป็นการเปรียบเทียบการขกอุณหภูมิของขดลวดความร้อน

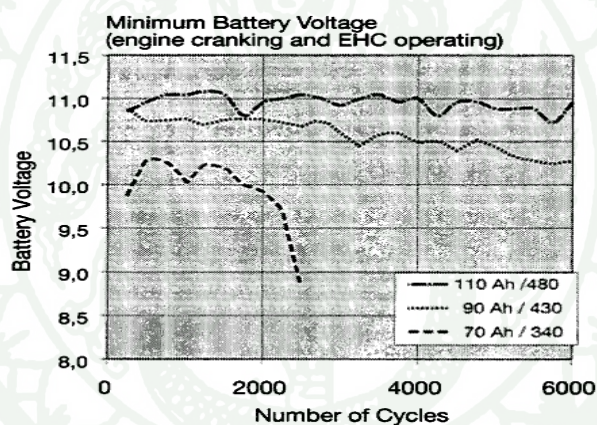
ที่มา: Yaegashi *et al.* (1994)

Pfalzgraf *et al.* (1995); Hanel *et al.* (1996, 1997) บริษัท BMW ได้นำ EHC มาติดตั้งในรถยนต์ และนำออกจำหน่ายเพื่อการพาณิชย์ ในรุ่น ALPINA B12 ดังภาพที่ 13 รูปแบบเครื่องยนต์เป็นแบบ V 12 ขนาด 5,650 ซีซี. โดยใช้ EHC ขนาด 2.0 kW ใช้ไฟจากแหล่งจ่ายไฟแบตเตอรี่ 12 V/110 Ah ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแบตเตอรี่ขนาด 110 Ah สามารถจ่ายกระแสไฟได้คงที่ มี Voltage drop ที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับขนาด 70 Ah และ 90 Ah และมีอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยมากกว่า 5,000 cycles หรือเปรียบได้กับอายุการใช้งานประมาณ 4 ปี ดังรูปภาพที่ 14 โดยการใช้งาน EHC นั้นจะใช้งานเฉพาะในช่วง Cold start (อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่า 40°C) โดยเปิด EHC ใช้งานประมาณ 100 วินาที ผลที่ได้พบว่าสามารถลดมลพิษได้มากกว่า 80% เมื่อเทียบกับไม่ได้ใช้ EHC โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ MVEG II (เป็นการจำลองสถานะการขับขี่ของรถยนต์ในห้องทดสอบเพื่อเป็นมาตรฐานในการทดสอบรถยนต์ของกลุ่มสหภาพยุโรปในสมัยนั้น) ดังรูปภาพที่ 15 และยังได้ทำการทดสอบจำลองสถานะอากาศในห้องทดสอบให้มีอุณหภูมิ -7°C (โดยอุณหภูมิของอากาศในห้องทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแบบ MVEG II จะถูกควบคุมอยู่ที่ประมาณ 20°C) พบว่าเมื่ออุณหภูมิภายนอกเครื่องยนต์ลดต่ำลงมลพิษที่ออกมาจะมีค่าเกินมาตรฐานมลพิษ EURO II ที่กำหนดเนื่องจากแก๊สไดออกไซด์คอนเวอร์เตอร์ถึงจุดอุณหภูมิการทำงานได้ยากขึ้นมากกว่าเดิมเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้องทดสอบที่ 20°C แต่เมื่อมีการเปิดให้ EHC ทำงานจะสามารถช่วยลดมลพิษลงได้ โดยสามารถลด HC + NO_x ลงได้ 52% และสามารถลด CO ลงได้ 80% เมื่อเทียบกับมาตรฐานมลพิษ EURO II ดังรูปภาพที่ 16



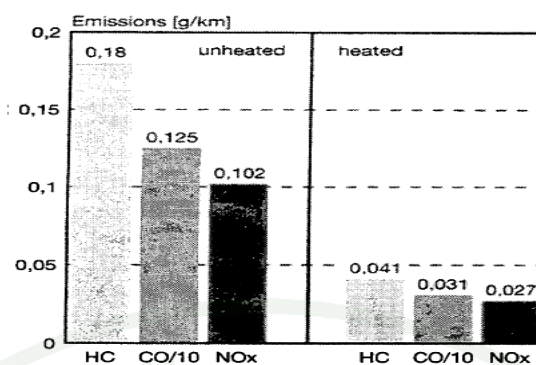
ภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง EHC ในรถ BMW ALPINA B12 (ซ้าย) และภาพตัดขวางแสดง EHC ที่ใช้ในรถ BMW ALPINA B12 (ขวา)

ที่มา: Hanel *et al.* (1996)



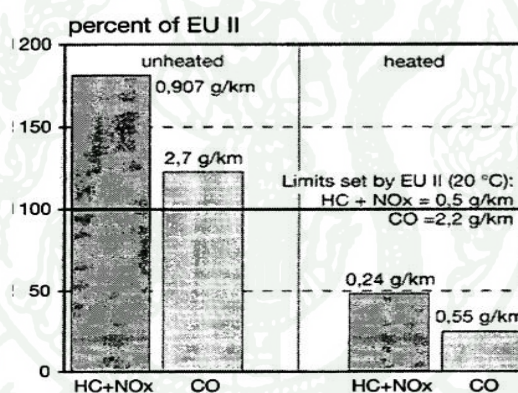
ภาพที่ 14 แสดง Battery Voltage ของแบตเตอรี่ขนาดต่างๆ

ที่มา: Hanel *et al.* (1997)



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบมลพิษที่ออกมาระหว่างการใช้ EHC และไม่ใช่ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบ MVEG II ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20 °C

ที่มา: Hanel *et al.* (1997)



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบมลพิษที่ออกมาระหว่างการใช้ EHC และไม่ใช่ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบ MVEG II ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ -7 °C

ที่มา: Hanel *et al.* (1997)

Kubsh and Brunson (1996) ได้ศึกษาการใช้ EHC ในการลดปริมาณ HC ที่ออกมาพร้อมกับไอเสียในช่วง Cold start กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ โดยได้ทำการทดสอบดูการกระจายตัวให้ความร้อนของ EHC ที่มีความหนาแน่น 2 ขนาดคือ ความหนาแน่นต่ำ (160 cpsi) และความหนาแน่นสูง (400 cpsi) ผลปรากฏว่าความหนาแน่นของ EHC ขนาด 160 cpsi ความร้อนสามารถกระจายตัวได้เต็ม (100%) พื้นผิวสัมผัสและ ส่วนความหนาแน่นขนาด 400 cpsi พื้นผิวสัมผัสได้รับความร้อนเพียง 84% และ EHC ความหนาแน่นขนาด 160 cpsi มีความดันไอเสีย

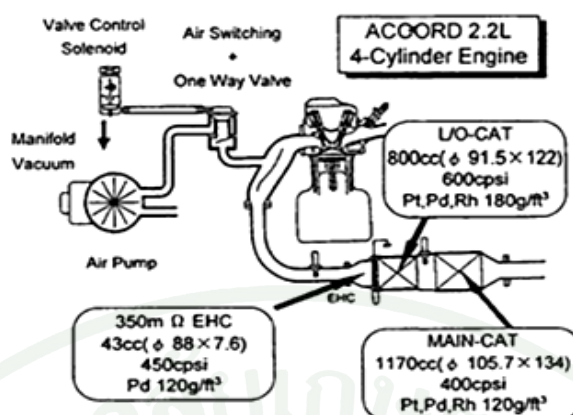
ย้อนกลับ (Backpressure) น้อยกว่าขนาด 400 cpsi และยังสามารถทำการออกแบบรูปแบบ EHC อีกสองรูปแบบคือ แบบก้นหอย (Spiral) และแบบจุด (Hot spot) ดังรูปภาพที่ 17 ผลที่ได้คือการออกแบบ EHC เป็นแบบ Spiral และแบบ Hot spot จะช่วยลดปริมาณความต้องการพลังงานเหลือ 0.75-1 kW เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเต็มพื้นผิว (Full face) ที่ใช้พลังงาน 2-2.5 kW และเมื่อมีการใช้ EHC ปริมาณมลพิษที่ออกมากับไอเสียจะลดลงมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับไม่ได้ใช้



ภาพที่ 17 แสดงรูป EHC จัดเรียงตัวแบบ Spiral (ซ้าย) และ EHC จัดเรียงตัวแบบ Hot spot (ขวา)

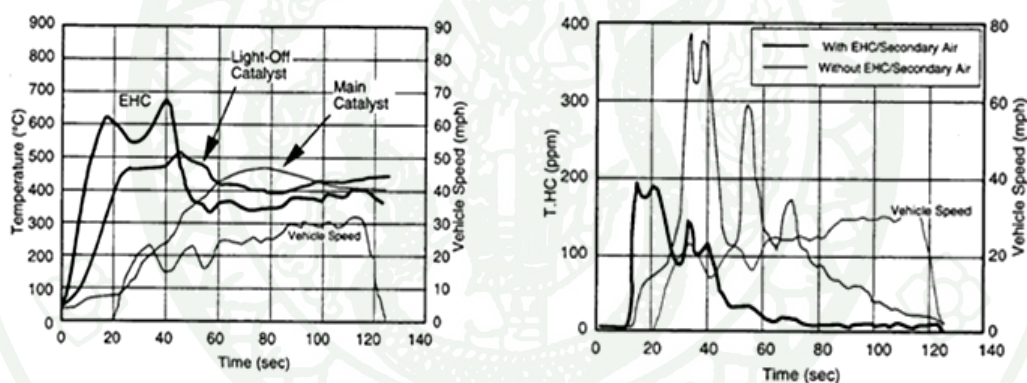
ที่มา: Kubsh and Brunson (1996)

Shimasaki *et al.* (1996, 1997) ได้ทำการทดสอบระบบ EHC กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ 4 สูบ ขนาด 2,200 ซีซี. ได้มีการเปรียบเทียบแหล่งจ่ายไฟให้กับ EHC สองแหล่งคือ อัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์ (Alternator Powered EHC, APEHC) กับแบตเตอรี่ (Battery Powered EHC, BPEHC) ดังตารางที่ 4 แต่ในงานนี้ได้เลือกใช้ BPEHC เพราะด้านการให้พลังงานไฟฟ้า (Power supply) แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพเท่ากับอัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์แต่แบตเตอรี่ไม่ทำให้ภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในขณะสตาร์ทแต่การใช้อัลเทอร์เนเตอร์ทำให้ภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น การสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น 1% ถ้ามีการใช้ EHC โดย EHC ที่นำมาใช้มีขนาด 2.5 kW (เปิดให้ EHC ทำงาน 40 วินาทีแรกนับตั้งแต่การเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์) และได้มีการติดตั้งปั๊มเติมอากาศเข้าไปที่ระบบท่อไอเสียเพื่อช่วยเติมออกซิเจนในช่วง Cold start (เปิดใช้ปั๊มเติมอากาศ 25 วินาทีแรกนับตั้งแต่การเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์) อีกด้วย โดยรูปแบบการติดตั้งของ EHC และปั๊มช่วยเติมอากาศจะแสดงไว้ดังภาพที่ 18 จากการทดสอบพบว่าการใช้ EHC สามารถทำให้อุณหภูมิของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นได้อย่างเร็วและให้ผลดีในการช่วยลด HC ในช่วง Cold start ดังรูปภาพที่ 19



ภาพที่ 18 แสดงรูปแบบและการติดตั้ง EHC และระบบปั๊มช่วยเติมอากาศ

ที่มา: Shimasaki *et al.* (1996)



ภาพที่ 19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปิดใช้งาน EHC เป็นเวลา 40 วินาทีนับตั้งแต่การเริ่มสตาร์ท เครื่องยนต์ EHC สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ Light-Off Catalyst และ Main Catalyst เข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงาน (ซ้าย) ส่งผลให้สามารถลดปริมาณ HC ลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ใช้งาน EHC (ขวา)

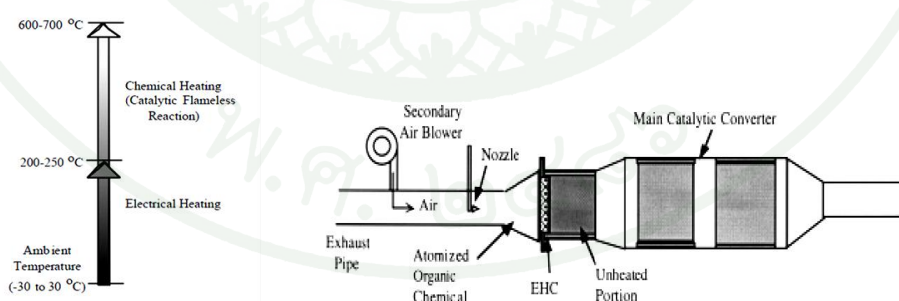
ที่มา: Shimasaki *et al.* (1997)

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแหล่งจ่ายไฟให้อัลเทอร์เนเตอร์ไฟฟ้าระหว่างอัลเทอร์เนเตอร์เครื่องยนต์กับแบตเตอรี่

แหล่งจ่ายไฟ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
อัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์ (Alternator Powered EHC, APEHC)	- แบตเตอรี่เสื่อมน้อยกว่าเพราะระบบ EHC ไม่ได้ใช้ไฟจากแบตเตอรี่ - ใช้สายไฟขนาดเล็กกว่า - Voltage drop น้อย - ประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟดีเยี่ยม - อัลเทอร์เนเตอร์สามารถจ่ายไฟให้กับ EHC ได้อย่างเพียงพอทำให้ EHC ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและมีความทนทาน	- ในช่วงรอบเดินเบาอัลเทอร์เนเตอร์ต้องทำงานหนักขึ้นทำให้มลพิษเพิ่มขึ้นและสิ้นเปลืองน้ำมันมากขึ้น - Terminal switch ทำยาก - Generation มีเสียงดังเมื่อ Voltage สูง
แบตเตอรี่ (Battery Powered EHC, BPEHC)	- ระบบเป็นแบบจ่ายไฟ 12V DC ธรรมดาทำให้ใช้งานง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน	- มีความต้องการกระแสไฟสูง (มากกว่า 200 A) ทำให้ต้องใช้สายไฟขนาดใหญ่และมีการสูญเสียพลังงานไปเยอะ - ใช้ Electric current sensor ขนาดใหญ่ ทำให้มีราคาเพิ่ม - มีปัญหาในการ Charge เก็บประจุเข้าแบตเตอรี่ - ทำให้แบตเตอรี่มีความทนทานลดลง - Voltage drop มาก

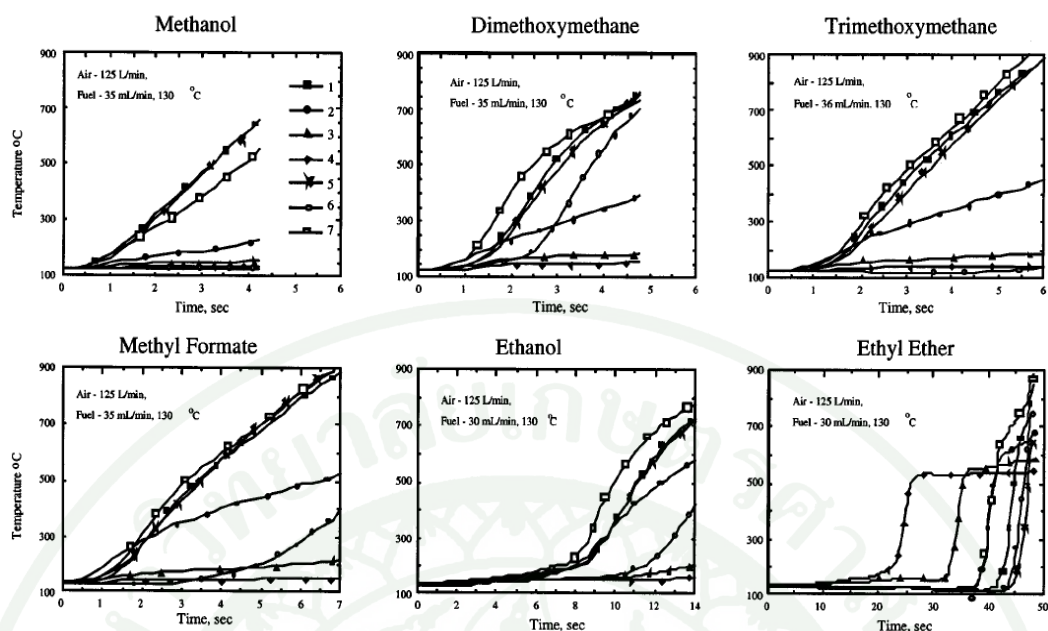
ที่มา: Shimasaki *et al.* (1996)

Murphy *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดมลพิษของไอเสียในช่วง Cold Start ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ โดยพบว่ามลพิษในช่วง Cold Start เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์และเกิดจากการที่แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่ถึงช่วงอุณหภูมิการทำงาน โดยได้ทำการติดตั้ง EHC ไว้บริเวณด้านหน้า Main Catalytic Converter เพื่อให้ความร้อนแก่ไอเสียทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ถึงช่วงอุณหภูมิการทำงานได้เร็วขึ้น โดย EHC มีขนาด 2 kW ใช้เวลาในการให้ความร้อนเป็นเวลาอย่างน้อย 20 วินาที ทำให้ไอเสียมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-250 °C หลังจากนั้นก็จะใช้วิธี Electrically Initiated Chemically Heated Catalyst (EICHHC) เป็นวิธีการฉีดสารเคมีเข้าไปเป็นการกระตุ้นไอเสียทำให้อุณหภูมิไอเสียร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 600-700 °C ดังรูปภาพที่ 20 โดยการใช้นี้ EICHHC นั้นเพื่อช่วยลดการใช้งานของแบตเตอรี่ใน EHC เพราะปัญหาของ EHC ก็คือแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จากการทดสอบสารเคมีหลายชนิด ได้แก่ Methanol, Dimethoxymethane, Trimethoxymethane, Methyl Formate, Ethanol และ Ethyl Ether จากการทดสอบพบว่า Methanol, Dimethoxymethane, Trimethoxymethane และ Methyl Formate มีคุณสมบัติในการยกความร้อนใกล้เคียงกัน ส่วน Ethanol และ Ethyl Ether จะยกความร้อนให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ เข้าสู่ Light-off Temp. ได้ช้ากว่า แต่ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้สารเคมี Methanol ซึ่งเหมาะสมในการฉีดเข้าไปมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและหาง่ายได้กว่า โดยเมื่อมีการใช้ Methanol ร่วมกับ EHC สามารถยกอุณหภูมิของไอเสียจาก 130 °C ให้สูงถึง 400 °C ภายในระยะเวลา 2.5 วินาที ดังรูปภาพที่ 21 โดยการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 125 L/min และอัตราการไหลของ Methanol ที่ถูกฉีดเข้าไปอยู่ที่ 35 mL/min โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิจะแสดงไว้ดังภาพที่ 22



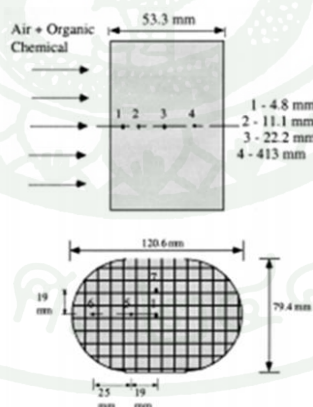
ภาพที่ 20 แสดงลำดับขั้นตอนในการยกอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นโดยใช้วิธี EICHHC (ซ้าย) และรูปแสดงการติดตั้งระบบ EICHHC ในระบบไอเสียของรถยนต์ (ขวา)

ที่มา: Murphy *et al.* (1999)



ภาพที่ 21 แสดงถึงความสามารถในการยกอุณหภูมิของสารเคมีชนิดต่างๆที่ถูกฉีดเข้าไปใน
แก๊สไดคัลคอนเวอร์เตอร์เพื่อยกอุณหภูมิของไอเสีย โดยเส้นต่างๆ จะแสดงถึงจุด
ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในฮีทเตอร์

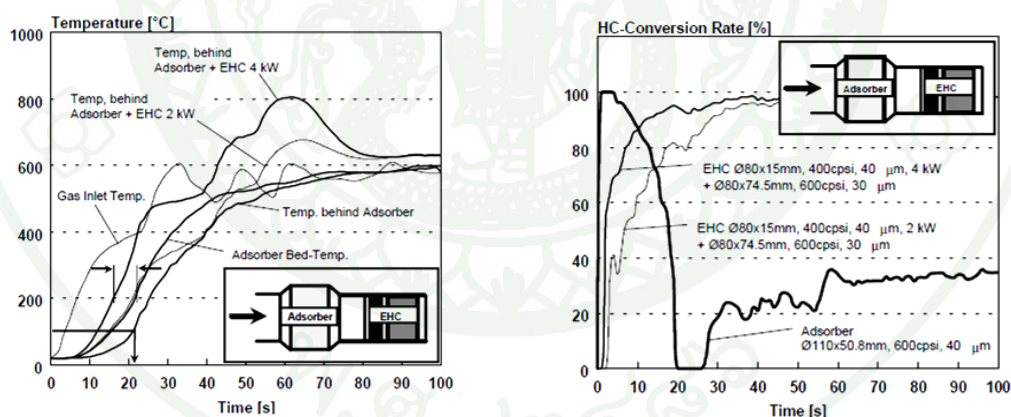
ที่มา: Murphy *et al.* (1999)



ภาพที่ 22 แสดงถึงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแก๊สไดคัลคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: Murphy *et al.* (1999)

Brück *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณสารพิษของไอเสียในช่วง Cold Start พบว่า HC จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสตาร์ทจึงได้มีนำ EHC ขนาด 4 kW และ 2 kW มาใช้ทดสอบว่า EHC ขนาดใดจะสามารถช่วยลดปริมาณสารพิษของไอเสียในช่วง Cold Start ได้ดีที่สุด โดยให้ EHC ทำงานเป็นเวลา 60 วินาที นับจากเครื่องยนต์สตาร์ทผลปรากฏว่า EHC ขนาด 4 kW สามารถลด HC ลงได้ 83% ส่วน EHC ขนาด 2 kW สามารถลด HC ลงได้ 65% นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบความหนาแน่น (Cell densities) ของ EHC พบว่าขนาดเซลล์ที่มีความหนาแน่นสูง (800 cps) จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเซลล์ที่มีความหนาแน่นต่ำ (400 cps) แต่ข้อเสียของ EHC คือมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากและมีราคาแพง จึงได้มีการติดตั้ง Absorber (HC traps) ไว้บริเวณด้านหน้าของ EHC ทำหน้าที่เพื่อดัก HC มากักเก็บไว้ในตัวของ Absorber เองจนมาถึงจุดๆหนึ่งที่ HC มากพอจึงเดินเครื่องยนต์ในสภาวะแบบ rich condition ทำให้ Absorber ปลดปล่อย HC ออกมาเพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า EHC เพื่อลดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของ EHC ในการทำความร้อนและทำให้ EHC มีอายุการใช้งานยาวนานเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยเมื่อ Absorber ปลดปล่อย HC ออกมาหมดแล้วเครื่องยนต์จะกลับไปเดินเครื่องในสภาวะปกติแบบเดิมจึงทำให้ Absorber ดัก HC กลับมาเก็บไว้ดังเดิมเพื่อนำมาใช้ในครั้งต่อไปสังเกตได้จากปริมาณ HC ที่กลับมาเพิ่มมากขึ้น ดังรูปภาพที่ 23



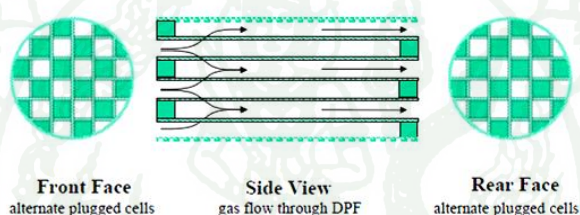
ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง EHC 4 kW, 2 kW และ Absorber ในการยกอุณหภูมิของไอเสีย (ซ้าย) และแสดงการเปรียบเทียบ HC-Conversion Rate ของ EHC 4 kW, 2 kW และ Absorber (ขวา)

ที่มา: Brück *et al.* (1999)

