

## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

#### บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

	วิศา	ากรรมศาสตรมา	<u> หาบัณฑิต (วิศวก</u>	รรมเครื่องกล)	
			ปริญญา		
	วิศวกรรมเครื่องกล	0		วิศวกรรมเครื่องกล	
	สาขา			ภาควิชา	
เรื่อง	การศึกษาปัจจัยที่มีเ	พลต่อการลดก๊าะ	ชมีเทนจากเครื่อง	ยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิ	iชีการฉี <b>ด</b>
	น้ำมันหน้าเครื่องฟล	อกไอเสียเชิงเร่ง	ปฏิกิริยา		
	A Study of Parame Injection in front of	ters for Methan f Catalytic Conv	e Reduction from verters	n Diesel Dual Fuel Engines b	by Fuel
นามผู้วิ	ว <b>ิจัย</b> นายอนิรุทธ์ น้อ	ยเพิ่ง			
ได้พิจา	ารณาเห็นชอบโดย				
ประธ	านกรรมการ				
		ผู้ช่วยศาส	สตราจารย์เอกไท	วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D.	)
	กรรมการ				
		อา	จารย์ธเนศ อรุณ	ศรีโสภณ, Ph.D.	)
หัว	หน้าภาควิชา				
	(	รองศ	าสตราจารย์ชวลิศ	า กิตติชัยการ, Ph.D.	)
	บัถ	ເฑិตวิทยาลัย	มหาวิทยาลัย	แกษตรศาสตร์รับรองแ	ດ້ວ
	(	รองศาส	<i>เ</i> ตราจารย์กัญจน:	า ธีระกุล, D.Agr.	)
			คณบดีบัณฑิต	าวิทยาลัย	
		วันที่	เดือน	พ.ศ.	

สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษตรต่าสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยวิธีการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

A Study of Parameters for Methane Reduction from Diesel Dual Fuel Engines by Fuel Injection in front of Catalytic Converters

โดย

นายอนิรุทธ์ น้อยเพ็ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

อนิรุทธ์ น้อยเพิ่ง 2554: การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D. 136 หน้า

ในการศึกษานี้วิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาถูกเลือกใช้เป็น เครื่องมือในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับลดปริมาณก๊าซมีเทน ในไอเสีย ข้อดีของการใช้วิธีนี้คือมีต้นทุนของพลังงานและราคาต่ำ รวมทั้งการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก ระบบนี้ถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณท่อไอเสียของเครื่องยนต์ ซึ่งเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตัวที่ หนึ่งถูกใช้เพื่อที่จะเพิ่มอุณหภูมิและเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตัวที่สองติดตั้งที่ทางออกของ เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตัวที่หนึ่งเพื่อที่จะลดก๊าซมีเทน ความเร็วของเครื่องยนต์ Lambda อุณหภูมิของไอเสียและปริมาณการฉีดน้ำมันถูกนำมาศึกษาเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการลด มีเทนด้วยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ผลจากการทคลองพบว่าที่อุณหภูมิของไอเสีย 200°C และ Lambda 1.7 เพียงพอต่อการฉีค น้ำมันและก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเกมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ จากการทคลองพบว่า ไม่เพียงแต่ปริมาณการฉีดน้ำมัน (ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น) เท่านั้น แต่คุณลักษณะของไอเสีย (อุณหภูมิของไอเสีย, ปริมาณก๊าซออกซิเจนในไอเสีย และองค์ประกอบทางเกมีของก๊าซไอเสีย) เป็นปัจจัยสำคัญของการลดก