5.2 การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ในเครื่องยนต์ดีเซลจะติดตั้ง Electrical heater คู่กับ Diesel Particulate Filters (DPF) เป็นวิธีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มความร้อนให้กับ DPF เพื่อช่วยในการเผาไหม้ (Soot) ที่ติดอยู่ใน DPF ให้หมดไป

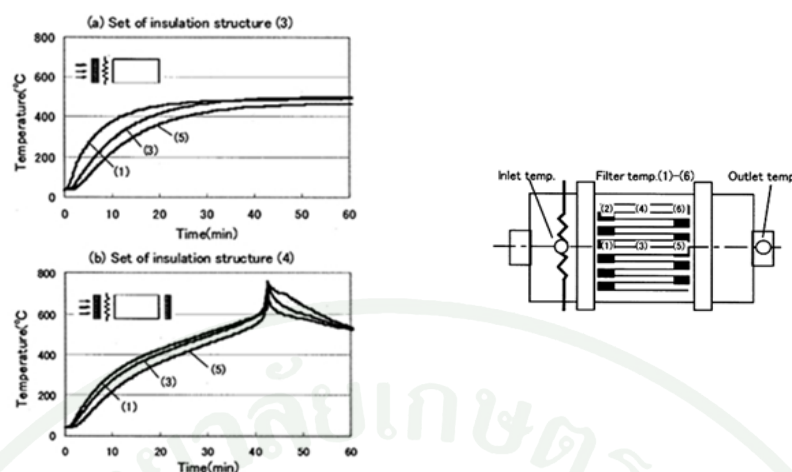
Diesel Particulate Filters (DPF) เป็นอุปกรณ์ดักมลพิษอนุภาค (Particulate Matter, PM) โดย DPF นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษอนุภาคในไอเสียได้มากถึง 99% (Guo *et al.*, 2003) โดยที่มลพิษอนุภาคนั้นจะติดไฟเผาตัวมันเองใน DPF เมื่ออุณหภูมิของไอเสียมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 650°C (Konstandopoulos *et al.*, 2005) โดยลักษณะของ DPF จะแสดงไว้ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงลักษณะการทำงานของ DPF

ที่มา: Guo *et al.* (2003)

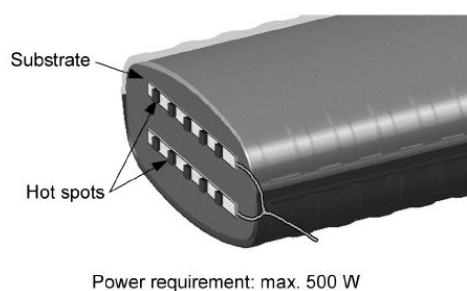
Ohno *et al.* (1999) ได้มีการนำฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 700 W กับฉนวนกันความร้อนประเภท Codierite ceramic foam เข้ามาใช้ร่วมกับ SiC Diesel Particulate Filters (SiC-DPF) ซึ่งฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะติดตั้งไว้บริเวณทางเข้าของ DPF เพื่อช่วยเพิ่มความร้อนให้กับ SiC-DPF ส่วนฉนวนกันความร้อนจะช่วยในการรักษาอุณหภูมิที่ออกมาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยให้เกิดการสูญเสียความร้อนกับสิ่งแวดล้อมน้อยลงโดยได้มีการเปรียบเทียบระหว่างการนำฉนวนกันความร้อนวางไว้ด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวกับการวางฉนวนกันความร้อนไว้ทั้งด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าและด้านหลัง SiC-DPF พบว่าเมื่อมีการนำฉนวนกันความร้อนมาวางไว้ทั้งด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าและด้านหลัง SiC-DPF จะสามารถช่วยขกอุณหภูมิได้มากกว่าการวางฉนวนกันความร้อนไว้ด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 แสดงถึงอุณหภูมิของไอเสียเมื่อมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าไว้บริเวณด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอันเดียว (a) แสดงอุณหภูมิของไอเสียเมื่อมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าไว้บริเวณด้านหน้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าและด้านหลัง SiC-DPF (b) โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายใน SiC-DPF จะแสดงไว้ดังภาพด้านขวา

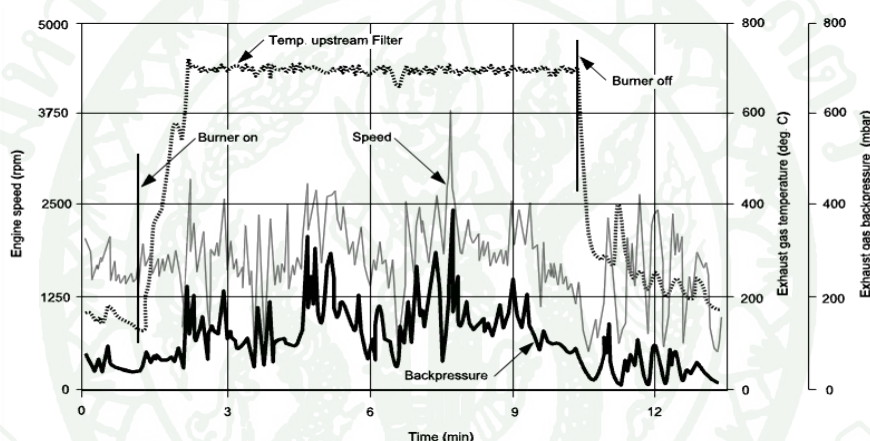
ที่มา: Ohno *et al.* (1999)

Ranalli *et al.* (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการขจัดเขม่าในเครื่องยนต์ดีเซล โดยพบว่าในช่วงความเร็วรอบต่ำ ช่วงรอบเดินเบาและช่วงการขับขึ้นในเมืองที่เป็นการขับๆหยุดๆ ไอเสียที่ออกมาจะมีอุณหภูมิค่าอยู่ที่ประมาณ 150°C ทำให้เขม่า (Soot) ไม่ถึงจุดที่ Regenerate ตัวของมันเอง จึงได้มีการใช้ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของรถยนต์นำมาติดตั้งบริเวณด้านหน้าของ DPF ดังรูปภาพที่ 26 เข้ามาช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อให้ DPF ทำงานได้ดี โดยจะให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เขม่าสามารถเผาไหม้ตัวเองได้ที่ประมาณ 600°C จนถึงอุณหภูมิ 800°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่มีเขม่าหลงเหลืออยู่ใน DPF เพราะโดนเผาไหม้จนเกือบหมด โดยตรวจสอบได้จาก Backpressure ของไอเสียที่ออกมาหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังรูปภาพที่ 27



ภาพที่ 26 แสดงรูปแบบการติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าด้านหน้า DPF

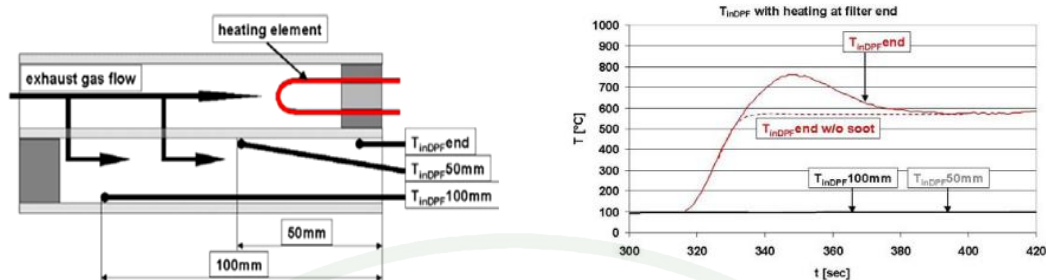
ที่มา: Ranalli *et al.* (2001)



ภาพที่ 27 แสดง Backpressure ที่ลดลงเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ที่มา: Ranalli *et al.* (2001)

Wagner *et al.* (2005) ได้ศึกษาการลดเขม่าและ NO_x ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่เครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีข้อเสียอยู่ที่การกำจัดเขม่าและ NO_x ถ้ามีการลด NO_x ในระหว่างการเผาไหม้ก็จะทำให้มีเขม่าออกมามากขึ้น จึงได้มีการนำฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้ามาติดตั้งไว้บริเวณหน้า DPF เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดทำให้เขม่าที่มีอยู่นั้นติดไฟเผาตัวมันเอง โดยจะทำในช่วงที่ไอเสียมีอุณหภูมิต่ำมากๆ เช่น ในช่วงรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ (Idle speed) หรือช่วงภาระการทำงานต่ำ (Low load) โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดขนาด 0.6 mm. และมีความต้านทาน 5 Ω/m โดยต้องทำความร้อนให้อุณหภูมิเกิน 600 °C เขม่าที่มีอยู่ถึงจะโดนเผาไหม้หมด ดังภาพที่ 28 ผลจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าพบว่าต้องใช้น้ำมันที่เพิ่มมากขึ้นจากเดิม 0.155%



ภาพที่ 28 แสดงถึงตำแหน่งในการติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าใน DPF (ซ้าย) และภาพแสดงถึงระยะเวลาในการเผาไหม้ของฮีตเตอร์ใน DPF ลูกที่มีเขม่าเปรียบกับ DPF ลูกที่ไม่มีเขม่า (ขวา)

ที่มา: Wagner *et al.* (2005)

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยจากผลงานต่างๆ ที่ผ่านมามีการนำฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาใช้คู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์นั้นสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ดียิ่งขึ้นในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซลทำให้มลพิษที่ออกมานั้นลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว แต่งานวิจัยทั้งหลายนั้นยังไม่มี การนำฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาใช้ในการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม การออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนซึ่งเป็นมลพิษหลักที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมต้องทำให้ไอเสียที่ออกมามีอุณหภูมิสูง (มากกว่า 400°C ขึ้นไป) จึงจะทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทำงานจึงสามารถออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนได้ การนำฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์มาใช้ลดก๊าซมีเทนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจึงเป็นประเด็นหลักที่ต้องทำการวิจัยและศึกษา เพื่อพัฒนาความรู้ในด้านการลดมลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์เชื้อเพลิงทางเลือกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องยนต์ทดสอบ

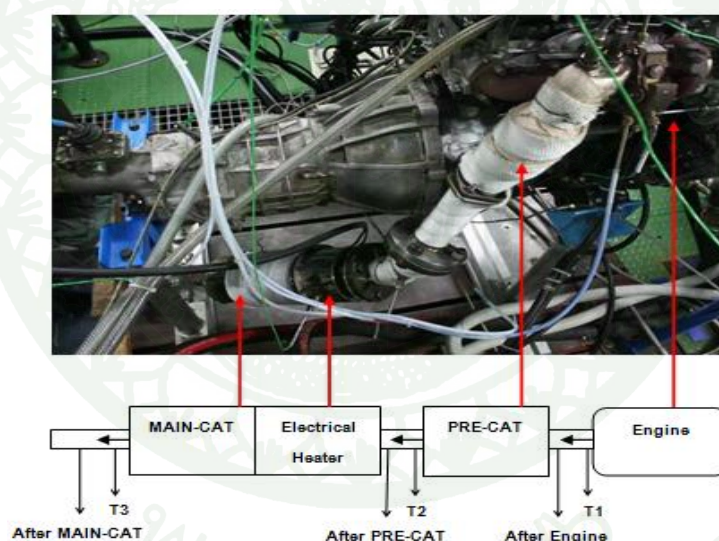
เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ของ TOYOTA รุ่น 2KD-FTV เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบฉีดตรงขนาด 2.5 ลิตร จำนวน 4 สูบ 4 จังหวะ ลักษณะฝาสูบแบบ DOHC 16 วาล์ว เทอร์โบชาร์จ ระบบจ่ายน้ำมันดีเซลแบบปั๊ม Commonrail ที่สามารถควบคุมแรงดัน ตำแหน่ง เวลาการฉีด (Injection Timing) ระยะเวลาการฉีด (Injection Duration) รวมทั้งจำนวนครั้งของการฉีดเข้าแทนที่ระบบเดิมของเครื่องยนต์ และติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติแบบหัวฉีดให้กับเครื่องยนต์ โดยควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซและน้ำมันด้วยการปรับเวลาการเปิดของหัวฉีดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mototune โดยข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 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. แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ในการศึกษาครั้งนี้ระบบบำบัดไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะประกอบไปด้วยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) สองลูกตำแหน่งติดตั้งจะแสดงไว้ดังภาพที่ 29 ซึ่งแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองลูกนี้ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานแยกกัน แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกแรกหรือเรียกว่า “PRE-CAT” เป็นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องยนต์ 2KD-FTV แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกนี้จะเคลือบแต่สาร Pt เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียวมีหน้าที่ลดมลพิษจำพวก HC และ CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์และเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียผ่านทางปฏิกิริยาออกซิเดชันของ HC ส่วนแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกที่สองหรือเรียกว่า “MAIN-CAT” ภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ลูกนี้จะเคลือบสาร Pt และ Pd เป็นสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ในการลด CH_4 โดยรายละเอียดของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองลูกจะแสดงไว้ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 29 แสดงการติดตั้งระบบไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

หมายเหตุ: T1 คือ จุดวัดอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า PRE-CAT, T2 คือ จุดวัดอุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก PRE-CAT, T3 คือ จุดวัดอุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก MAIN-CAT, After Engine คือ จุดวัดปริมาณมลพิษก่อนเข้า PRE-CAT, After PRE-CAT คือ จุดวัดปริมาณมลพิษหลังออกจาก PRE-CAT และ After MAIN-CAT คือ จุดวัดปริมาณมลพิษหลังออกจาก MAIN-CAT

ตารางที่ 7 ข้อมูลจำเพาะของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

Parameter Designation	1 st DOC (PRE-CAT)	2 nd DOC (MAIN-CAT)
Cell Per Square Inch (CPSI)	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 ³)	14	165

โดยในงานวิจัยนี้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และ MAIN-CAT ถือเป็นตัวแปรควบคุมอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากงานวิจัยนี้ดำเนินการติดตั้งของ PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่นำมาติดคู่กับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์นั้นจะถูกควบคุมการทำงานโดยตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) บนโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6 โดยนำอุณหภูมิโอเลียมที่วัดหลังจากออกจากฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาผ่านตัวควบคุมข้างต้นเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่ช่วยยกอุณหภูมิโอเลียมก่อนเข้า MAIN-CAT ไปที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C ซึ่งการที่ติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่บริเวณก่อนทางเข้าของ MAIN-CAT เนื่องจาก MAIN-CAT นั้นเป็นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดปริมาณ CH₄ โดยเฉพาะ เนื่องจากการเคลือบสาร Pd ไว้เป็นปริมาณที่มากกว่า Pt ทำให้ค่า LT ในการลดปริมาณ CH₄ ของ MAIN-CAT นั้นจะต่ำกว่า PRE-CAT ซึ่งเป็นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่เคลือบแต่สาร Pt ไว้เพียงอย่างเดียวซึ่งไม่เหมาะต่อการลด CH₄ เนื่องจากเห็นผลช้ากว่า MAIN-CAT โดยกำหนดให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเริ่มทำงานเมื่อผ่านไป 30 วินาที ซึ่งฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นชนิดเส้นตรงนำมาดัดเป็นขดวงกลมเพื่อให้เหมาะสมกับการวางบริเวณหน้า MAIN-CAT มีกำลังไฟฟ้าขนาด 3 kW ใช้ไฟกระแสสลับ (AC) แรงดันไฟฟ้า 110 V ซึ่งจะแสดงไว้ดังภาพที่ 30 ระบบไฟฟ้าก่อนเข้าฮีตเตอร์นั้นจะมีการติดตั้งชุดหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 110 V เพื่อให้เหมาะสมต่อการทำงานของฮีตเตอร์ หลังจากผ่านการแปลงไฟแล้วจะมีตัว Solid State Relay เป็นอุปกรณ์เปิดปิดกระแสไฟฟ้าก่อนเข้าฮีตเตอร์โดยนำสัญญาณการเปิดปิดมาจากโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6



ภาพที่ 30 แสดงรูปแบบของฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

4. เครื่องวิเคราะห์มลพิษไอเสีย (Exhaust Gas Emissions Analysis)

4.1 Exhaust gas dilution system

ปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษในไอเสียของการทดสอบในงานวิจัยนี้ ถูกวัดโดยชุดเครื่องวิเคราะห์มลพิษไอเสีย Horiba MEXA-7100DEGR ที่ผลิตโดยบริษัท Horiba โดยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Horiba MEXA-7100DEGR นี้ประกอบด้วย

Nondispersive Infrared analyzer (NDIR) ที่ใช้วัดค่า คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ใช้หลักการที่ว่า แก๊สแต่ละชนิดจะดูดซับรังสีอินฟราเรด (Infrared) ได้ไม่เท่ากัน ดังนั้น สารต่างชนิดกันจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างกัน โดยผลต่างของความสามารถในการดูดซับรังสีอินฟราเรดจะถูกคำนวณโดย Gas detector ในรูป Voltage แล้วเปลี่ยนเป็นค่าที่วัดได้ต่อไป

Flame Ionization Detector (FID) เป็นเครื่องมือวัดความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (Unburned hydrocarbon) โดยใช้หลักการเผาไหม้กับไฮโดรเจนบริสุทธิ์กับอากาศ เปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ไฮโดรเจนจะทำให้คาร์บอนอะตอมเกิดการแตกตัวเป็น Ion +/- ออกมา Ion +/- ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนของคาร์บอนอะตอม ซึ่งจะวัดด้วย FID ผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ HC เมื่อเทียบกับ Span gas ก็จะถูกอ่านค่าออกมา สำหรับงานวิจัยนี้เครื่องวัดมลพิษสามารถตรวจจับปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ได้สองลักษณะคือ ปริมาณไฮโดรคาร์บอนโดยรวม (Total Hydrocarbon; THC) และปริมาณไฮโดรคาร์บอนเฉพาะมีเทน (CH_4) วิธีการวัดปริมาณมีเทนแยก

จากไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นคือ เครื่องวิเคราะห์มลพิษจะแยกไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นออกไปให้เหลือแต่มีเทนก่อนที่จะให้ FID ตรวจจับปริมาณ

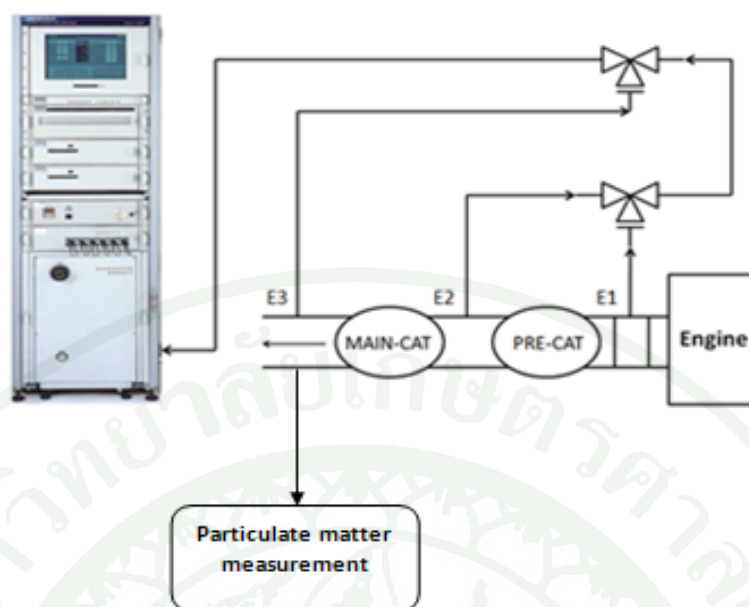
Chemiluminescence Detector (CLD) เป็นเครื่องวิเคราะห์วัดปริมาณมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่ง NO_x ในที่นี้จะหมายถึง Nitrogen oxide (NO) และ Nitrogen dioxide (NO_2) หลังการทำงานของ CLA คือ Photo diode จะทำการตรวจจับแสงที่เปล่งออกจาก NO_2 ที่เปลี่ยนสถานะจากสถานะถูกกระตุ้น (Excited state) มาอยู่ในสถานะเสถียร (Ground state) ซึ่งความเข้มของแสงดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของมลพิษที่มีอยู่ โดยทั่วไปแล้ว NO_2 ที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง NO กับ Ozone (O_3) ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และออกซิเจน (O_2) ตามสมการที่ 13



ดังนั้นเพื่อให้สามารถวัดปริมาณ NO_2 ที่ออกจากเครื่องยนต์ได้ด้วยนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยน NO_2 ให้เป็น NO ก่อน ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่ Catalytic Converter ภายใน CLA ซึ่งการรายงานผลการตรวจวัดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนในงานวิจัยนี้จึงเป็นการกล่าวโดยรวมทั้ง NO และ NO_2

สารมลพิษจากไอเสียที่ได้จากการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จะถูกดูดผ่านชุด Heated filter และ Heated line ที่รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 190°C เพื่อป้องกันไอเสียที่ดูดเข้ามากลั่นตัวเป็นหยดน้ำ

โดยในการทดลองนี้จะทำการวัดปริมาณมลพิษในไอเสียจำนวน 3 จุดในบริเวณที่แตกต่างกัน จุดที่หนึ่งคือ หลังออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (After Engine) จุดที่สองคือ หลังจากผ่าน PRE-CAT (After PRE-CAT) และจุดที่สามคือ หลังจากผ่าน MAIN-CAT (After MAIN-CAT) ตำแหน่งการวัดจะแสดงไว้ดังภาพที่ 31

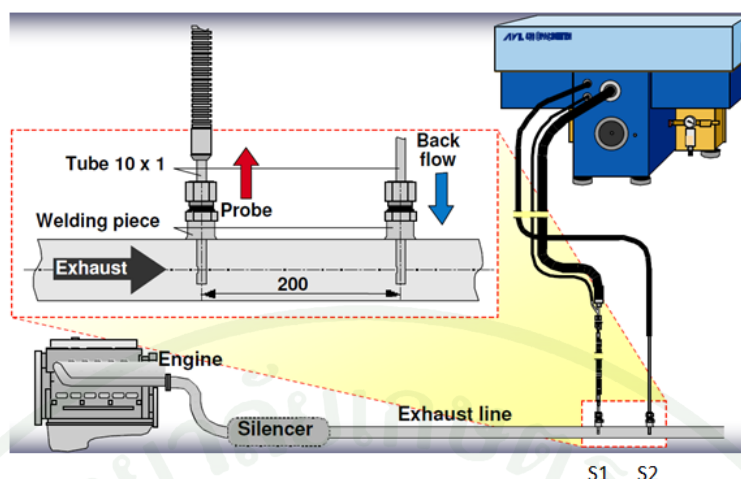


ภาพที่ 31 แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณมลพิษและวงจรของสาย Sampling Line ก่อนเข้าเครื่องมือวัดไอเสีย HORIBA MEXA 7100DEGR และ Opacimeter 439

ที่มา: อนิรุทธิ์ (2554)

4.2 Particulate matter measurement

Opacimeter 439 เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือวัดมลพิษอนุภาคโดยวัดความหนาแน่นของแสงตามวิธีการของ Beer-Lambert ซึ่งสามารถหาปริมาณของมลพิษอนุภาคโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Opacity และ FSN (AVL, 2005) โดยการตรวจวัดปริมาณเขม่าควันโดยการส่องแสงผ่านเข้าไปในควันไอเสียแล้ววัดความเข้มของแสงที่ผ่านออกมา ซึ่งความเข้มแสงจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเขม่าควัน นอกจากนี้ Opacimeter 439 สามารถวัดได้ทั้ง Black smoke (C), Blue smoke (HC) และ White smoke (H_2O) ได้ โดยตำแหน่งการวัดมลพิษอนุภาคนั้นจะวัดที่บริเวณหลังจากผ่าน MAIN-CAT (After MAIN-CAT) แสดงไว้ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แสดงการติดตั้งที่ท่อไอเสียของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดของ Opacimeter 439

ที่มา: AVL (2005)

5. ไดนาโมมิเตอร์และหน่วยควบคุม

ไดนาโมมิเตอร์และหน่วยควบคุมเครื่องยนต์ทดสอบ ผลิตโดย บริษัท เอวีแอล ออโตโมทีฟ ถูกติดตั้งเข้ากับไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสตรง (DC Dynamometer) กำลังขับไม่เกิน 220 kW ที่สามารถเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ได้ในตัว กล่าวคือจะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงในขณะที่สตาร์ทและเครื่องยนต์ทำงานแบบ Motoring ด้วยหลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดซึ่งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงกระทำขึ้นบนขดลวดและทำให้ขดลวดนั้นเคลื่อนที่ เครื่องยนต์ที่ถูกติดตั้งบนแกนเดียวกันกับขดลวดก็หมุนตาม ในทางกลับกันไดนาโมมิเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ เมื่อต้องการใช้เป็นภาระของเครื่องยต์ ด้วยหลักการเครื่องยต์ส่งกำลังไปขับขดลวดตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงขึ้นแล้วต่อเข้ากับอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ส่งกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายต่อไป

6. ระบบหล่อเย็น

ระบบหล่อเย็นของเครื่องยนต์ทดสอบเป็นแบบวงจรปิด น้ำหล่อเย็นที่ออกจากเครื่องยนต์จะถูกส่งเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ที่มีน้ำหล่อเย็นจากภายนอกอุณหภูมิ 30-40 °C มาเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นได้ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์โดยผ่านฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำให้เข้าเครื่องยนต์ที่ 85 °C เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ดังนั้นระบบจะติดตั้ง Thermocouple เพื่อส่งค่าไปเป็น Feedback control ให้กับ PID และแสดงผลไปยังหน่วยควบคุม

7. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำมันดีเซล

เครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการจ่ายน้ำมันดีเซลให้กับเครื่องยนต์ หรือเครื่องวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลคือ AVL 733 Fuel Balance ที่ผลิตโดย บริษัท เอวีแอล ออโตโมทีฟ เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงโดยอาศัยพื้นฐานตามหลักการของแรงโน้มถ่วง ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์จะอ่านค่าจากน้ำหนักที่ลดลงของ vessel ที่จับค่าโดย capacitive sensor เทียบกับมวลมาตรฐาน

8. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซธรรมชาติ

การวัดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติให้กับเครื่องยนต์ ในงานวิจัยนี้คือ Micro Motion Compressed Natural Gas meters รุ่น CFM010M ซึ่งเป็นรุ่นที่เหมาะสมกับการวัดในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 108 kg/h ผลิตโดย บริษัท EMERSON Process Management โดยเครื่องมือวัดที่ใช้ใช้วัดการไหลเชิงมวล และความหนาแน่นของก๊าซธรรมชาติโดยตรง จึงสามารถอ่านค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอุณหภูมิได้ ความแม่นยำของการวัดเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลเชิงมวลของของไหล ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิการทำงาน ความดัน และส่วนประกอบของสาร อย่างไรก็ตาม ความดันตกคร่อมของของไหลที่ผ่านเซนเซอร์จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทั้งสาม เมื่อก๊าซธรรมชาติไหลผ่านเซนเซอร์

วิธีการ

1. ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการใช้อีเทอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ในการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม มีอยู่หลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเช่น อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ปริมาณก๊าซออกซิเจน (Lambda) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) เป็นต้น (Noipheng *et al.*, 2011) โดยปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเทอร์ไฟฟ้าในการช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสีย ฉะนั้นปัจจัยต่างๆควรที่จะมีการควบคุมให้มีความเหมาะสมในการทำงานที่สภาวะนั้นเพื่อให้อีเทอร์ไฟฟ้าทำงานเต็มประสิทธิภาพมากที่สุด

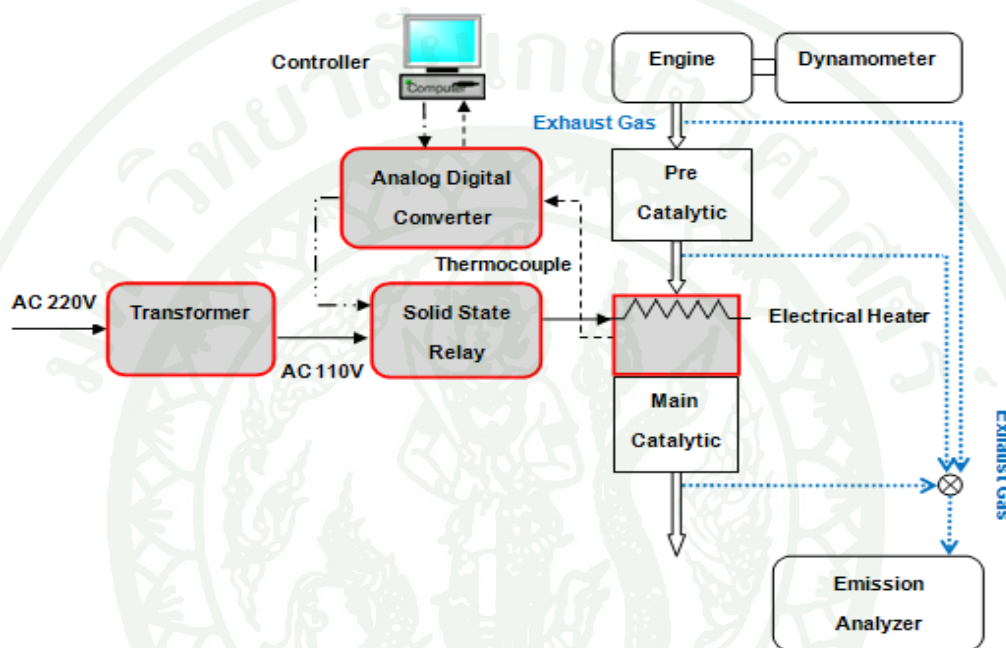
2. การติดตั้งเครื่องยนต์ทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบ

2.1 ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องยนต์ TOYOTA 2KD-FTV นั้นโดยพื้นฐานแล้วเป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานแบบเชื้อเพลิงร่วม ระหว่างน้ำมันดีเซลกับก๊าซธรรมชาติได้ จึงได้ทำการติดตั้งชุดจ่ายก๊าซที่ประกอบด้วย ชุดหัวฉีด และ เรกูเลเตอร์ลดแรงดัน (หม้อต้ม) ที่ใช้น้ำหล่อเย็นจากเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิ 85 °C ไหลผ่านเพื่อให้ความร้อนป้องกันไม่ให้ก๊าซที่ถูกลดแรงดันเย็นตัวจนเป็นน้ำแข็งทำให้ท่อจ่ายก๊าซอุดตัน โดยที่ตัวหม้อต้มมีโซลินอยด์ไฟฟ้าสำหรับตัดการจ่ายก๊าซด้วย ก่อนที่ก๊าซธรรมชาติจะไหลเข้าสู่หม้อต้มนั้นจะถูกลดแรงดันในขั้นแรกก่อน กล่าวคือ ก๊าซธรรมชาติจากแหล่งจ่ายที่มีความดัน 200 bar ถูกลดแรงดันด้วย ตัวควบคุมแรงดันแบบไดอะแฟรมให้เหลือ 30 bar ก่อนที่จะไหลผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Micro motion) เพื่อความแม่นยำของการวัดอัตราการไหลเชิงมวล และเข้าสู่หม้อต้มต่อไป สำหรับหัวฉีดก๊าซถูกติดตั้งให้ฉีดก๊าซเข้าท่อร่วมไอดีเพื่อผสมกับอากาศ การควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซลสามารถควบคุมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mototune

2.2 ติดตั้งระบบฮีเตอร์ไฟฟ้า

ระบบฮีเตอร์ไฟฟ้านั้นจะถูกติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้า MAIN-CAT สามารถควบคุมการใช้งานของฮีเตอร์ไฟฟ้าได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ NI LabVIEW™ 8.6 โดยที่ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จะแสดงไว้ดังภาพที่ 33



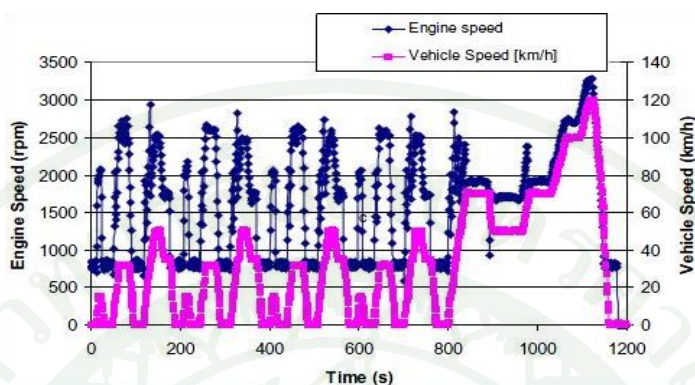
ภาพที่ 33 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบฮีเตอร์ไฟฟ้า

3. การทดสอบเครื่องยนต์

3.1 การออกแบบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

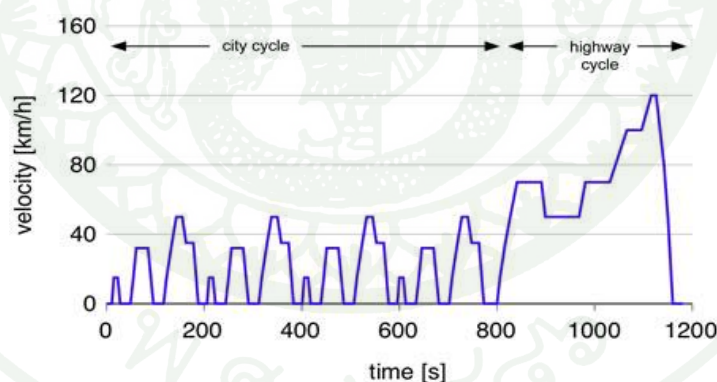
การทดสอบของรถยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมบน Chassis Dynamometer อ้างอิงมาจากการทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle (NEDC) ซึ่งเป็นมาตรฐานการวัดปริมาณไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน การทดสอบประกอบด้วยการจำลองการขับขี่รถยนต์ 13 Cycle ต่อ 1 รอบการทดสอบดังภาพที่ 34 โดยเป็นการขับขี่ในตัวเมือง (City Cycle) และนอกตัวเมือง (Highway Cycle) ดังภาพที่ 35 พบว่าในช่วง Cold Start และช่วงที่เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีการะการทำงานต่ำนั้น (โดยจะอยู่ในช่วง City Cycle) จะมีปริมาณมลพิษจำพวก

THC, CH₄ และ CO หลุดออกมาเป็นปริมาณที่มาก เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงนั้นจะมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาต่ำนั้นทำให้เกิดคาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่พร้อมทำงานในการออกซิไดซ์สารพิษเหล่านั้นไปได้ (Wannatong *et al.*, 2009)



ภาพที่ 34 แสดงการทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC) ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ที่มา: Wannatong *et al.* (2009)



ภาพที่ 35 แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับขี่แบบในตัวเมืองและแบบนอกตัวเมืองของการทดสอบแบบ NEDC

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2553)

จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การใช้งานจริงในช่วงภาวะการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีนั้นจำเป็นต้องปรับการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวเพื่อจัดปัญหามลพิษที่ออกมาเป็นจำนวนมากในช่วงดังกล่าว โดยการฉีดน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวอยู่ในช่วงรอบเครื่องยนต์ 900-1,300 rpm จากข้อมูลดังกล่าวจึงใช้รอบเครื่องยนต์ที่ 900 และ 1,300 rpm เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์ข้อมูลในการนำฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาต่ำในช่วงนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถเปลี่ยนการจ่ายชนิดของเชื้อเพลิงมาเป็นแบบเชื้อเพลิงผสมและปริมาณของเชื้อเพลิงโดยควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mototune

ส่วนทางด้าน Lambda นั้นจากการศึกษาของ Noipheng *et al.*, 2011 พบว่าการลด Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้ต่ำลงเหลือประมาณ 1.3 จะทำให้วิธี Raw Fuel Injection มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH_4 ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมากกว่า Lambda 1.7 และ 2.1 ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ Lambda 1.3 เป็นพื้นฐานในการใช้งาน โดยค่าของ Lambda นั้นสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 14

$$\lambda = \frac{(\dot{m}_A)/(\dot{m}_g + \dot{m}_D)}{(A/F)_s} \quad (14)$$

โดย $\dot{m}_A$ คือ ปริมาณการใช้ของอากาศ (kg/hr)
 $\dot{m}_g$ คือ ปริมาณการใช้ของก๊าซธรรมชาติ (kg/hr)
 $\dot{m}_D$ คือ ปริมาณการใช้ของน้ำมันดีเซล (kg/hr)
 $(A/F)_s \approx 12.4$ คำนวณจาก Turns *et al.* (2002)

Energy Ratio (%Energy Ratio, %NG) คือ อัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้จะตั้งเป้าหมายในการใช้ %NG ไว้อยู่ที่ 70% คือใช้ก๊าซธรรมชาติ (CNG) 70% ต่อ น้ำมันดีเซล 30% (Wannatong *et al.*, 2009) ถ้าค่า %NG สูงขึ้นก็จะเป็นการใช้ก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นส่งผลให้ผู้บริโภคมีการค่าใช้จ่ายที่น้อยลงเนื่องจากก๊าซธรรมชาติมีราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซล โดยรายละเอียดคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซลจะแสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ 4 และสามารถคำนวณ %NG ได้จากสมการที่ 15 (Wannatong *et al.*, 2009)

$$\%NG = \frac{(LHV_{NG} \times \dot{m}_{NG})}{(LHV_{NG} \times \dot{m}_{NG}) + (LHV_D \times \dot{m}_D)} \times 100 \quad (15)$$

โดย %NG คือ ร้อยละพลังงานของก๊าซธรรมชาติต่อเชื้อเพลิงทั้งหมด

$\dot{m}_g$ คือ อัตราการไหลของก๊าซธรรมชาติ (kg/hr)

$\dot{m}_D$ คือ อัตราการไหลของน้ำมันดีเซล (kg/hr)

LHV_D คือ ค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล ≈ 42.80 MJ/kg

(Heywood *et al.*, 1988)

LHV_{NG} คือ ค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ ≈ 34.14 MJ/kg

(สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท., 2553)

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาจึงได้นำมาประยุกต์ออกแบบการทดสอบ โดยการศึกษาในครั้งนี้ พารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อระบบ Aftertreatment ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงรวมเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะแสดงไว้ดังตารางที่ 8 โดยกำหนดให้ Case ที่ 1 และ 5 เป็น Case พื้นฐานในการเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ใน Case ต่างๆ ซึ่งที่รอบเครื่องยนต์ 1,300 rpm และ 900 rpm ตามลำดับ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์จะอยู่ที่ประมาณ 150°C และ 100°C ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะ Steady-state หลังจากผ่าน PRE-CAT อุณหภูมิไอเสียจะลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิก่อนเข้า MAIN-CAT จะลดลงอยู่ที่ประมาณ 120°C และ 80°C ตามลำดับ ส่วน Case 2 ซึ่งมีการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ไปที่ 175°C เมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะ Steady-state หลังจากผ่าน PRE-CAT อุณหภูมิไอเสียจะลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิก่อนเข้า MAIN-CAT จะลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 150°C

ตารางที่ 8 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 ถึง 5

Case	1	2	3	4	5
Engine Speed (rpm)	1,300	1,300	1,300	1,300	900
Lambda	1.3	1.3	1.1	1.3	1.3
Energy Ratio (%)	70	70	70	80	70
Exhaust Temperature (°C)	150	175	150	150	100
Mass flow rate (kg/hr)	27.5	32.5	22.2	27.4	15.8
Engine Power (kW)	1.61	3.37	1.52	1.38	0.4

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก จ

3.2 มลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

โดยทั่วไปสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันจะมีคุณลักษณะของไอเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง ความเร็วรอบ ภาระการทำงาน และ Lambda ของเครื่องยนต์มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ทั้งสิ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลดมลพิษไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case ต่างๆ นั้นจะแสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณมลพิษหลักที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงที่ไม่มีการใช้
ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสีย

Case	IMEP (bar)	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
1	1.65	After Engine	6,800	9,800	4,500	3
		After PRE-CAT	6,800	9,800	4,500	6
		After MAIN-CAT	6,800	9,800	4,500	5
2	2.2	After Engine	6,300	9,300	2,350	16
		After PRE-CAT	6,300	9,300	1,950	16
		After MAIN-CAT	6,300	9,300	1,810	16
3	1.5	After Engine	9,000	12,000	7,000	7
		After PRE-CAT	9,000	12,000	7,000	3
		After MAIN-CAT	9,000	12,000	7,000	2
4	1.6	After Engine	9,300	12,200	5,700	2
		After PRE-CAT	9,300	12,200	5,700	2
		After MAIN-CAT	9,300	12,200	5,700	1
5	1.3	After Engine	9,500	13,300	8,200	1
		After PRE-CAT	9,500	13,300	8,200	0
		After MAIN-CAT	9,500	13,300	8,200	0

ตารางที่ 9 (ต่อ)

Case	Emission Point	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)	H ₂ O (%vol)	PM (mg/m ³)
1	After Engine	5.58	12	8.48	0
	After PRE-CAT	5.58	12	8.48	0
	After MAIN-CAT	5.58	12	8.48	0
2	After Engine	6.52	11	8.44	0
	After PRE-CAT	6.53	11	8.44	0
	After MAIN-CAT	6.54	11	8.44	0
3	After Engine	6.39	10.5	8.42	0
	After PRE-CAT	6.39	10.5	8.42	0
	After MAIN-CAT	6.39	10.5	8.42	0
4	After Engine	5.59	12	8.48	0
	After PRE-CAT	5.59	12	8.48	0
	After MAIN-CAT	5.59	12	8.48	0
5	After Engine	4.94	12	8.48	0
	After PRE-CAT	4.94	12	8.48	0
	After MAIN-CAT	4.94	12	8.48	0

หมายเหตุ ในส่วนของปริมาณ PM ที่เห็นผลจากตารางที่ 9 ว่าไม่มีปริมาณ PM จากการทดลองเลย ที่เห็นผลออกมาในลักษณะนี้เป็นเพราะว่า PM ที่พบในการทดลองนี้มีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งปริมาณ PM ที่น้อยนี้ต่ำกว่า Range ต่ำสุดของเครื่องวิเคราะห์มลพิษไอเสีย Opacimeter 439 ที่จะสามารถวัดและแสดงค่าออกมาได้ ส่งผลให้ผลออกมาเป็นในลักษณะดังกล่าว และในส่วนของปริมาณ O₂ ที่เห็นผลจากตารางที่ 9 ว่าเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยากับ PRE-CAT และ MAIN-CAT แล้วกลับไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ O₂ เลย ที่เห็นผลออกมาเป็นลักษณะเป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากว่า resolution ต่ำสุดของเครื่องวิเคราะห์มลพิษไอเสีย Horiba MEXA-7100DEGR ไม่เพียงพอต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้เห็นผลออกมาในลักษณะดังกล่าว

จากตารางที่ 9 จะสังเกตได้ว่าปริมาณ NO_x และ PM ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่พบนั้นถือว่ามีปริมาณที่น้อยมาก ในการทดลองจึงไม่ได้นำค่าดังกล่าวมารวมวิเคราะห์

3.3 การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่า ในช่วงที่เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีภาระการทำงานต่ำนั้นจะมีปริมาณมลพิษจำพวก THC, CH_4 และ CO หลุดออกมาเป็นปริมาณที่มากและเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงนั้นจะมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่พร้อมทำงานในการออกซิไดซ์สารพิษเหล่านั้นไปได้ นอกจากนี้การออกซิไดซ์ CH_4 ด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (สารพาราดีมและสารแพตตินัม) ในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่อไอเสียมีอุณหภูมิสูงประมาณ 400°C ขึ้นไป (Moallemi *et al.*, 1999) จากข้อมูลดังกล่าวในการทดลองจึงได้เลือกใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT จาก 100°C ที่รอบเครื่องยนต์ 900 rpm และจาก 150°C ที่รอบเครื่องยนต์ 1,300 rpm ไปที่อุณหภูมิ 300°C , 350°C , 400°C และ 450°C เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน MAIN-CAT ทุกกรณีศึกษา

ปริมาณการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical energy consumption) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 16 (Kaiser *et al.*, 1993)

$$\text{Electrical energy consumption (kWh)} = W \times t \quad (16)$$

โดย W คือ กำลังไฟฟ้าของตัวฮีตเตอร์ (kW) $\approx 3 \text{ kW}$

t คือ เวลาที่ใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า (ชั่วโมง)

4. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์

5. จัดทำรูปเล่ม

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

1. สถานที่

สถานที่ดำเนินการจัดทำโครงการวิทยานิพนธ์ คือ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และ
สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. อำเภอวังน้อย จังหวัด พระนครศรีอยุธยา

2. ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มต้นตั้งแต่	1 เมษายน 2553
สิ้นสุด	31 ธันวาคม 2554

ผลและวิจารณ์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดปริมาณ CH_4 จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ได้กำหนดให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ตัวต่ออนุกรมกันซึ่งตัวแรก คือ PRE-CAT มีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและลดปริมาณ THC และ CO จากไอเสีย ตัวที่ 2 คือ MAIN-CAT มีหน้าที่ลดปริมาณ CH_4 จากไอเสีย ซึ่งในส่วนที่ 1 เป็นกรณีการศึกษาผลกระทบเมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นการพิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2 ส่วนที่ 3 เป็นการพิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 ส่วนที่ 4 จะเป็นการพิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 4 และส่วนที่ 5 จะเป็นการพิจารณากรณีศึกษาที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5

1. พิจารณาผลกระทบเมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยใช้ Case 1 เป็นพื้นฐานในการทดสอบ ได้ทดสอบที่รอบเครื่องยนต์ 1300 rpm, Lambda 1.3 และอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 150°C โดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1

Case	1
Engine Speed (rpm)	1,300
Lambda	1.3
Energy Ratio (%)	70
Exhaust Temperature (°C)	150
Mass flow rate (kg/hr)	27.5
Power (kW)	1.61

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้อยู่ในส่วนของภาคผนวก จ

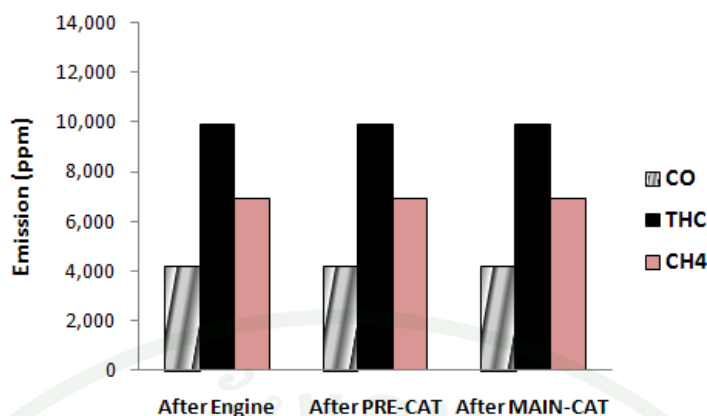
ในส่วนการพิจารณาผลกระทบเมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 มีดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT โดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวเพิ่มอุณหภูมิ

ตัวแปรตาม คือ อุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของการลดปริมาณ CH_4 , THC และ CO

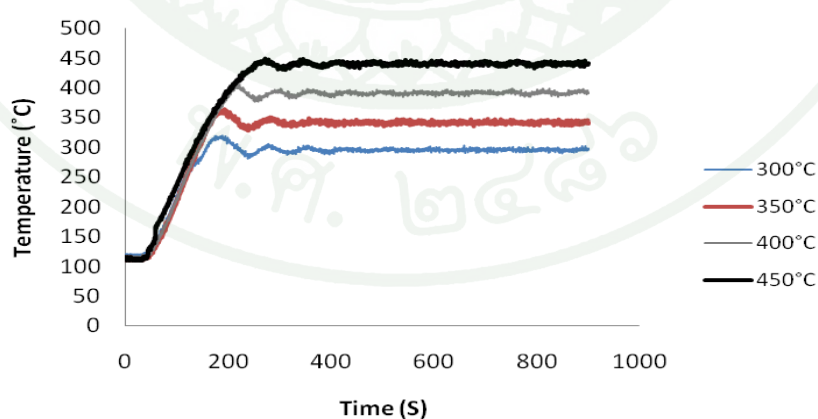
ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, Lambda, อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ และ Energy Ratio

เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT และ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าพบว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถออกซิไดซ์สารพิษ CO, THC และ CH_4 ได้เลย ดังภาพที่ 36 เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 150°C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ PRE-CAT และ MAIN-CAT จะสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลดสารพิษลงได้ แสดงให้เห็นว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ต้องการอุณหภูมิของไอเสียในการออกซิไดซ์มลพิษมากกว่า 150°C ขึ้นไปจึงสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์มลพิษได้



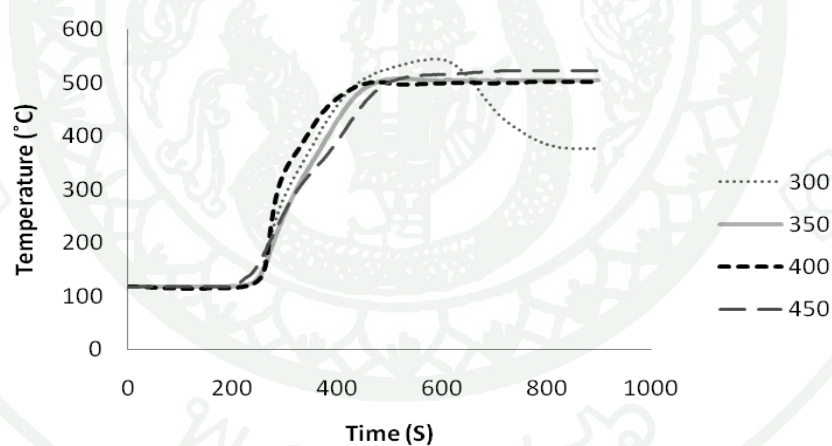
ภาพที่ 36 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 1 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

ต่อมาเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT พบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิจาก 120°C ไปถึง 300°C , 350°C , 400°C และ 450°C จะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 2 นาที, 2.30 นาที, 3.30 นาที และ 4 นาที ตามลำดับ จากการทดลองเปิดใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 15 นาที ตามภาพที่ 37 สำหรับระยะเวลาการยกอุณหภูมิดังกล่าวนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้า เช่น ปริมาณ Mass flow rate ของไอเสีย ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวฮีตเตอร์เองและการปรับจูนค่า PID ในโปรแกรม NI LabVIEWTM 8.6 เป็นต้น ที่จะส่งผลให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้เวลาในการยกอุณหภูมิเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วหรือช้า



ภาพที่ 37 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 1

หลังจากมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ส่งผลให้อุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก MAIN-CAT สูงขึ้นตามภาพที่ 38 เนื่องจาก HC เกิดการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาภายใน MAIN-CAT โดยการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C และ 450 °C สามารถทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก MAIN-CAT มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 500 °C (โดยใช้ระยะเวลาไม่เกิน 6 นาที นับตั้งแต่ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าเริ่มทำงาน) ซึ่งอุณหภูมิที่สูงดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้ CH_4 เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาใน MAIN-CAT ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ CH_4 ไปได้เกือบหมดดังภาพที่ 39A และสอดคล้องกับ CH_4 ต้องการอุณหภูมิในการออกซิไดซ์ที่มากกว่า 400 °C (Moallemi *et al.*, 1999) ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก MAIN-CAT จะตกเหลืออยู่ที่ประมาณ 380 °C ซึ่งสามารถทำการออกซิไดซ์ CH_4 ได้ประมาณ 58% ตามภาพที่ 39A จากการทดลองพบว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าการยกอุณหภูมิไอเสียที่ 300 °C พบพฤติกรรมที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียได้ในช่วงแรกแต่ก็ไม่สามารถเลี้ยงอุณหภูมิของไอเสียให้คงที่ได้ทำให้อุณหภูมิของไอเสียลดลง ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งจะพบพฤติกรรมเหล่านี้ในทุกช่วงการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าการยกอุณหภูมิไอเสียไปที่ 300 °C ซึ่งจะดำเนินการศึกษาในลำดับต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 38 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 1

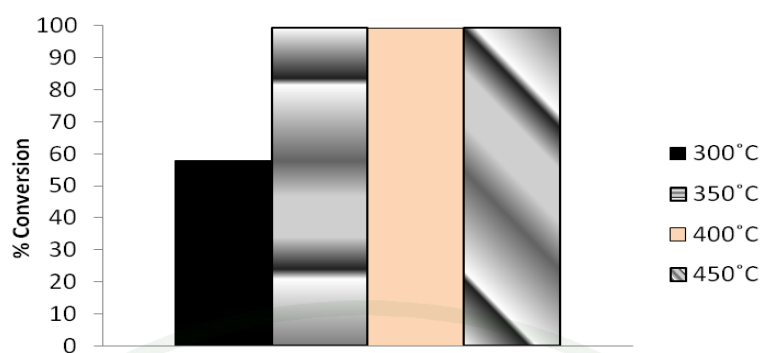
เมื่อมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT มีปริมาณลดลง ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 1 หลังจากมีการใช้งานฮีทเตอร์ไฟฟ้า

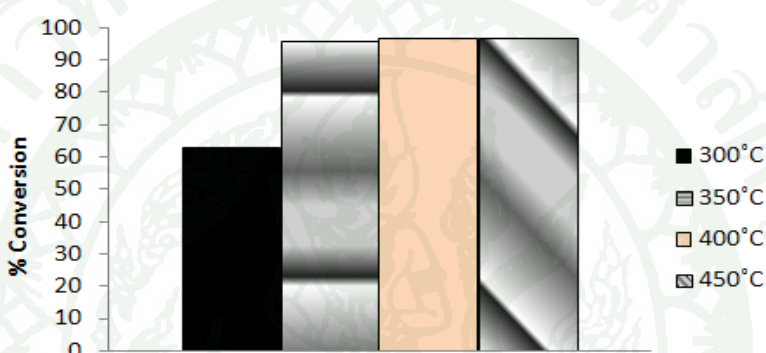
Case	Temp. of Electrical Heater	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)
1	300 °C	After Engine	6,800	9,800	4,500
		After PRE-CAT	6,800	9,800	4,500
		After MAIN-CAT	2,190	3,660	40
	350 °C	After Engine	6,800	9,800	4,500
		After PRE-CAT	6,800	9,800	4,500
		After MAIN-CAT	50	390	60
	400 °C	After Engine	6,800	9,800	4,500
		After PRE-CAT	6,800	9,800	4,500
		After MAIN-CAT	50	350	50
	450 °C	After Engine	6,800	9,800	4,500
		After PRE-CAT	6,800	9,800	4,500
		After MAIN-CAT	40	290	30

โดยการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C สามารถลดปริมาณ CH₄ ลงได้ 58%, 99%, 99% และ 99% ตามลำดับ ดังภาพที่ 39A ส่วน THC สามารถลดลงได้ 63%, 96%, 96% และ 97% ตามลำดับ ดังภาพที่ 39B และสามารถลด CO ลงได้ 98%, 99%, 99% และ 99% ตามลำดับ ดังภาพที่ 39C จะสังเกตเห็นว่าการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียตั้งแต่ 350 °C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์มีมากกว่า 95% ขึ้นไป

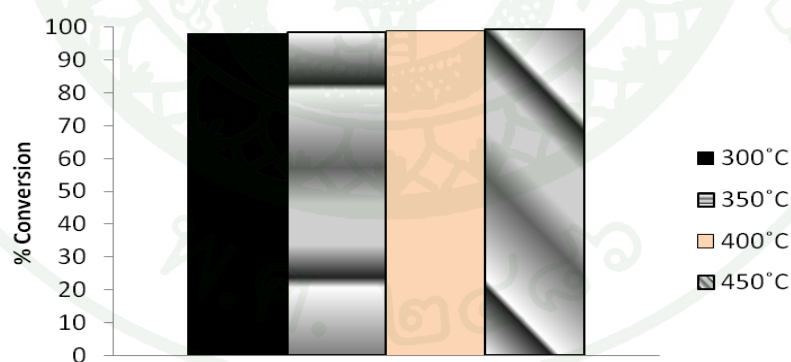
เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT จนถึงจุดอุณหภูมิที่เหมาะสม สารเร่งปฏิกิริยาใน MAIN-CAT ทำงานจะเกิดการออกซิเดชันกับมลพิษทำให้มลพิษที่ผ่าน MAIN-CAT ลดลง แต่ที่ PRE-CAT ไม่สามารถทำการลดมลพิษชนิดใดได้เลยเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมามีอุณหภูมิประมาณ 150 °C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิที่ต่ำเกินกว่าจะทำให้สารเร่งปฏิกิริยาใน PRE-CAT ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันลดมลพิษลงได้ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 36



CH₄
39A



THC
39B

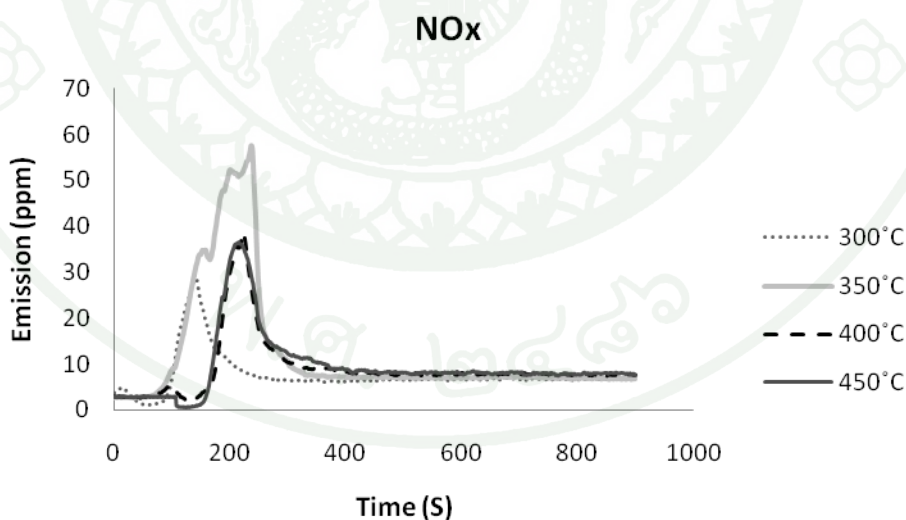


CO
39C

ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพการลด CH₄ (39A), THC (39B) และ CO (39C) ของ MAIN-CAT เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกันของ Case 1

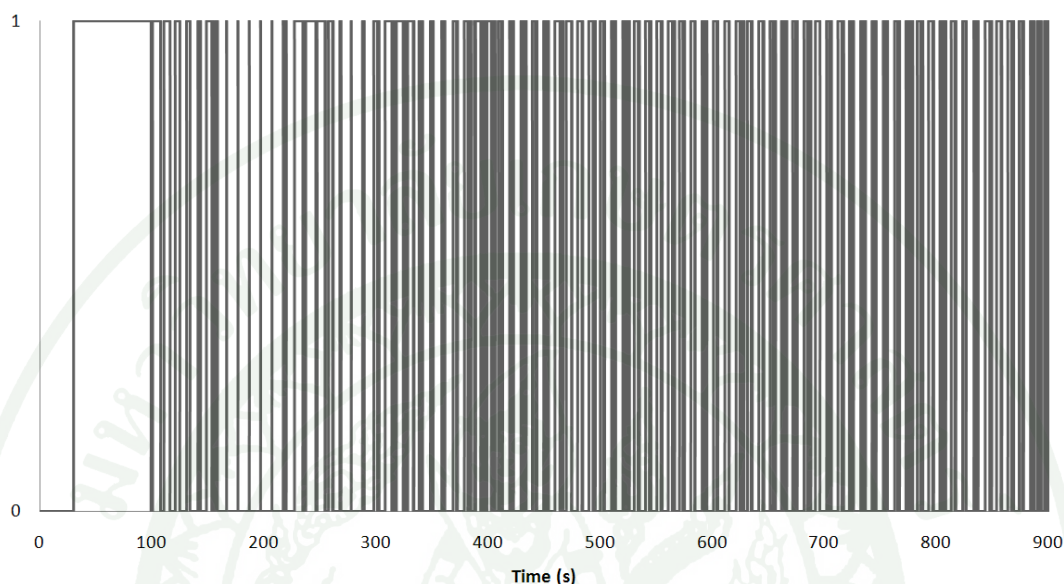
จากภาพที่ 39C สังเกตได้ว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิ 300 °C นั้นแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามารถลดปริมาณ CO ลงได้มากกว่า 98% ทั้งนี้สืบเนื่องจากการที่ CO มีค่า LT อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200-250 °C โดยค่า LT ที่แตกต่างกันของมลพิษแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของ O₂ เป็นต้น (Knafl *et al.*, 2006; Watanabe *et al.*, 2007; Sumiya *et al.*, 2009) และในส่วนการทดลองนี้ได้ออกแบบให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียเริ่มต้นที่ 300 °C ซึ่งเกินจุด LT ของ CO ไปแล้ว ในขณะที่การลดปริมาณของ THC และ CH₄ ทำได้เพียงประมาณ 60% ที่อุณหภูมิ 300 °C เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 39A และ ภาพที่ 39B การศึกษาเรื่องการหาช่วงอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อลดมลพิษ THC และ CH₄ จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จะดำเนินการศึกษาในลำดับต่อไปในอนาคต

ขณะที่มีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าอยู่นั้นจะพบพฤติกรรมของ NO_x คือ NO_x จะมีปริมาณที่สูงขึ้นแต่พอปล่อยไปซักพัก NO_x ก็ลดลงเข้าสู่สภาวะ Steady-state ดังภาพที่ 40 ซึ่งพฤติกรรมนี้จะพบทุกช่วงการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า ในขณะที่มลพิษชนิดอื่นจะไม่พบพฤติกรรมแบบนี้ แต่การเพิ่มขึ้นของ NO_x ที่พบนั้นถือว่ามียุทธยาน้อยมากจึงไม่มีการนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 40 พฤติกรรมของ NO_x ขณะฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงาน

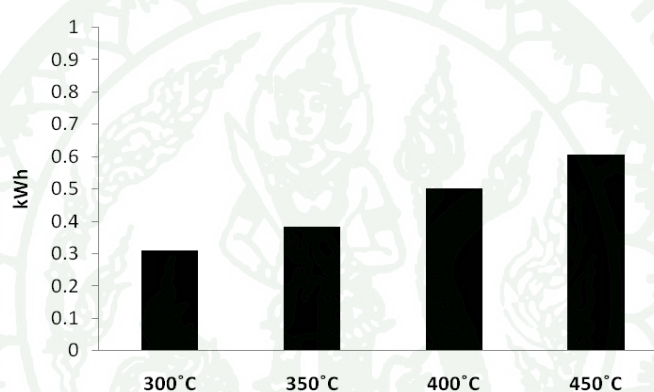
ในส่วนสำหรับเวลาที่ใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกบันทึกข้อมูลโดยโปรแกรม NI LapVIEW™ 8.6 ซึ่งตัวอย่างข้อมูลจะแสดงดังภาพที่ 41 โดยจะนำเอาเวลาที่ใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาคำนวณอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าจากสมการที่ 16



ภาพที่ 41 แสดงตัวอย่างข้อมูลระยะเวลาการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งถูกบันทึกข้อมูลโดยโปรแกรม NI LapVIEW™ 8.6 โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C ข้อมูลในแกนนอนคือระยะเวลาการทดลอง ข้อมูลแกนตั้งในที่นี้ 0 หมายถึง ฮีตเตอร์ไฟฟ้าไม่ทำงาน และ 1 หมายถึง ถึงฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงาน

จากภาพที่ 41 จะสังเกตได้ว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกควบคุมโดยโปรแกรม NI LapVIEW™ 8.6 จะทำงานเมื่อผ่านช่วง 30 วินาทีแรกไปโดยระบบจะเปิดการทำงานแบบ 100% เพื่อพยายามยกอุณหภูมิไอเสียให้ถึงจุด Set point ให้เร็วที่สุด และเมื่อถึงจุด Set point ที่ต้องการระบบจะพยายามควบคุมจุด Set point ของอุณหภูมิที่ต้องการด้วยการสั่งการให้ Solid State Relay เปิด-ปิด กระแสไฟที่จะเข้าสู่ฮีตเตอร์ไฟฟ้างั้นที่พบเมื่อผ่านระยะเวลาไป 100 วินาที ทั้งนี้ ระยะเวลาดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น จุด Set point ของอุณหภูมิที่ต้องการ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ และปริมาณ Mass flow rate ของไอเสีย เป็นต้น

จากการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียไปที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะพบถึงอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีปริมาณการใช้พลังงานที่ 0.310 kWh, 0.382 kWh, 0.501 kWh และ 0.605 kWh ตามลำดับซึ่งคำนวณมาได้จากสมการที่ 16 ดังภาพที่ 42 ซึ่งพบว่าเมื่อต้องการให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียที่สูงขึ้นความต้องการพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าวนี้ก็จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ปริมาณของ Mass flow rate ของไอเสีย และการปรับจูนค่า PID ในโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6 เป็นต้น ที่จะส่งผลให้การใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีปริมาณมากหรือน้อย



ภาพที่ 42 แสดงให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ของ Case 1

ในส่วนนี้จะพบว่าในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมซึ่งมีปริมาณมลพิษหลุดออกมาเป็นจำนวนมากเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิที่ต่ำเกินกว่าที่จะทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามารถออกซิไดซ์สารพิษลงได้ แต่เราสามารถนำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้สูงขึ้นทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่จุดอุณหภูมิในการทำงานเพื่อการลดปริมาณ CH₄, THC และ CO ลงไปได้

2. พิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2

การศึกษาในส่วนของหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จาก 150°C (Case 1) เป็น 175°C (Case 2) โดยจุดประสงค์หลักของหัวข้อนี้ก็คือ ต้องการที่จะช่วยให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเข้าสู่จุดอุณหภูมิที่กำหนดไว้ (300°C , 350°C , 400°C และ 450°C) ได้เร็วขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้าฮีทเตอร์ไฟฟ้า โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 2 โดยควบคุมให้ Engine Speed, Lambda และ Energy Ratio ให้มีค่าคงที่ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 2

Case	1	2
Engine Speed (rpm)	1,300	1,300
Lambda	1.3	1.3
Energy Ratio (%)	70	70
Exhaust Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	150	175
Mass flow rate (kg/hr)	27.5	32.5
Power (kW)	1.61	3.37

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้อยู่ในส่วนของภาคผนวก จ

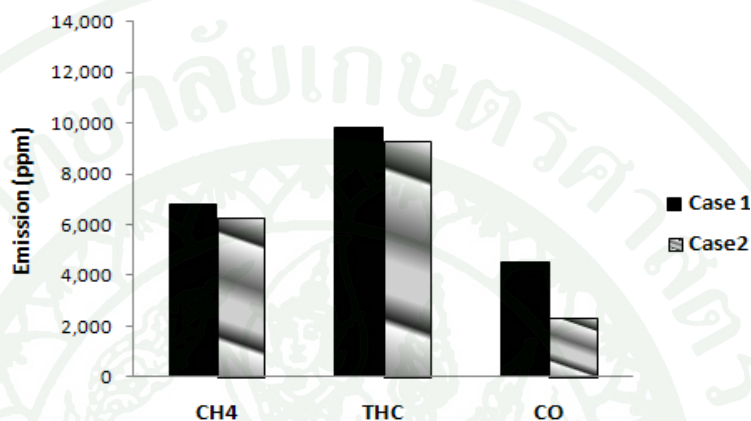
ในส่วนการพิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 มีดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น คือ ปริมาณของ Mass flow rate และปริมาณของ CO

ตัวแปรตาม คือ อุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของการลดปริมาณ CH_4 , THC และ CO

ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, Lambda และ Energy Ratio

โดยพบว่า เมื่อมีความต้องการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้สูงขึ้นจำเป็นต้องปรับปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงระหว่างน้ำมันดีเซลและก๊าซธรรมชาติให้มีปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่จังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อปริมาณอากาศ (Mass flow rate) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ก็จะมีปริมาณที่มากขึ้นตาม เพื่อควบคุมค่า Lambda ตามสมการที่ 14 ให้คงที่ๆ 1.3 จากการทดสอบจะได้ผลดังภาพที่ 43

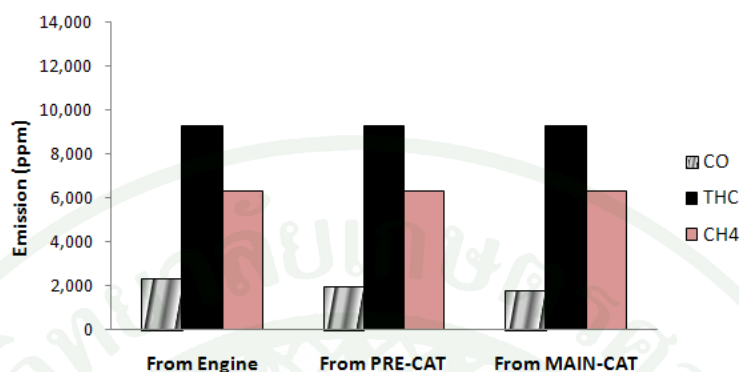


ภาพที่ 43 แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 2 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine

จะเห็นได้ว่าเมื่อ Mass flow rate มีปริมาณที่มากขึ้นมลพิษจำพวก CO จะมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Case 1 เนื่องจากการที่มีปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงสมบูรณ์มากขึ้น ทั้งนี้ปัญหาการเกิด CO นั้นมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากสารผสมหนา (Fuel Rich) ทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้คาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงให้เป็น CO₂ ส่วนปริมาณ THC และ CH₄ ที่พบใน Case 2 นั้นมีปริมาณที่น้อยกว่า Case 1 เพียงเล็กน้อย

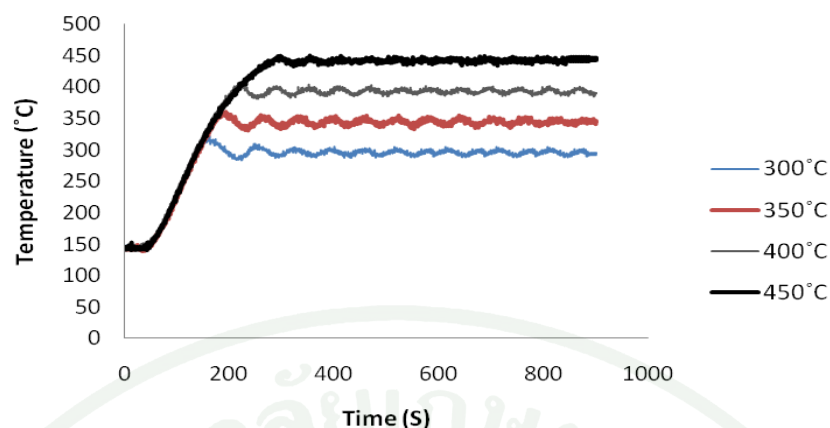
เมื่อพิจารณาปริมาณมลพิษที่วัดหลังจากผ่าน PRE-CAT และ MAIN-CAT เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียไปที่ 175 °C ใน Case 2 แล้วพบว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถออกซิไดซ์สารพิษ THC และ CH₄ ดังภาพที่ 44 ได้เลยซึ่งสอดคล้องกับ Case 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ต้องการอุณหภูมิของไอเสียที่สูงมากกว่า 175 °C ในการที่จะทำให้ตัวของมันเองทำปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์ THC และ CH₄ แต่ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถออกซิไดซ์ CO ลงได้ 17% และ 23% ตามลำดับ ดังภาพที่ 44 ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากที่ CO มีค่า LT อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200-250 °C (Knafl *et al.*, 2006; Watanabe *et al.*, 2007; Sumiya *et al.*, 2009) ซึ่ง

อุณหภูมิไอเสียที่ 175°C นั้นเป็นจุดอุณหภูมิที่ CO เริ่มทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาภายใน แคลตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จึงทำให้เห็นผลดังกล่าว



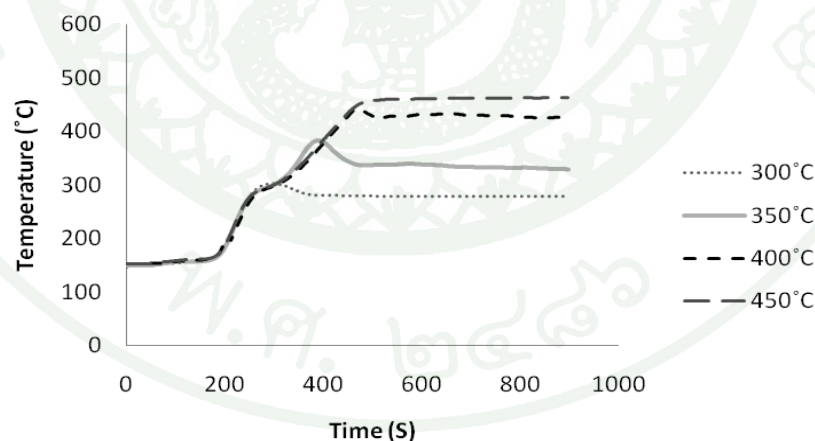
ภาพที่ 44 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 2 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

ใน Case 2 อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์อยู่ที่ 175°C เมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะ Steady-state หลังจากผ่าน PRE-CAT อุณหภูมิไอเสียจะลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิก่อนเข้า MAIN-CAT จะลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 150°C ปรากฏว่า ใน Case 2 นี้ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 150°C ไปถึงอุณหภูมิ 300°C , 350°C , 400°C และ 450°C จะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 2.20 นาที, 2.50 นาที, 3.30 นาที และ 4.40 นาที ตามลำดับ จากการทดลองเปิดใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 15 นาที ตามภาพที่ 45 ซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นเป็น 175°C แต่ฮีตเตอร์ไฟฟ้ากลับใช้ระยะเวลาที่มากกว่า Case 1 ที่มีอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ 150°C ทั้งนี้ใน Case การทดลองนี้ระยะเวลาการยกอุณหภูมิดังกล่าวนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้างดังที่กล่าวไว้ในส่วนที่ 1 เช่น ปริมาณ Mass flow rate ของไอเสีย ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวฮีตเตอร์เองและการปรับจูนค่า PID ในโปรแกรม NI LabVIEWTM 8.6 เป็นต้น ที่จะส่งผลให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้เวลาในการยกอุณหภูมิเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วหรือช้า



ภาพที่ 45 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 2

เมื่อมีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C และ 450°C อุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT จะอยู่ที่ประมาณ 280°C, 330°C, 425°C และ 465°C ตามลำดับ โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 46 ซึ่งที่อุณหภูมิ 280°C และ 330°C ส่งผลให้การใช้ฮีทเตอร์เพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300°C และ 350°C ใน Case 2 มีประสิทธิภาพในการขจัด CH₄ และ THC ต่ำกว่า Case 1 ตามภาพที่ 47A และ 47B



ภาพที่ 46 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าของ Case 2

ทั้งนี้การที่เห็นผลตามภาพที่ 46 เนื่องจาก Case 2 นี้มีปริมาณ Mass flow rate ของไอเสียที่มากกว่า Case 1 และจะเห็นได้ชัดว่าใน Case 2 นี้มีปัจจัยที่เพิ่มเข้ามาอีกปัจจัยหนึ่งก็คือ ปริมาณของ CO ซึ่งมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Case 1 ประเด็นนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญต่อปริมาณของ CO ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการขจัดอุณหภูมิไอเสียและการออกซิไดซ์มลพิษในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ทำให้เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C อุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า Case 1 นั้นเอง

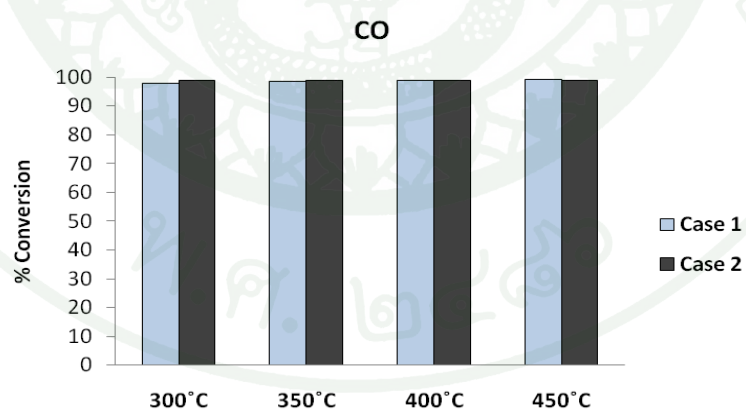
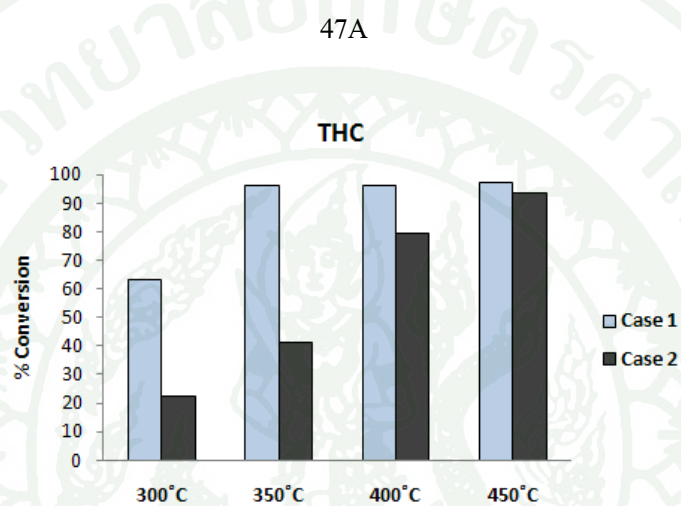
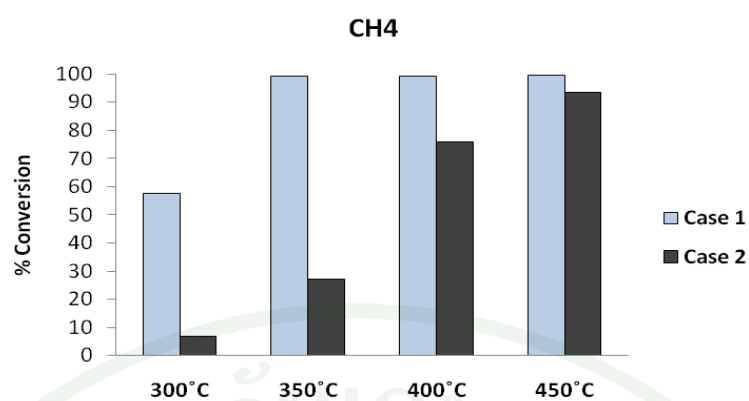
เมื่อมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการขจัดอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT มีปริมาณลดลง ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 2 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Case	Temp. of Electrical Heater	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)
2	300 °C	After Engine	6,300	9,300	2,350
		After PRE-CAT	6,300	9,300	1,950
		After MAIN-CAT	5,753	7,143	30
	350 °C	After Engine	6,300	9,300	2,350
		After PRE-CAT	6,300	9,300	1,950
		After MAIN-CAT	4,520	5,360	30
	400 °C	After Engine	6,300	9,300	2,350
		After PRE-CAT	6,300	9,300	1,950
		After MAIN-CAT	1,450	1,840	30
	450 °C	After Engine	6,300	9,300	2,350
		After PRE-CAT	6,300	9,300	1,950
		After MAIN-CAT	401	597	30

โดยในส่วนของ Case 2 นี้ การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 300°C ก็สามารถลดปริมาณ CO ลงได้มากกว่า 95% ขึ้นไปแล้วดังเช่นผลใน Case 1 (ภาพที่ 39C) เนื่องจากการที่ CO มีค่า LT อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ ดังที่กล่าวไปในส่วนที่ 1 ส่วนการลดปริมาณ CH_4 และ THC ต้องใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ไปที่ 450°C ถึงทำให้ MAIN-CAT มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH_4 และ THC ได้มากกว่า 90% ขึ้นไป ซึ่งจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพ %Conversion ในการลด CH_4 และ THC จะลดต่ำลงทุกช่วงอุณหภูมิการใช้งานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียเมื่อเทียบกับ Case 1 ดังภาพที่ 47A และ 47B

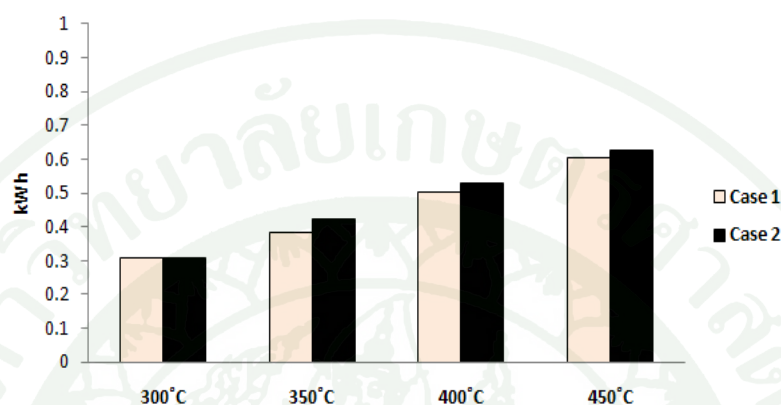




47C

ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH₄ (47A), THC (47B) และ CO (47C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 2 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

และจากการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียไปที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะพบถึงอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณมาได้จากสมการที่ 16 โดยการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 300°C , 350°C , 400°C และ 450°C ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีปริมาณการใช้พลังงานดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 2

จากภาพที่ 48 จะพบว่าการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 2 มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Case 1 เนื่องจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถยกอุณหภูมิเข้าสู่ Set point ได้ช้า ซึ่งปัจจัยที่มีผลก็คือปริมาณของ Mass flow rate ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณ CO ที่ลดลง จึงทำให้ระยะเวลาในการเข้าสู่จุด Set point ของฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้ระยะเวลานานขึ้นเมื่อเทียบกับ Case 1 แสดงให้เห็นว่าความต้องการพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะแปรตามกับประสิทธิภาพการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าด้วย

ในส่วนของหัวข้อนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นเป็น 175°C เพื่อต้องการที่จะช่วยให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วขึ้นนั้น มีการใช้ระยะเวลามากกว่า Case 1 เสียอีก ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเช่น ปริมาณ Mass flow rate ของไอเสีย ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวฮีตเตอร์เองและการปรับจูนค่า PID ในโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6 เป็นต้น ที่จะส่งผลให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้เวลาในการยกอุณหภูมิเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วหรือช้า แต่ทั้งนี้ปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งก็คือปริมาณ Mass flow rate ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มลพิษจำพวก CO จะมีปริมาณที่ลดลงเนื่องจากการที่มีอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มีออกซิเจนเพียงพอที่จะเผา

ไหม้คาร์บอนในเชื้อเพลิงให้กลายเป็น CO_2 การที่ปริมาณของ CO ลดลงนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการลดปริมาณ CH_4 และ THC แย่ลงคือ ต้องใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 450°C จึงจะทำให้ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH_4 และ THC ได้มากกว่า 90% ขึ้นไป และส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอนี้นั้นมีความต้องการที่มากขึ้น

3. พิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3

ในการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์นั้น จะพบว่าพารามิเตอร์ที่มีบทบาทต่อการทำงานมากที่สุดตัวหนึ่งก็คือ Lambda โดยในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI engines) ที่ใช้ Three-Way Catalytic converters (TWC) ในการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์จะควบคุมค่า Lambda ไว้ที่ประมาณ 1.0 ส่วนเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI engines) จะควบคุมค่า Lambda ไว้ที่ประมาณ 2.0 แต่ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกันนั้น Lambda ที่เหมาะสมต่อการใช้งานจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงประมาณ 1.0-2.0

โดยในส่วนนี้จะลดค่า Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้เข้าใกล้สถานะเผาไหม้พอดี ($\lambda=1$) จาก Lambda 1.3 (Case 1) เป็น Lambda 1.1 (Case 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของ Lambda ที่ลดต่ำลงจะส่งผลทำให้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมปล่อยมลพิษออกมาเป็นอย่างไรและศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Aftertreatment ที่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในการกำจัดมลพิษที่ออกมา ส่วนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 3 ซึ่งมีการใช้ค่า Lambda ที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้ Engine Speed, Energy Ratio และ Exhaust Temperature คงที่ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 3

Case	1	3
Engine Speed (rpm)	1,300	1,300
Lambda	1.3	1.1
Energy Ratio (%)	70	70
Exhaust Temperature (°C)	150	150
Mass flow rate (kg/hr)	27.5	22.2
Power (kW)	1.61	1.52

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้อยู่ในส่วนของภาคผนวก จ

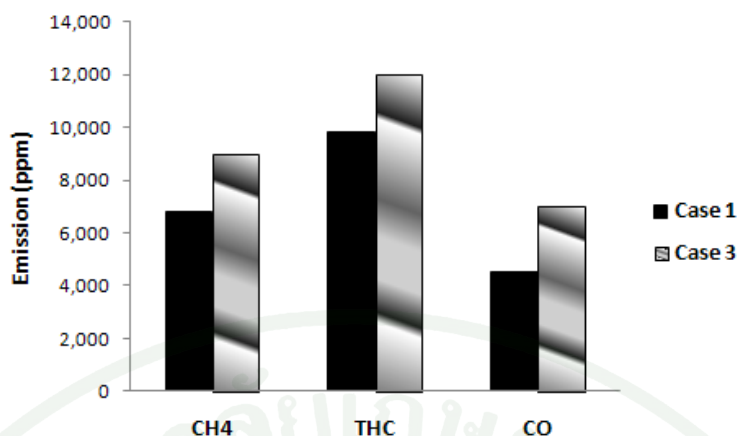
ในส่วนการพิจารณาการศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ 3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 มีดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น คือ Lambda, ปริมาณของ Mass flow rate และ ปริมาณของ CO

ตัวแปรตาม คือ อุณหภูมิไอเสียหลังจาก MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของการลดปริมาณ CH_4 , THC และ CO

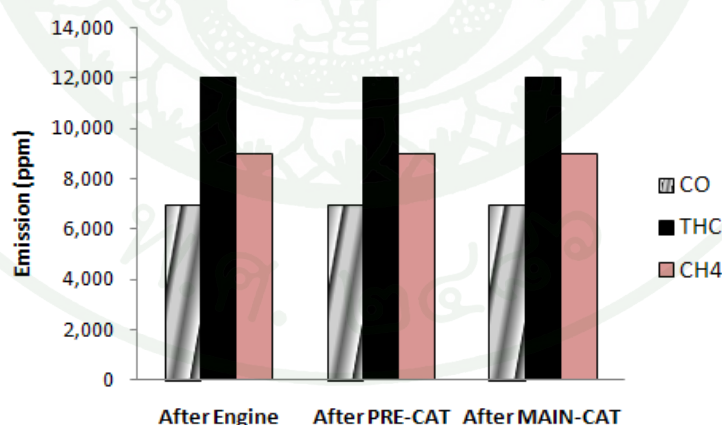
ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, อุณหภูมิไอเสียหลังจากเครื่องยนต์ และ Energy Ratio

จากตารางที่ 14 จะเห็นได้ว่าการลด Lambda จาก 1.3 ลงเหลือ 1.1 จะทำให้ปริมาณ Mass flow rate จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากต้องลดปริมาณอากาศลง (คำนวณจากสมการที่ 14) แต่ควบคุมอัตราส่วนพลังงานระหว่างก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซลให้เท่ากับ Case 1 คือที่ 70% จากการทดสอบจะได้ผลดังภาพที่ 49



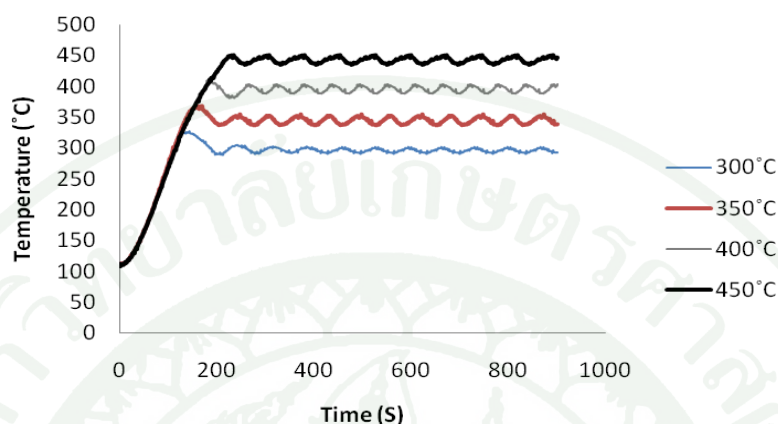
ภาพที่ 49 แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 3 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine

จากภาพที่ 49 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อมีการลด Lambda ลง ปริมาณมลพิษที่ออกมาจะมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Case 1 เนื่องจากมีอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงที่น้อยลงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และพบว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถออกซิไดซ์สารพิษ CO, THC และ CH₄ ได้เลย ดังภาพที่ 50 เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 150 °C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ PRE-CAT และ MAIN-CAT จะสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลดสารพิษลงได้ เช่นเดียวกับผลที่พบใน Case 1



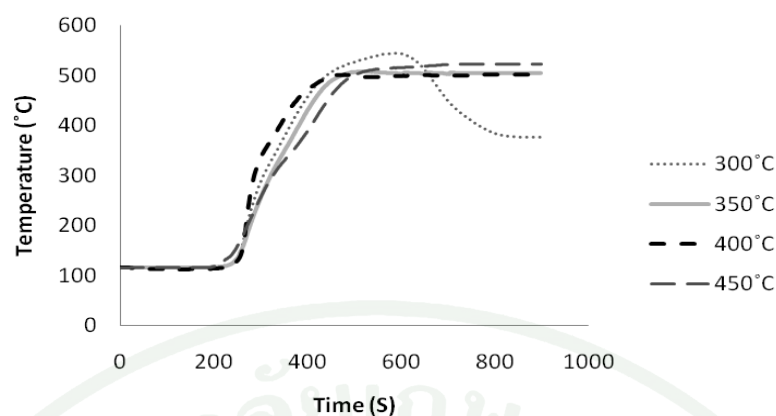
ภาพที่ 50 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 3 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

ต่อมาเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ใน Case 3 พบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิจาก 120°C ไปถึง 300°C , 350°C , 400°C และ 450°C จะใช้เวลาดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 3

เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ใน Case 3 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 350°C , 400°C และ 450°C สามารถทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก MAIN-CAT มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 500°C โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 52 ซึ่งอุณหภูมิที่สูงดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้ CH_4 เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาใน MAIN-CAT ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ CH_4 ไปได้เกือบหมดดังภาพที่ 53A ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300°C อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก MAIN-CAT จะตกเหลืออยู่ที่ประมาณ 375°C ซึ่งสามารถทำการออกซิไดซ์ CH_4 ได้ประมาณ 44% ตามภาพที่ 53A โดยผลการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ใน Case 3 นั้นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังออกจาก MAIN-CAT มีค่าที่ใกล้เคียงกับ Case 1



ภาพที่ 52 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 3

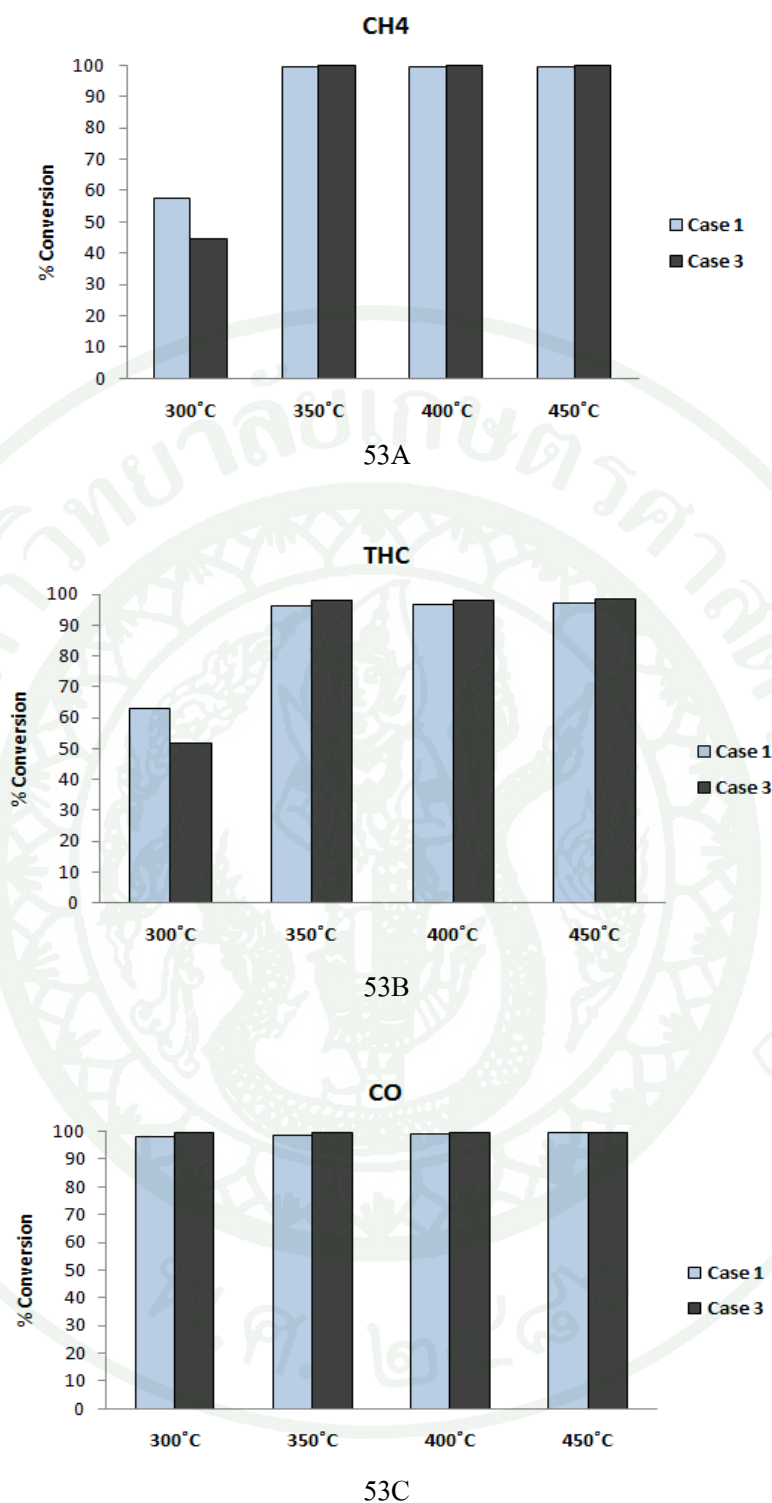
เมื่อมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT มีปริมาณลดลง ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 3 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Case	Temp. of Electrical Heater	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)
3	300 °C	After Engine	9,000	12,000	7,000
		After PRE-CAT	9,000	12,000	7,000
		After MAIN-CAT	5,000	5,800	30
	350 °C	After Engine	9,000	12,000	7,000
		After PRE-CAT	9,000	12,000	7,000
		After MAIN-CAT	10	226	30
	400 °C	After Engine	9,000	12,000	7,000
		After PRE-CAT	9,000	12,000	7,000
		After MAIN-CAT	8	237	30
	450 °C	After Engine	9,000	12,000	7,000
		After PRE-CAT	9,000	12,000	7,000
		After MAIN-CAT	7	190	30

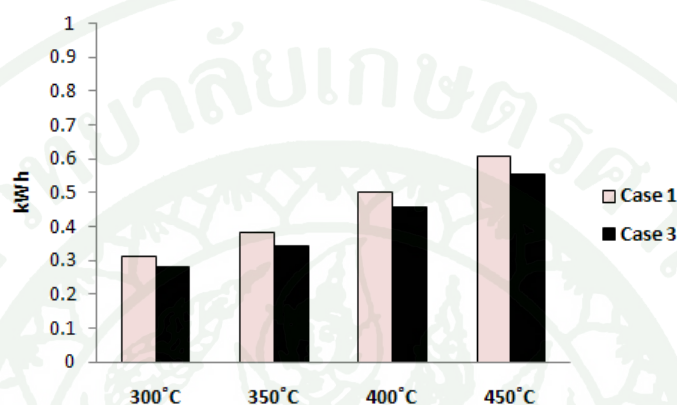
โดยในส่วนนี้จะสังเกตเห็นว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขงอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษ CO ของ MAIN-CAT จะมีมากกว่า 95% ขึ้นไป (ภาพที่ 53C) และการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขงอุณหภูมิไอเสียตั้งแต่ 350°C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษ CH_4 และ THC ของ MAIN-CAT มีมากกว่า 95% ขึ้นไป ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้ใกล้เคียงกับผลใน Case 1 ดังภาพที่ 53A และ 53B





ภาพที่ 53 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH₄ (53A), THC (53B) และ CO (53C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 3 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยขจัดอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียไปที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันใน Case 3 อัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 16 ถูกแสดงในภาพที่ 54 ซึ่งจะพบว่าอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าใน Case 3 มีค่าลดลงทุกช่วงการใช้งานเมื่อเทียบกับ Case 1 สาเหตุเนื่องมาจากปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งคือปริมาณ Mass flow rate ของไอเสียใน Case 3 ที่น้อยกว่า Case 1



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 3

ในส่วนนี้หัวข้อนี้จะพบว่าเมื่อมีการลด Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้เข้าใกล้สภาวะเผาไหม้พอดี ($\lambda=1$) มากขึ้น จะมีปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่สูงขึ้น เนื่องจากการมีอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงที่น้อยลงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้สูงขึ้น ที่อุณหภูมิ 350°C MAIN-CAT ก็มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณมลพิษได้มากกว่า 95% แล้ว และด้านความต้องการพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในส่วนนี้ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีความต้องการพลังงานที่น้อยลงเมื่อเทียบกับ Case 1 เนื่องจากการที่มีปริมาณ Mass flow rate ที่ลดลงและมีปริมาณของ CO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้าสู่จุดอุณหภูมิที่กำหนดไว้ได้เร็วขึ้นทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ลดลงตามไปด้วย

4. พิจารณากรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 4

Energy Ratio (%Energy Ratio, %NG) คือ อัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด (สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15) โดยปกติเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้จะตั้งเป้าหมายในการใช้ Energy Ratio ไว้อยู่ที่ 70% คือ ใช้ก๊าซธรรมชาติ (CNG) ต่อ น้ำมันดีเซล 70:30 โดยพลังงาน (Wannatong *et al.*, 2009; Noipheng *et al.*, 2011) ถ้า Energy Ratio สูงขึ้นก็จะเท่ากับว่าเป็นการใช้ก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นส่งผลให้ผู้บริโภคมีภาระค่าใช้จ่ายที่น้อยลง เนื่องจากก๊าซธรรมชาติมีราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซล

จากที่กล่าวไปในขั้นตอน การศึกษาในส่วนนี้จึงมีการเพิ่มเป้าหมายในการใช้ก๊าซธรรมชาติไปที่ 80% โดยปริมาตร (Case 4) เพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค เมื่อมีการเพิ่มปริมาณก๊าซธรรมชาติจึงต้องมีการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มปริมาณก๊าซธรรมชาติต่อเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม และศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Aftertreatment ที่มีการใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในการลดปริมาณมลพิษที่ออกมา ในส่วนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 4 ซึ่งมีอัตราส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลพื้นฐานการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 1 และ 4

Case	1	4
Engine Speed (rpm)	1,300	1,300
Lambda	1.3	1.3
Energy Ratio (%)	70	80
Exhaust Temperature (°C)	150	150
Mass flow rate (kg/hr)	27.5	27.4
Power (kW)	1.61	1.38

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก จ

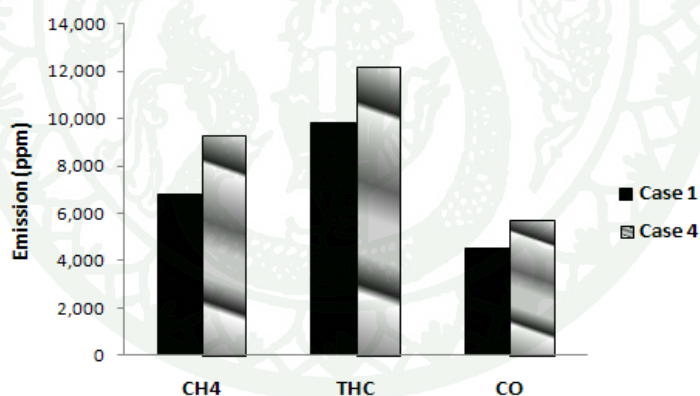
ในส่วนการพิจารณาการศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ 4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 มีดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น คือ Energy Ratio และ ปริมาณของ CO

ตัวแปรตาม คือ อุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของการลดปริมาณ CH_4 , THC และ CO

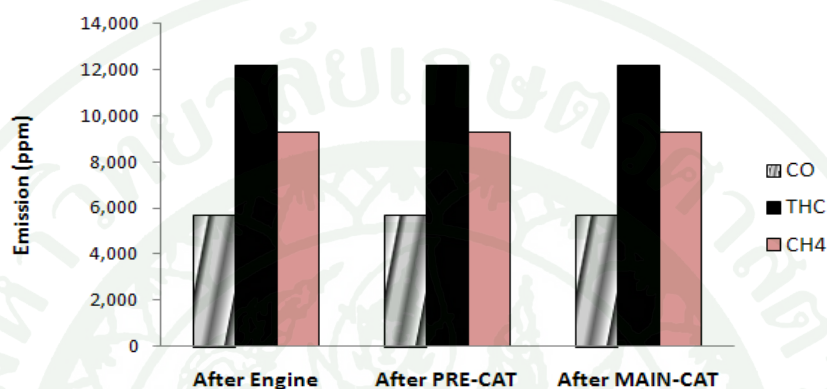
ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, อุณหภูมิไอเสียหลังออกจากเครื่องยนต์ และ Lambda

จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเพิ่ม Energy Ratio จาก 70% โดยปริมาตรเป็น 80% โดยปริมาตร ปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะเพิ่มมากขึ้นดังที่แสดงในภาพที่ 55



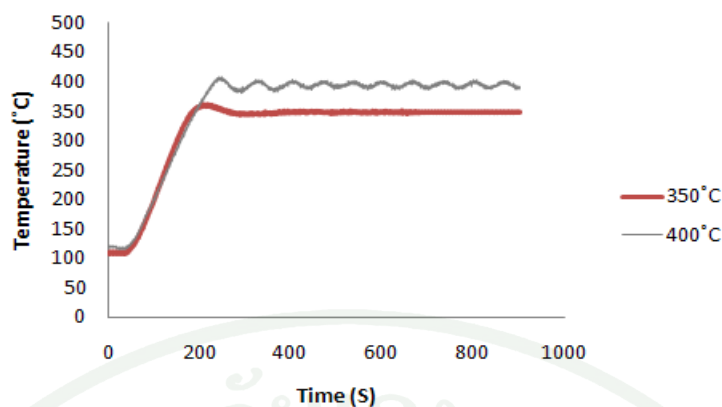
ภาพที่ 55 แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 4 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine

การที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิที่ต่ำทำให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถออกซิไดซ์สารพิษ CO, THC และ CH₄ ได้เลย ดังภาพที่ 56 เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 150 °C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ PRE-CAT และ MAIN-CAT จะสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลดสารพิษลงได้ เช่นเดียวกับที่เห็นผลใน Case 1



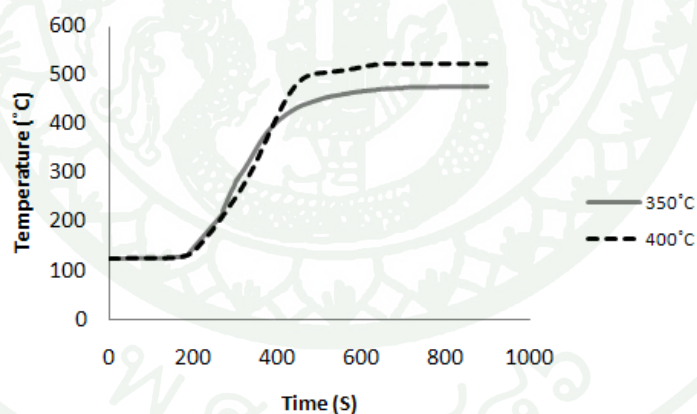
ภาพที่ 56 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 4 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

ต่อมาเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT พบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิไอเสียจาก 120 °C ไปถึง 350 °C และ 400 °C (โดยที่อุณหภูมิ 300 °C และ 450 °C นั้นไม่ได้ทำการเก็บค่าเนื่องจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 300 °C ใน Case 1 นั้น เห็นผลได้ว่าการยกอุณหภูมิไปที่ 300 °C นั้นไม่สามารถทำให้ลดปริมาณ CH₄ เกิน 90% ได้ดังตัวอย่างในภาพที่ 39A และการยกอุณหภูมิไปที่ 350 °C ก็สามารถทำให้ MAIN-CAT มีประสิทธิภาพในการลดมลพิษลงได้มากกว่า 95% แล้ว ดังภาพที่ 59A, 59B และ 59C) จะใช้ระยะเวลาตามภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 4

พบว่าเมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 350 °C และ 400 °C อุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT จะอยู่ที่ประมาณ 475 °C และ 500 °C ตามลำดับ โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 58 อุณหภูมิไอเสีย 475 °C และ 500 °C ที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT นั้นเพียงพอที่จะทำให้ CH_4 เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาใน MAIN-CAT ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ CH_4 ไปได้มากกว่า 95% ขึ้นไปดังที่แสดงในภาพที่ 59A



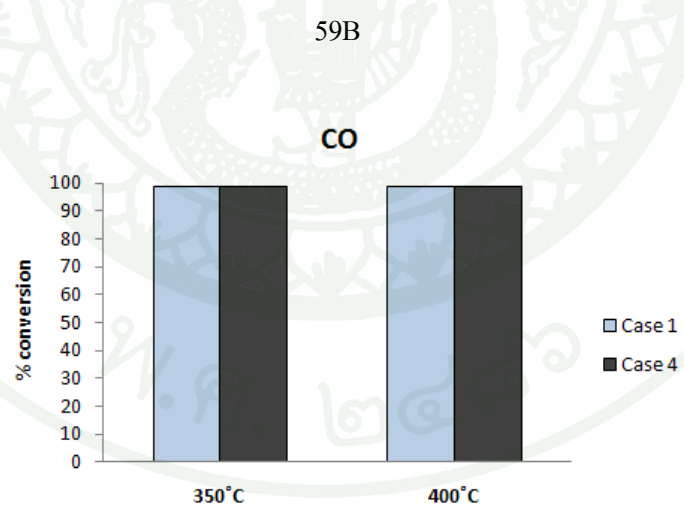
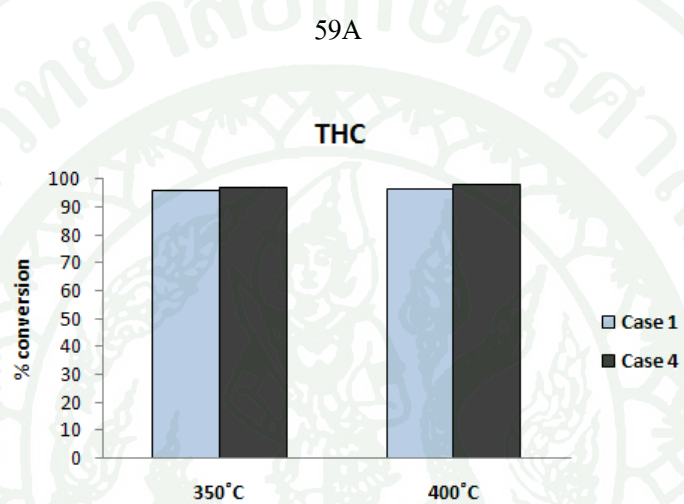
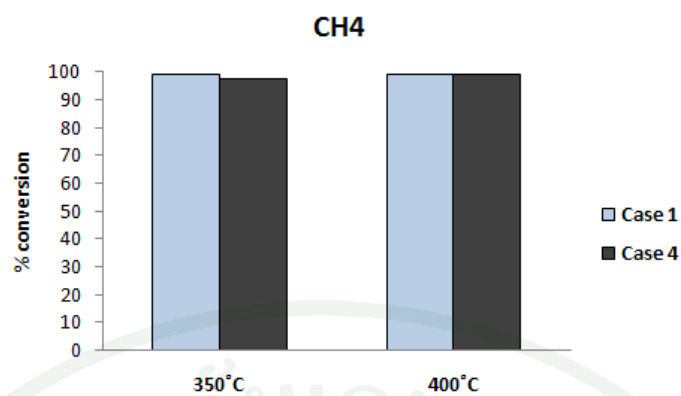
ภาพที่ 58 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 4

เมื่อมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการขกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT มีปริมาณลดลง ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 4 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Case	Temp. of Electrical Heater	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)
4	350 °C	After Engine	9,300	12,000	5,700
		After PRE-CAT	9,300	12,000	5,700
		After MAIN-CAT	200	342	70
	400 °C	After Engine	9,300	12,000	5,700
		After PRE-CAT	9,300	12,000	5,700
		After MAIN-CAT	50	200	70

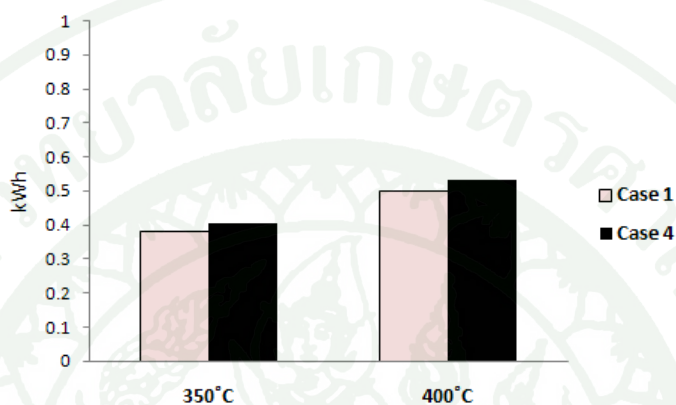
โดยในส่วนนี้จะสังเกตเห็นว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ตั้งแต่ 350 °C ขึ้นไปความสามารถในการลดปริมาณ CH₄, THC และ CO ของ MAIN-CAT มีมากกว่า 95% ขึ้นไป ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้ใกล้เคียงกับผลใน Case 1 ดังภาพที่ 59A, 59B และ 59C



59C

ภาพที่ 59 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH₄ (59A), THC (59B) และ CO (59C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 1 กับ Case 4 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียไปที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ใน Case 4 จะพบถึงอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณมาได้จากสมการที่ 16 แล้วได้ผลดังภาพที่ 60 ซึ่งพบว่าการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ Case 1 เนื่องจากใน Case 4 ระยะเวลาในการเข้าสู่ Set point ของฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้ระยะเวลานานขึ้นเมื่อเทียบกับ Case 1



ภาพที่ 60 เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง Case 1 เทียบกับ Case 4

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงภาระการทำงานต่ำเมื่อมีปรับค่า Energy Ratio ให้มีอัตราส่วนใช้ก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นจาก 70% เป็น 80% โดยปริมาตร ทำให้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ปริมาณมลพิษที่ออกมานั้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่า Energy Ratio ที่น้อยกว่า และเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิที่ต่ำทำให้แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ไม่ถึงจุดอุณหภูมิการทำงานในการออกซิไดซ์สารพิษ แต่ใน Case การทดลองนี้เราสามารถใช้อีตเตอร์ไฟฟ้ามาช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ให้สูงกว่า 350 °C ส่งผลให้ความสามารถในการลดปริมาณ CH₄, THC และ CO ของ MAIN-CAT มีมากกว่า 95% ขึ้นไป จึงแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ ทำให้เราสามารถใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นได้

5. พิจารณากรณีศึกษาที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆที่ผ่านมาจะสังเกตได้ถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญค่าหนึ่งก็คือค่า Mass flow rate ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง ในส่วนของหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณอากาศที่แตกต่างกันในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง Case 2 เทียบกับ Case 5 ซึ่งมีปริมาณ Mass flow rate ที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลพื้นฐานการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Case 2 และ 5

Case	2	5
Engine Speed (rpm)	1,300	900
Lambda	1.3	1.3
Energy Ratio (%)	70	70
Exhaust Temperature (°C)	175	100
Mass flow rate (kg/hr)	32.5	15.8
Power (kW)	3.37	0.4

หมายเหตุ สำหรับค่า Space velocity จะแสดงไว้อยู่ในส่วนของภาคผนวก จ

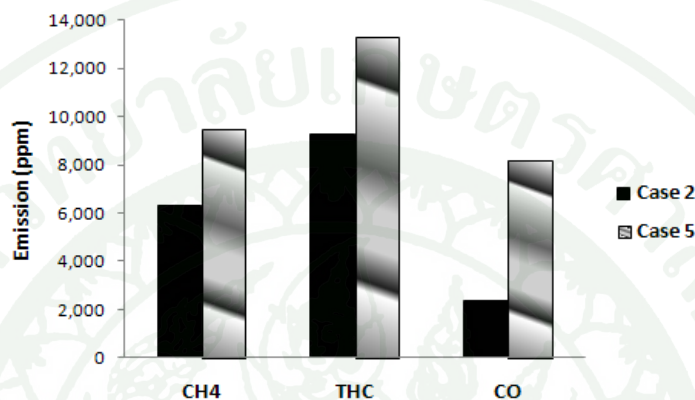
ในส่วนการพิจารณากรณีศึกษาที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 มีดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น คือ Mass flow rate และ ปริมาณของ CO

ตัวแปรตาม คือ อุณหภูมิไอเสียหลังจาก MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของการลดปริมาณ CH_4 , THC และ CO

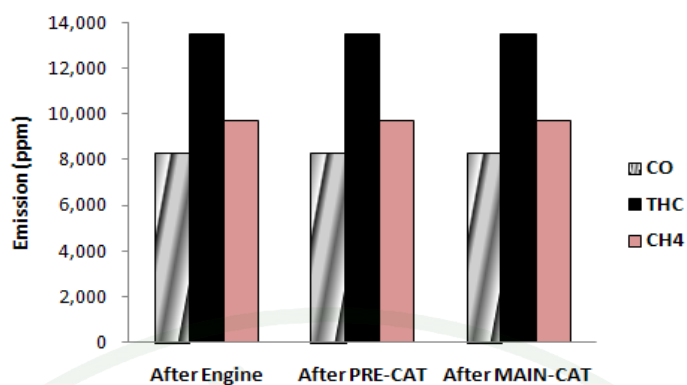
ตัวแปรควบคุม คือ Lambda

จากการทดสอบพบว่าในช่วงรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Case 5) อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิต่ำและมีปริมาณของ Mass flow rate ที่น้อย ปริมาณมลพิษที่ออกมาจึงมีปริมาณมากกว่าในช่วงที่เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิที่สูงและมีปริมาณของ Mass flow rate ที่มีปริมาณมากกว่า (Case 2) ดังที่แสดงในภาพที่ 61



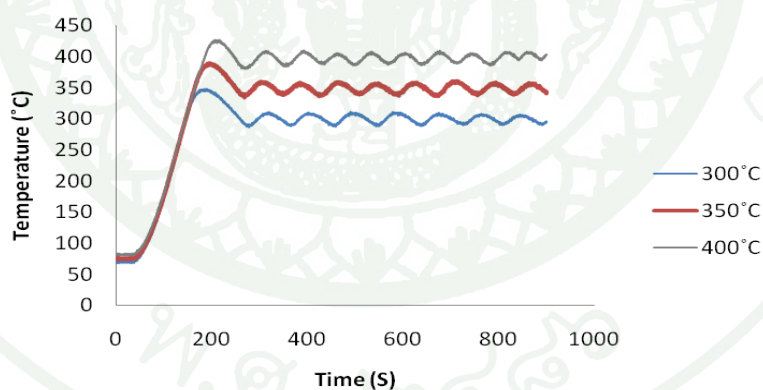
ภาพที่ 61 แสดงปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใน Case 1 เปรียบเทียบกับ Case 4 โดยวัดที่ตำแหน่ง After Engine

ซึ่งสังเกตได้ว่าใน Case 5 PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถออกซิไดซ์สารพิษ CO, THC และ CH₄ ได้เลย ดังรูปภาพที่ 62 เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 100 °C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ PRE-CAT และ MAIN-CAT จะสามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลดสารพิษลงได้ จะเห็นได้ว่าใน Case 5 ซึ่งเป็นรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมและเป็นช่วงที่เครื่องยนต์มีการทำงานที่ต่ำมาก มีการปล่อยมลพิษออกมาเป็นปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับ Case อื่นๆ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญที่ต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเป็นอย่างยิ่ง



ภาพที่ 62 แสดงถึงปริมาณมลพิษที่ออกมาใน Case 5 โดยวัดในตำแหน่งที่แตกต่างกันขณะที่ไม่มีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสีย

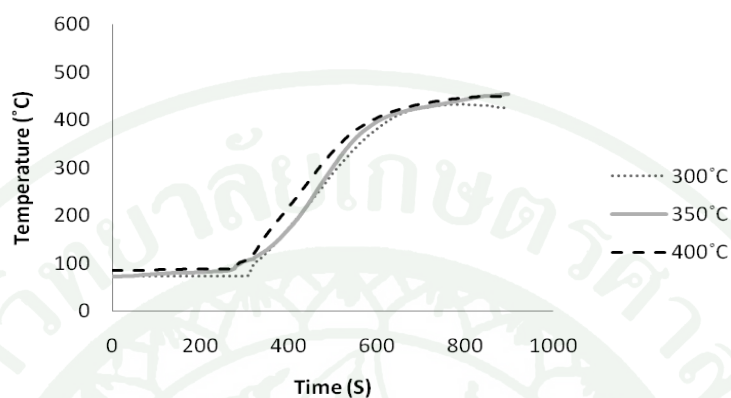
เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ใน Case 5 พบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิไอเสียจาก 80°C ไปถึง 300°C , 350°C และ 400°C (โดยที่อุณหภูมิ 450°C นั้นไม่ได้ทำการเก็บค่าเนื่องจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 350°C ก็สามารถทำให้เกิดคาไลคิคคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพในการลดมลพิษลงได้มากกว่า 95% แล้ว ดังภาพที่ 65A, 65B และ 65C) จะใช้ระยะเวลาตามภาพที่ 63



ภาพที่ 63 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 5

เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ของ Case 5 พบว่าเมื่อมีการการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 350°C และ 400°C อุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT จะอยู่ที่ประมาณ 455°C และ 450°C ตามลำดับ โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 64 ซึ่งอุณหภูมิที่สูงดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้ CH_4 เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาใน MAIN-CAT ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ CH_4 ไปได้เกือบหมดดังภาพที่ 65A ส่วนการ

เพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 300 °C อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก MAIN-CAT จะตกเหลืออยู่ที่ประมาณ 420 °C (แต่จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงหลังจากการใช้งานไปแล้ว 15 นาที) ซึ่งสามารถทำการออกซิไดซ์ CH_4 ได้ประมาณ 54% ตามภาพที่ 65A



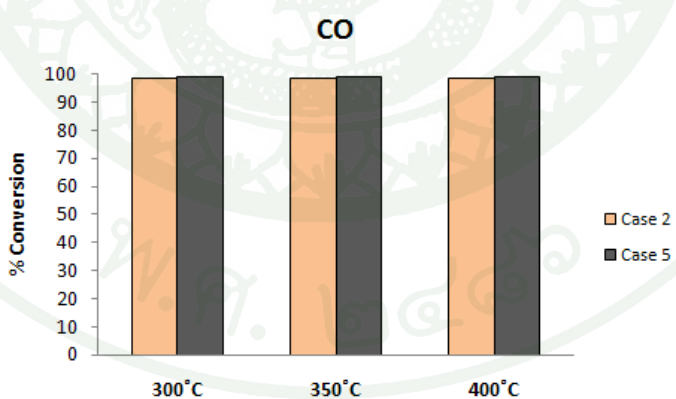
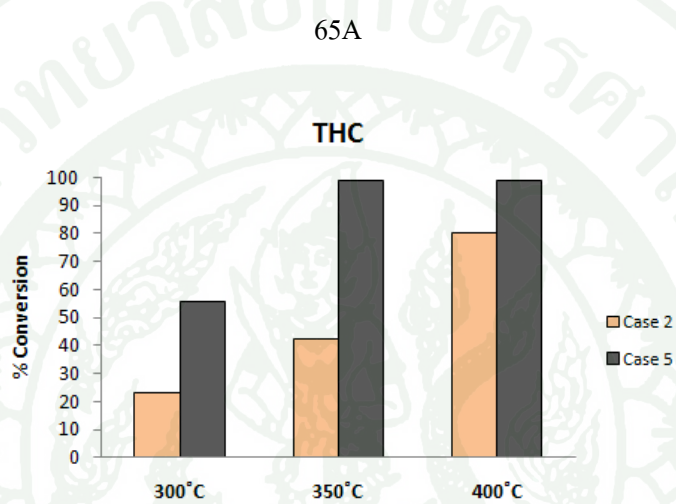
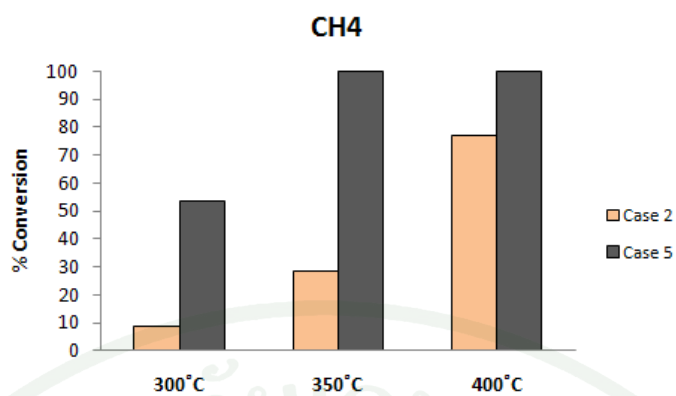
ภาพที่ 64 แสดงให้เห็นอุณหภูมิไอเสียที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT ภายหลังจากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าของ Case 5

เมื่อมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่ามลพิษที่วัดหลังจากออกจาก MAIN-CAT มีปริมาณลดลง ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ปริมาณมลพิษที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของ Case 5 หลังจากมีการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า

Case	Temp. of Electrical Heater	Emission Point	CH ₄ (ppm)	THC (ppmC)	CO (ppm)
5	300 °C	After Engine	9,700	13,500	8,300
		After PRE-CAT	9,700	13,500	8,300
		After MAIN-CAT	4,500	6,000	80
	350 °C	After Engine	9,700	13,500	8,300
		After PRE-CAT	9,700	13,500	8,300
		After MAIN-CAT	2	160	80
	400 °C	After Engine	9,700	13,500	8,300
		After PRE-CAT	9,700	13,500	8,300
		After MAIN-CAT	1	132	70

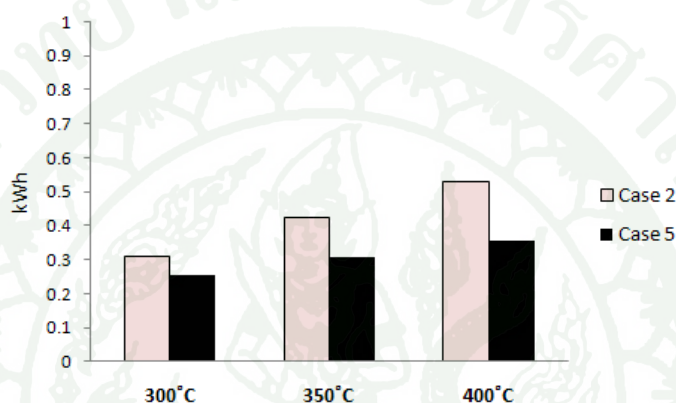
ใน Case 5 นี้จะสังเกตเห็นว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ตั้งแต่ 300 °C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษ CO ของ MAIN-CAT จะมีมากกว่า 95% ขึ้นไป (ภาพที่ 65C) เนื่องจากการที่ CO มีค่า LT อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200-250 °C ดังที่กล่าวไปในส่วนที่ 1 และการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียตั้งแต่ 350 °C ขึ้นไปความสามารถในการลดมลพิษ CH₄ และ THC ของ MAIN-CAT มีมากกว่า 95% ขึ้นไป แต่ในขณะที่ Case 2 นั้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 450 °C ขึ้นไปในการกำจัด CH₄ และ THC ดังภาพที่ 65A และ 65B



65C

ภาพที่ 65 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลด CH₄ (65A), THC (65B) และ CO (65C) ของ MAIN-CAT ระหว่าง Case 2 กับ Case 5 เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยยกอุณหภูมิทางเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

และจากการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียไปที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ใน Case 5 จะพบถึงอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณมาได้จากสมการที่ 16 แล้วได้ผล ดังภาพที่ 66 ซึ่งใน Case 5 นี้มีอัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่น้อยกว่า Case 2 ทุกช่วง อุณหภูมิการใช้งาน ซึ่งปัจจัยที่ทำให้อัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าใน Case 5 น้อยกว่า Case 2 นั้นเนื่องมาจากปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งคือ ปริมาณ Mass flow rate ของไอเสียใน Case 5 มี ปริมาณที่น้อยกว่า Case 2 ส่งผลให้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถยกอุณหภูมิเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วกว่า Case 2 จึงทำให้อัตราการใช้พลังงานน้อยกว่านั่นเอง



ภาพที่ 66 เปรียบเทียบให้เห็นถึงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆระหว่าง Case 2 เทียบกับ Case 5

ในส่วนนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณ Mass flow rate ของไอเสียนี้เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญตัวแปรหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมและระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอย่างมากกล่าวคือ เมื่อ Mass flow rate มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นมลพิษจำพวก CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีปริมาณที่ลดลง (ดังเช่นผลการทดลองในส่วน of Case 2) ส่งผลให้การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการลดปริมาณ CH_4 และ THC แ่ลงคือ ต้องใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่อุณหภูมิ 450°C จึงจะทำให้ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH_4 และ THC ได้มากกว่า 90% ขึ้นไป แต่ในส่วนการทดสอบใน Case 5 นี้พบว่าปริมาณ Mass flow rate มีปริมาณที่น้อยลงทำให้ CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นช่วยให้การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ไปที่ 350°C ก็สามารถทำให้ MAIN-CAT ออกไซด์ CH_4 และ THC ลงไปได้มากกว่า 95% ขึ้นไป และใน Case 5 นี้ก็จะพบด้วยว่า ถ้า Mass flow rate นั้น มีปริมาณที่มากจะส่งผลให้ระยะเวลาในการยกอุณหภูมิไอเสียของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้าสู่จุด Set point นั้นใช้ระยะเวลาที่มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานของ

ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้า Mass flow rate นั้น มีปริมาณที่น้อยจะส่งผลให้ระยะเวลาในการยกอุณหภูมิไอเสียของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเข้าสู่จุด Set point นั้นใช้ระยะเวลานี้น้อยลง และส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าน้อยลงตามไปด้วย



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการศึกษาการลดปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ติดตั้งเข้าไปในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จากตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ได้ศึกษาทดสอบได้แก่ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ ปริมาณของออกซิเจน (Lambda) ปริมาณของ Mass flow rate และ %Energy Ratio ที่แตกต่างกัน เพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการลดก๊าซมีเทนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

1.1 อุปกรณ์ของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถติดตั้งร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์และสามารถนำไปติดตั้งในระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ทดสอบได้ และเมื่อมีการใช้งานให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้สูงขึ้น ส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถเข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานในการออกซิไดซ์ CH_4 , THC และ CO ให้มีปริมาณที่ลดลงได้

1.2 การให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียให้สูงมากขึ้นความต้องการพลังงานของฮีตเตอร์ก็จะมากขึ้นตาม โดยที่การยกอุณหภูมิไอเสียที่ 300°C ฮีตเตอร์มีความต้องการพลังงานต่ำสุด ส่วนการยกอุณหภูมิไอเสียที่ 450°C ฮีตเตอร์มีความต้องการพลังงานสูงสุด

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซมีเทนของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำ โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์พบว่า

2.1 ในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีอุณหภูมิไอเสียออกมาจากเครื่องยนต์ที่ 100°C และ 150°C นั้น เป็นจุดอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่ PRE-CAT และ MAIN-CAT ที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลด THC, CH_4 และ CO ลงได้ แต่เมื่ออุณหภูมิของไอเสียเพิ่มขึ้นเป็น 175°C ส่งผลให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถเริ่มทำ

ปฏิกิริยาออกซิไดซ์ CO ให้ลดลงได้เนื่องอุณหภูมิที่ 175°C นั้นอยู่ใกล้จุด LT ของ CO ($200-250^{\circ}\text{C}$) แต่ยังไม่สามารถทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในการลด THC และ CH_4 ให้ลดลงได้

2.2 การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ให้มีอุณหภูมิ 300°C ขึ้นไปนั้น MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CO ลงได้มากกว่า 95% ขึ้นไปทั้งนี้สืบเนื่องจากการที่ CO มีค่า LT อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $200-250^{\circ}\text{C}$ แต่ในส่วนการทดลองนี้ได้ออกแบบให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียเริ่มต้นที่ 300°C ซึ่งเกินจุด LT ของ CO ไปแล้ว

2.3 ในส่วนของการทดลองเพิ่มอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นเป็น 175°C เพื่อต้องการที่จะช่วยให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียเข้าสู่จุด Set point ให้ได้เร็วขึ้นนั้น ฮีตเตอร์ไฟฟ้ากลับมีการใช้ระยะเวลาที่มากกว่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ที่ 150°C ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเช่น ปริมาณ Mass flow rate ของไอเสีย ขนาดกำลังไฟฟ้าของตัวฮีตเตอร์เองและการปรับจูนค่า PID ในโปรแกรม NI LabVIEW™ 8.6 เป็นต้น ที่จะส่งผลให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้เวลาในการยกอุณหภูมิเข้าสู่จุด Set point ได้เร็วหรือช้า

2.4 ในช่วงภาระการทำงานต่ำเมื่อมีการลด Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจาก Lambda 1.3 เป็น 1.1 เพื่อให้เข้าใกล้สภาวะเผาไหม้พอดี ($\lambda=1$) มากขึ้น จะมีปริมาณมลพิษของ CO, THC, CH_4 ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่สูงขึ้น เนื่องจากการมีอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงที่น้อยลงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ในส่วนของการทดลองนี้พบว่าการใช้ Lambda 1.3 ก็เพียงพอต่อการใช้งานแล้วเพราะในส่วนของการลด CH_4 โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 350°C นั้น Lambda 1.3 ก็มีประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างกับ Lambda 1.1 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการลด CH_4 ลงได้มากกว่า 95% ขึ้นไป

2.5 ในช่วงภาระการทำงานต่ำเมื่อมีปรับค่า Energy Ratio ให้มีอัตราส่วนใช้ก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นจาก 70% เป็น 80% โดยปริมาตร ทำให้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้มีปริมาณมลพิษของ CO, THC และ CH_4 ที่ออกมาสูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่า Energy Ratio ที่น้อยกว่า และเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดคาไลคคอนเวอร์เตอร์ไม่ถึงจุดอุณหภูมิการทำงานในการออกซิไดซ์สารพิษ แต่เราสามารถใช้อีตเตอร์ไฟฟ้ามาช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าแคตตาไลคคอนเวอร์เตอร์เพื่อแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ทำให้เราสามารถใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้นได้

2.6 จากการทดลองพบว่าถ้าปริมาณของ Mass flow rate และปริมาณของ CO ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีเหมาะสม (Mass flow rate มีปริมาณที่น้อย และ CO มีปริมาณที่สูง) การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้ายกอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ไปที่ 350°C ก็สามารถลดปริมาณก๊าซมีเทนได้มากกว่า 95%

2.7 ในส่วนของงานวิจัยนี้พบว่าคุณลักษณะของไอเสียได้แก่ ปริมาณของ CO และปริมาณ Mass flow rate ของไอเสียเอง นั้นมีบทบาทสำคัญต่อการใช้อีฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ในการลดปริมาณ CH_4

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบและดัดแปลงขึ้นมาเพื่อให้สามารถติดตั้งในห้องทดสอบฮีตเตอร์ไฟฟ้าจึงมีขนาดใหญ่และสามารถใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ AC ได้เพื่อตัดปัญหาเรื่องแหล่งจ่ายพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้จึงเป็นขนาดแรงดันไฟฟ้า 110V AC แต่ในรถยนต์ที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันนั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้แรงดันไฟฟ้า 12V DC ซึ่งไม่เหมาะสมถ้าจะนำฮีตเตอร์แบบที่ใช้ในการทดลองนี้ไปติดตั้ง เนื่องจากต้องผ่านตัวหม้อแปลงไฟฟ้าในการแปลงไฟฟ้าจาก 12V DC เป็น 110V AC ก่อนเพื่อให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ทำให้ยุ่งยากในการใช้งาน ถ้าจะนำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าไปติดตั้งบนรถควรที่จะเลือกใช้อีฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้บนรถยนต์ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้เหมาะสมต่อการติดตั้งและสามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าขนาด 12V DC

2. ถ้าจะนำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าไปติดตั้งบนรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ควรมีการศึกษาและเปรียบเทียบเกี่ยวกับแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ระหว่าง แบตเตอรี่กับ อัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อให้เหมาะสมกับระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมากที่สุด

3. งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเฉพาะบางช่วงของภาระการทำงานต่ำในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมซึ่งมีปัญหาจากมลพิษมากที่สุด อาจพิจารณาทดสอบในช่วงภาระการทำงานต่ำให้ละเอียดมากกว่านี้และพิจารณาทดสอบในช่วงภาระการทำงานอื่นๆของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเพิ่มขึ้น เช่น ในช่วงภาระปานกลาง ในช่วงจังหวะการเปลี่ยนเกียร์ เป็นต้น

4. งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในห้องทดสอบเมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะ Steady-state ควรทำการทดลองเพิ่มเติมในช่วง Transient เพราะว่าการใช้งานจริงบนรถยนต์การทำงานของเครื่องยนต์จะเป็นแบบ Transient

5. อาจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำเทคนิคอื่นเข้ามาช่วยการทำงานของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า เช่น การใช้ EGR, การปรับ Valve timing เป็นต้น

6. อาจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณ %Energy Ratio ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้สูงขึ้นเพราะจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาใช้งาน ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเป็นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ก็ต้องควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานด้วย เช่น ปริมาณ Mass flow rate เป็นต้น

7. ควรมีการติดตั้ง Thermocouple ไว้ภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ระหว่างการใช้งานฮีตเตอร์ไฟฟ้า

8. ถ้าต้องการศึกษาเกี่ยวมลพิษอนุภาค (PM) ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ควรหาเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงมาใช้ในการวัด เนื่องจากมลพิษอนุภาคที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นมีขนาดเล็กกว่าเครื่องยนต์ดีเซลมากทำให้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดต่ำไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน

9. อาจศึกษาเกี่ยวกับค่า Lambda ในช่วงอื่นๆเพิ่มเติม เช่น ช่วง Lambda ที่มากกว่า 1.3 ขึ้นไป เพื่อหาจุดการทำงานที่เครื่องยนต์และระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

10. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขออนุณหภูมิไอเสียในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-350 °C เพื่อหาจุดอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการทดลองนี้จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการลดปริมาณ CH_4 มากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ณภูมิ ไวทยะพันธ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย. 2554. การลดปริมาณก๊าซมีเทนของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์, AEC04. น. 49. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กระบี่.
- อนิรุทธิ์ น้อยเพ็ง. 2554. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Aroonsrisopon, T., M. Salad, E. Wirojsakunchai, K. Wannatong, S. Siangsanorh and N. Akarapanjavit. 2009. Injection Strategies for Operational Improvement of Diesel Dual Fuel Engines under Low Load Conditions. **SAE Technical Paper** 2009-01-1855.
- Asad, U., S. Banerjee, G.T. Reader, M. Wang and M. Zheng. 2007. Energy Efficiency Analysis between In-cylinder and External Supplemental Fuel Strategies. **SAE Technical Paper** 2007-21-1125.
- AVL. 2005. **Smoke value measurement with the filter-paper-method - Application notes.** AVL List GmbH, Graz. (Unpublished manuscript).
- Bahr, O., G.A. Karim and B. Liu. 1999. An examination of the flame spread limits in a dual fuel engine. **Applied Thermal Engineering** 19: 1071-1080.
- Blakeman, P.G., A.F. Chiffey, P.R. Phillips, M.V. Twigg and A.P. Walker. 2003. Developments in Diesel Emission Aftertreatment Technology. **SAE Technical Paper** 2003-01-3753.

- Brück, R., H. Peter and M. Wolfgang. 1999. The Necessity of Optimizing the Interactions of Advanced Post-Treatment Components in Order to Obtain Compliance with SULEV-Legislation. **SAE Technical Paper** 1999-01-0770.
- Canova, M., F. Chiara, J. Cowgill, S. Midlam-Mohler, Y. Guezennec and G. Rizzoni. 2007. Experimental Characterization of Mixed-Mode HCCI/DI Combustion on a Common Rail Diesel Engine. **SAE Technical Paper** 2007-24-0085.
- Caraceni, A., V. Cioffi, F. Garofalo, A. Senatore, G. Vittorioso, C. Barberio and G. Saroglia. 1999. Emission Control Technologies for EU Stage IV + EOBD on Small Cars (Part I): Pre-screening of Potential Solutions. **SAE Technical Paper** 1999-01-0775.
- Chiew, L., P. Kroner and M. Ranalli. 2005. Diesel Vaporizer: An Innovative Technology for Reducing Complexity and Costs Associated with DPF Regeneration. **SAE Technical Paper** 2007-24- 0671.
- Deconninck, B. 2005. A New Methodology for On-Line Lubricant Consumption Measurement. **SAE Technical Paper** 2005-01-1125.
- Garner, C.P. and J.C. Dent. 1989. Microwave Assisted Regeneration of Diesel Particulate Trap. **SAE Technical Paper** 890174.
- Graham, L.A., G. Rideout, D. Rosenblatt and J. Hendren. 2008. Greenhouse gas emission from heavy-duty vehicles. **Atmospheric Environment** 42: 4665-4681.
- Guo, G., X. Ning, M.L. Paul, H.H. Robert and M.M. Maricq. 2003. Performance of a Catalyzed Diesel Particulate Filter System During Soot Accumulation and Regeneration. **SAE Technical Paper** 2003-01-0047.
- Hanel, F.J., E. Otto and R. Brück. 1996. Electrically Heated Catalytic Converter (EHC) in the BMW ALPINA B12 5.7 Switch-Tronic. **SAE Technical Paper** 960349.

Hanel, F.J., E. Otto, R. Brück, T. Nagel, and N. Bergau. 1997. Practical Experience with the EHC System in the BMW ALPINA B12. **SAE Technical Paper** 970263.

Heck, R.M. and J.F. Robert. 2002. **CATALYTIC AIR POLLUTION CONTROL Commercial Technology**. 2 ed. WILEY-INTERSCIENCE, Canada.

Heywood, J.B. 1988. **Internal Combustion Engine Fundamental**. 2nd ed. McGraw-Hill, Singapore.

Kaiser, F.W., W. Maus, H. Swars and R. Brück. 1993. Optimization of an Electrically-Heated Catalytic Converter System Calculations and Application. **SAE Technical Paper** 930384.

Karim, G.A., Z. Lui and W. Jones. 1993. Exhaust Emissions from Dual Fuel Engines at Light Load. **SAE Technical Paper Series** 932822.

Kellyn, A. and R.F. Gunst. 1990. Respond of ozone to changes in hydrocarbon and nitrogen oxide concentrations in outdoor smog chambers filled with Los Angeles air. **Atmospheric Environment** 24A: 2991-3005.

Kim, D.S. and C.S. Lee. 2006. Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR. **Fuel** 85: 695-704.

Knafl, A., S.B. Busch., M. Han., S.V. Bohac., D.N. Assanis., P.G. Szymkowicz. and R.D. Blint. 2006. Characterizing Light-Off Behavior and Species-Resolved Conversion Efficiencies during In Situ Diesel Oxidation Catalyst Degreening. **SAE Technical Paper** 2006-01-0209.

- Konstandopoulos, A.G., E. Papaioannou, D. Zarvalis, S. Skopa, P. Baltzopoulou, E. Kladopoulou, M. Kostoglou and S. Lorentzou. 2005. Catalytic Filter Systems with Direct and Indirect Soot Oxidation Activity. **SAE Technical Paper** 2005-01-0670.
- Korakianitis, T., A.M. Namasivayam and R.J. Crookes. 2010. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emission. **Progress in Energy and Combustion Science** 1-24.
- Kubsh, J.E. and G.W. Brunson. 1996. EHC Design Options and Performance. **SAE Technical Paper** 960341.
- Laing, P.M. 1994. Development of an Alternator-Powered Electrically-Heated Catalyst System. **SAE Technical Paper** 941042.
- Lapisardi, G., L. Urfels, P. G  lin, M. Primet, A. Kaddouri, E. Garbowski, S. Toppi and E. Tena. 2006. Superior catalytic behaviour of Pt-doped Pd catalysts in the complete oxidation of methane at low temperature. **Catalysis Today** 117: 564-568.
- Liu, B., R.E. Hayes, Mc.D. Checkel, M. Zheng and E. Mirosh. 2001. Reversing flow catalytic converter for a natural gas/diesel dual fuel engine. **Chemical Engineering Science** 56: 2641-2658.
- Martin, A. 1984. Estimated washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogen dioxide and ozone. **Atmospheric Environment** 18: 1955-1961
- Moallemi, F., G. Batley, V. Dupont, T.J. Foster, M. Pourkashanian and A. Williams. 1999. Chemical modelling and measurements of the catalytic combustion of CH₄/air mixtures on platinum and palladium catalysts. **Catalysis Today** 47: 235-244.

- Murphy, O.J., R.T. Kukreja and C.C. Andrews. 1999. Electrically Initiated Chemically Heated Catalytic Converter to Reduce Cold-Start Emissions from Automobiles. **SAE Technical Paper** 1999-01-1233.
- Noipheng, A., N. Waitayapat, T. Aroonsrisopon, E. Wirojsakunchai, T. Thummadetsak and K. Wannatong. 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** 2011-01-2093.
- Ohno, K., N. Taoka, T. Ninomiya, H. Sungtae, M. Kojima and T. Komori. 1999. SiC Diesel Particulate Filter Application to Electric Heater System. **SAE Technical Paper** 1999-01-0464.
- Papagiannakis, R.G. and D.T. Hountalas. 2003. Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine. **Applied Thermal Engineering** 23: 353-365.
- _____. 2004. Combustion and exhaust emission characteristics of dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas. **Energy Conversion and Management** 45: 2971-2987.
- Pfalzgraf, B., E. Otto, A. Wirth, P.F. Kuper, W. Held and A. Donnerstag. 1995. The System Development of Electrically Heated Catalyst (EHC) for the LEV and EU-III Legislation. **SAE Technical Paper** 951072.
- Ranalli, M., P. Zelenka, S. Schmidt and G. Elfinger. 2001. An Active Regeneration Aid as a Key Element for Safe Particulate Trap Use. **SAE Technical Paper** 2001-01-062.
- Salomons, S., R.E. Haye, M. Poirier and H. Sapoundjiev. 2003. Modelling a reverse flow reactor for the catalytic combustion of fugitive methane emissions. **Computers and Chemical Engineering** 28: 1599–1610.

- Shimasaki, Y., H. Kato, H. Muramatsu, T. Teshirogi, T. Aoki, A. Saito and G. Rodrigues. 1996. Study on Conformity Technology with ULEV Using EHC System. **SAE Technical Paper** 960342.
- Shimasaki, Y., H. Kato, F. Abe, S. Hashimoto and T. Kaneko. 1997. Development of Extruded Electrically Heated Catalyst System for ULEV Standards. **SAE Technical Paper** 971031.
- Sumiya, S., H. Oyamada., T. Fujita., K. Nakamura., K. Osumi and Y. Tashiro. 2009. Highly Robust Diesel Oxidation Catalyst for Dual Mode Combustion System. **SAE Technical Paper** 2009-01-0280.
- Tepimonrat, T., K. Kamsinla, E. Wirojsakunchai, T. Aroonsrisopon and K. Wannatong. 2011. Use of Exhaust Valve Timing Advance for High Natural Gas Utilization in Low-Load Diesel Dual Fuel Operation. **JSAE Paper** 20119265.
- Turns, S.R. 2000. **An Introduction to Combustion**. 2 ed. Mc-Graw-Hill, Singapore.
- Wagner, U., A. Velji and U. Spicher. 2005. Development and Testing of a Diesel Particulate Filter with an Electrical Regeneration Starting Module. **SAE Technical Paper** 2005-01-3703.
- Wannatong, K., N. Akarapanyavit, S. Siengsanorh, T. Aroonsrisopon and S. Chanchaona. 2009. New Diesel Dual Fuel Concepts: Part Load Improvement. **SAE Technical Paper** 2009-01-1797.
- Watanabe, T., K. Kawashima., Y. Tagawa., K. Tashiro., H. Anoda., K. Ichioka., S. Sumiya and G. Zhang. 2007. New DOC for Light Duty Diesel DPF System. **SAE Technical Paper** 2007-01-1920.

Wirojsakunchai, E., C. Kolodziej, R. Yapaulo, D.E. Foster and N. Schmidt. 2007. Effects of DPF Washcoat Variations on DPF Active Regeneration Characteristics.

SAE Technical Paper 2007-24-0092.

Wirojsakunchai, E. 2009. **Final Report DEVELOPMENT OF THE AFTERTREATMENT SYSTEM FOR DDF VEHICLE.** 50.

Whidenberger, W.A., D.T. Sheller and J. Walters. 1992. Experiences with 20 User Vehicles Equipped with Electrically Heated Catalyst Systems-Part I. **SAE Technical Paper** 920722.

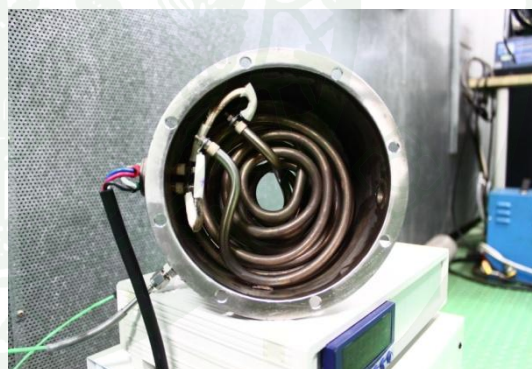
Yaegashi, T., K. Yoshizaki, T. Nagami, S. Sugiura, T. Yoshinaga and K. Ohsawa. 1994. New Technology for Reducing the Power Consumption of Electrically Heated Catalysts. **SAE Technical Paper** 940464.







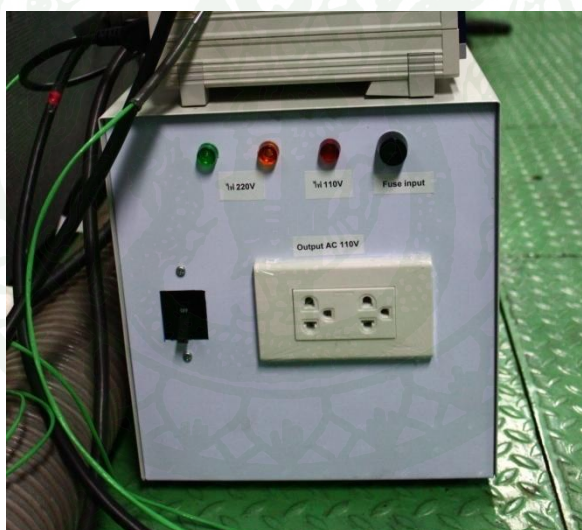
ภาพผนวกที่ ก1 แสดงรูปเครื่องยนต์ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ



ภาพผนวกที่ ก2 แสดงแบบหุ้มฮีทเตอร์ไฟฟ้า (ซ้าย) และลักษณะการขดของฮีทเตอร์ไฟฟ้า (ขวา)



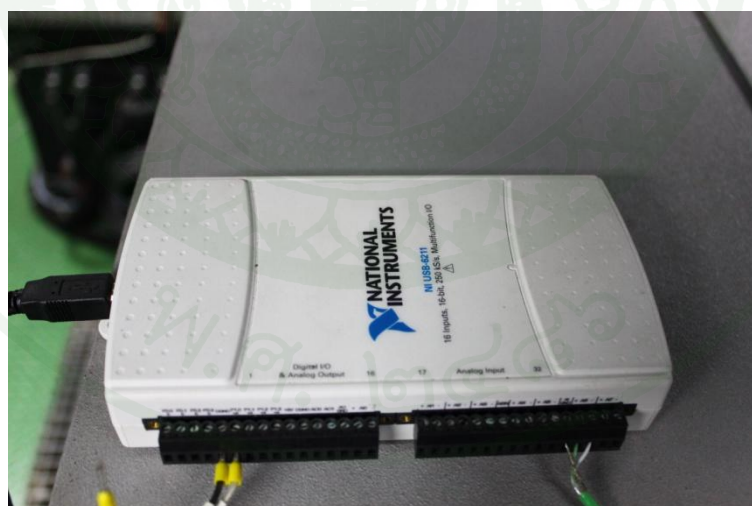
ภาพผนวกที่ ก3 แสดงการติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับ MAIN-CAT



ภาพผนวกที่ ก4 ภาพถ่าย Transformer ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจาก 220V AC เป็น 110V AC



ภาพผนวกที่ ก5 ภาพถ่าย Solid State Relay



ภาพผนวกที่ ก6 ภาพถ่าย Analog to Digital Converter



ภาพผนวกที่ ก7 ภาพถ่าย AC Dynamometer

รายละเอียดทางเทคนิคของ AC Dynamometer

Technical Features

- Full four-quadrant operation with high speed and torque dynamics
- Voltage intermediate circuit using IGBT technology
- Torque calculation with 4 kHz for air gap / 1 kHz for shaft.
- Optional zero torque simulation.
- Optional simulation of gear shifting oscillations in the drivetrain.
- Torque response time better than 3 ms
- Current harmonics < 4.5 %
- Power factor 1
- Grease lubrication for bearings; re-lubrication via nipples

Machine

Cradled AC dynamometer with a squirrel cage rotor, which is heat-shrunk onto the shaft enabling high speed and low vibration.

Features:

- Construction design IM-B3
- Protection class IP 23

- Forced air cooling
- Bearing temperature monitoring by PT100 on DE and NDE side
- Winding temperature monitoring by PTC resistors (warning and shut-off)
- Fan can be switched off for acoustic measurements; with automatic switch on at winding temperature warning.
- Optical speed encoder with 1024 (4096 for some versions) pulses per resolution.
- Ambient temperature during operation: +5 to +40 °C
- Ambient relative humidity: max. 95 %, non-condensed
- Overload capability 25 % (1 min in 15 min)



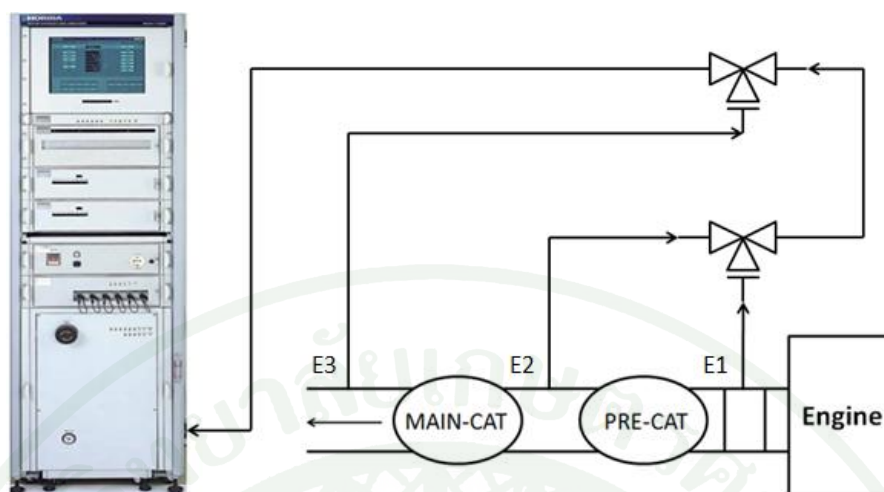
ภาพผนวกที่ ก8 ภาพถ่าย AVL Fuel balance & Fuel temperature control

ตารางผนวกที่ ก1 รายละเอียดของเครื่อง AVL Fuel balance & Fuel temperature control

Vessel capacity:	1800 g can be switched to 900 g/ 450 g/ 225 g
Systematic measurement uncertainty:	$U_s = 0.12 \%$
Maximum measurement frequency:	10 Hz
No. of measurements (average):	1 ... 99
Ambient temperature:	5 ... 50 °C
Fuel temperature:	-10 ... +70 °C
Fuel supply pressure to the system:	0.1 ... 0.8 bar
Fuel supply flow:	max. consumption + 100 kg/h
Fuel circulation capacity at 50Hz:	standard 240 l/h, optional 450 l/h
Fuels:	Otto (EN228), Diesel (EN590), up to 6% Biodiesel (EN14214) and 20% alcohol With FlexFuel option: up to 100% alcohol and biodiesel

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Pressure control (option):	feed pressure: ~0 ... 6 bar (rel.) turn pressure: ~0 ... 0.5 bar (rel.) special ranges available on request
Temperature control range:	adjustable from appr.10 °C* ... 80 ° C** * depending on cooling water temperature ** depending on heat return flow of the engine and fuel properties – gas bubble formation has to be avoided
Temperature stability:	better than 0.02 °C
Heating power (option):	1.6 kW
Cooling power:	1.6 kW at 10 °C spread and 0.5 bar cooling water differential pressure
Interfaces AVL 733S:	RS232 (AK compliant) or 733/730 protocol Analog 0 ... 10 V (optional) Digital I/O (optional)
Interfaces AVL 753C:	2x RS232 (AK compliant) Analog 0 ... 10 V (optional) Digital I/O (optional)
Power supply:	230 V, 50 Hz 220 V, 60 Hz (option) 100 V, 50-60 Hz (option) 115 V, 60 Hz (option)
Power consumption:	2.25 kW
Dimensions:	770 x 1350 x 345 mm (W x H x D)
Weight (dry):	135 kg



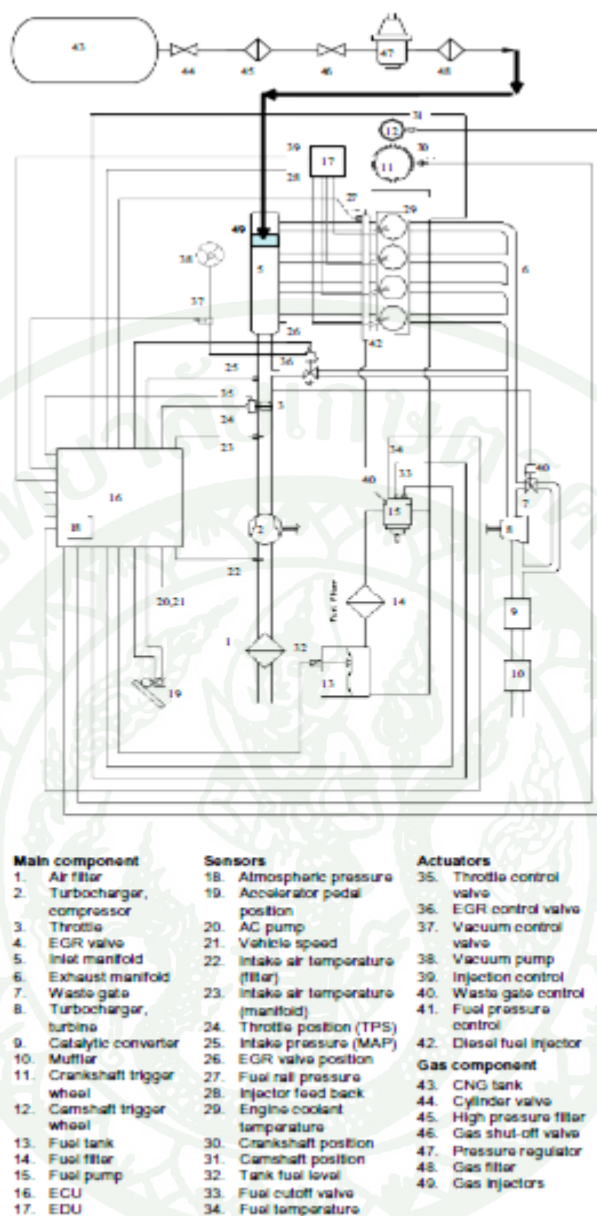
ภาพผนวกที่ ก9 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดไอเสีย HORIBA MEXA 7100 DEGR และ แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณมลพิษ

ที่มา: อนิรุทธ์ (2554)

หมายเหตุ: E1 คือจุดวัดปริมาณมลพิษก่อนเข้า PRE-CAT (After Engine), E2 คือจุดวัดปริมาณมลพิษหลังออกจาก PRE-CAT (After PRE-CAT) และ E3 คือจุดวัดปริมาณมลพิษหลังออกจาก MAIN-CAT (After MAIN-CAT)

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลของเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR

Measurement	CO		CO ₂		NO/NO _x	
Components	min	max	min	max	min	max
	(ppm)	(%vol.)	(ppm)	(%vol.)	(ppm)	(ppm)
Range	0-100	0-12	0-5000	0-20	0-10	0-10000
Principle	NDIR		NDIR		CLD	
Sample Line	One line for raw exhaust gas without dilution (direct measurement line)					
Sample Gas Flow	Approximation 15 L/min					
Response Time of Analyzers T10-90	less than 0.9 s		less than 0.8 s		less than 0.9 s	
Noise	within +1.0% FS		within +1.0% FS		within +1.5% FS (range under 20 ppm), within +1.0% FS (range over 20 ppm)	
Measurement	THC		O ₂		CH ₄	
Components	min	max	min	max	min	max
	(ppmC)	(ppmC)	(%vol.)	(%vol.)	(ppmC)	(ppmC)
Range	0-10	0-50000	0-5	0-25	0-10	0-50000
Principle	FID		MPD		FID	
Sample Line	One line for raw exhaust gas without dilution (direct measurement line)					
Sample Gas Flow	Approximation 15 L/min					
Response Time of Analyzers T10-90	less than 0.4 s		less than 0.75 s		less than 0.4 s	
Noise	within +1.0% FS		within +1.0% FS for zero		within +1.0% FS	



ภาพผนวกที่ ก10 แสดงตำแหน่งการอุปกรณ์ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ที่มา: Wannatong *et al.* (2009)

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลการทำงานของเครื่องยนต์ Case 1 ถึง 5

Case	SOI (CA)	EGR (%)	Throttle (%)	Air (kg/hr)	Fuel Balance (kg/hr)	Gas Consumption (kg/hr)
1	35/0	90	8	27.5	0.35	0.99
2	35/0	90	11	32.5	0.40	1.22
3	35/0	90	5.5	22.2	0.32	1.02
4	35/0	90	5.8	27.4	0.20	1.10
5	35/0	90	5.5	15.8	0.19	0.60



ภาคผนวก ข
วงจรควบคุมการยกอุณหภูมิของระบบฮีทเตอร์ไฟฟ้า



รายละเอียดของเชื้อเพลิง

น้ำมันดีเซล (B2) ซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 0.0283% โดยมวล, กำมะถันน้อยกว่า 0.01% โดยมวล และน้ำน้อยกว่า 0.05% โดยปริมาตร ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม น้ำมันดีเซล (B2) เป็นน้ำมันดีเซลที่ผลิตโดยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โดยจำหน่ายวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2551 นอกจากนี้คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2) แสดงไว้ในตารางที่ 9 โดยที่ก๊าซธรรมชาติเป็นข้อมูลจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2554 และน้ำมันดีเซล (B2) เป็นค่าที่ประมาณจากน้ำมันดีเซล (B0) และ น้ำมันดีเซล (B5) มีค่า LHV, H/C, SG อ้างอิงจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. นอกจากนี้ (A/F)_s และ H/C คำนวณโดย MW (Heywood, 1988) โดยข้อมูลดังกล่าวจะแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 4

ตารางผนวกที่ ๑1 รายละเอียดคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2)

ITEM	Natural Gas	Diesel (B2)	Unit
LHV	34.14	42.8	MJ/kg
MW	22.198	170	kg/kmole
(A/F) _s	11.711	14.5	-
H/C	3.24348	1.8	-
O/C	0.25589	-	-
N/C	0.03533	-	-
SG	0.77	0.83	-

ที่มา: Heywood (1988) และสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2553)

ตารางผนวกที่ ค2 รายละเอียดคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ

Property	Test Method	Specific Value	Result
Appearance	Visual	Pass	Pass
Ash, Mass%	ASTM D482-03	0.01 max.	< 0.01
Carbon Residue on 10%, Distillation	ASTM D4530-07	0.05 max.	< 0.05
Residue, Micro Method, % (m/m)			
Calculated Cetane Index or Cetane	ASTM D976-04b	47 min.	56.5
Number	or		
	ASTM D613-01		
Color, ASTM	ASTM D1500-04a	2.0 max.	L0.5
Corrosion	ASTM D130-04		
Corrosion, Copper Strip 3 hr. at 50 °C, number		1 max.	1a
Density at 15 °C, g/mL	ASTM D4052-96 (Reapproved 2002)	0.81-0.87	0.8325
Distillation :	ASTM D86-01		
10 % Recovered, °C		To be reported	214.6
50 % Recovered, °C		To be reported	284.0
90 % Recovered, °C		357 max.	355.1
Flash Point, PMCC, °C	ASTM D93-07	60 min.	73.0
Lubricity by HFRR, mm	CEC F-06-A-96	460 max.	> 460
Pour Point, °C	ASTM D97-96a or	9 max.	
Pour Point, °C	ASTM D5950-02	9 max.	0
Sulfur Content, Mass %	ASTM D4294-03	0.035 max.	0.0283
Viscosity, Kinematic at 40 °C, cSt (mm ² /s)	ASTM D445-06 or	1.8 - 4.1	
Viscosity, Kinematic at 40 °C, cSt (mm ² /s)	NIR	1.8 - 4.3	3.4018
Water & Sediment, vol. %	ASTM D2709-96	0.05 max.	< 0.05
Methyl Ester of Fatty Acid, Vol. %	EN 14078-03	1.5 - 2	Not Tested

ที่มา: PTT Aromatics and Refining Public Company Limited Certificate of Quality



ภาคผนวก ง

การเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีทเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจาก
เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ในการเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม สามารถหาได้จากการนำเอาค่าพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical energy consumption) ส่วนด้วยพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Engine Power) ดังสมการภาคผนวกที่ ง1 โดยผลของการคำนวณในแต่ละ Case การทดลองจะแสดงไว้ดังตารางผนวกที่ ง1

$$\frac{\text{Electrical energy consumption (kWh)}}{\text{Engine Power (kW)} \times \text{Time (Hours)}} \quad (ง1)$$

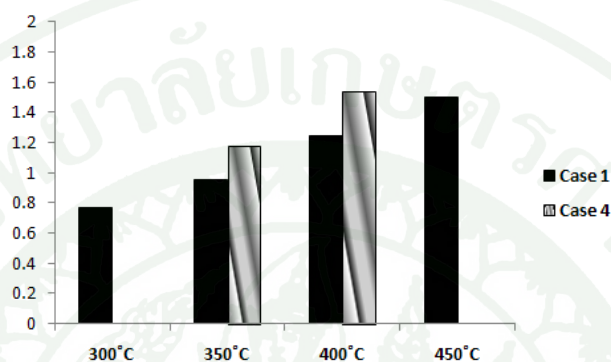
โดยที่ Electrical energy consumption มาจากการคำนวณของสมการที่ 16
Engine Power มาจากตารางที่ 8
Time คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์ในแต่ละ Case การทำงาน (ชั่วโมง) ≈ 15 นาที
= 0.25 ชั่วโมง

ตารางผนวกที่ ง1 ผลการเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของการทดลอง Case 1-5

Case	Temperature of Electrical Heater			
	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C
Case 1	0.7707	0.95	1.2458	1.5041
Case 2	0.3683	0.5025	0.62726	0.7437
Case 3	0.7382	0.8975	1.2	1.4621
Case 4	N/A	1.179	1.543	N/A
Case 5	2.5583	3.05	3.5566	N/A

ผลจากตารางผนวกที่ ง1 จะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ซึ่งในที่นี้ถ้าผลจากการคำนวณมีค่าเกิน 1 หมายถึง ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานที่มากกว่าความสามารถของเครื่องยนต์จะผลิตให้ได้ ซึ่งแสดงได้ว่าถ้านำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าระบบนี้ไปติดตั้งบนรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้เครื่องยนต์ 2KD-FTV ระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการยกอุณหภูมิในช่วงที่การคำนวณมีค่าเกิน 1

ดังตัวอย่างเช่น ใน Case 1 การใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ไปที่อุณหภูมิ 300 และ 350 °C ระบบไฟฟ้าของเครื่องยนต์สามารถจ่ายไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า แต่เมื่อมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มอุณหภูมิไอเสียก่อนเข้า MAIN-CAT ที่ 400 และ 450 °C นั้นความต้องการพลังงานของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีมากกว่าความสามารถที่ระบบไฟฟ้าของเครื่องยนต์จะจ่ายให้กับระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้



ภาพผนวกที่ ง1 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมระหว่าง Case 1 กับ Case 4

จากภาพผนวกที่ ง1 ในส่วนของการเปรียบเทียบอัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่ม Energy Ratio จาก 70% โดยปริมาตร (Case 1) เป็น 80% โดยปริมาตร (Case 4) เพื่อใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติที่มากขึ้น อัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมก็จะมากขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีการใช้ Energy Ratio ที่สูงมากขึ้นในช่วงภาระการทำงานต่ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มก๊าซธรรมชาติเข้ามาในเครื่องยนต์ที่มากขึ้นแต่น้ำมันดีเซลที่น้อยลงทำให้การจุดระเบิดทำได้ยากขึ้นทำให้พลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ (Engine Power) น้อยลง ส่งผลให้อัตราส่วนการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อพลังงานที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมากขึ้นนั่นเอง

ในส่วนนี้ทำให้เราเห็นถึงความสำคัญของระบบจ่ายพลังงานบนรถยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ฉะนั้นถ้าต้องการนำระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามาติดตั้งใช้งานบนรถยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมควรมีการพัฒนาการระบบจ่ายไฟฟ้าให้สามารถรองรับต่อความต้องการพลังงานของระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า



สำหรับการหาค่าระยะเวลาที่ไอเสียใช้ทำปฏิกิริยาอยู่ในแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ (Space velocity) สามารถคำนวณได้จากสมการภาคผนวกที่ จ1 (Heck and Farrauto, 2002) และได้ผลดังตารางภาคผนวกที่ จ1 โดยงานวิจัยนี้จะดูค่า Space velocity เฉพาะที่ MAIN-CAT เท่านั้น

$$\text{Space velocity} \left(\frac{1}{\text{hr}} \right) = \frac{\text{Volume flowrate of exhaust}}{\text{Volume of catalyst}} \quad (จ1)$$

โดยที่ Volume flowrate of exhaust คือ ปริมาตรของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ (m^3/hr)

จากตารางภาคผนวกที่ ก3

Volume of catalyst คือ ปริมาตรของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ (m^3)
 $\approx 0.0034 \text{ m}^3$

ตารางผนวกที่ จ1 แสดงค่า Space velocity ของแต่ละ Case การทดลอง

Case	Temperature of Electrical Heater			
	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C
Case 1	12,793	13,909	15,025	16,141
Case 2	15,075	16,390	17,705	19,020
Case 3	10,453	11,365	12,276	13,188
Case 4	N/A	13,779	14,884	N/A
Case 5	7,465	8,116	8,767	N/A

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นายณภูมิ ไวทยะพันธ์

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2529

สถานที่เกิด

จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน) พ.ศ. 2551

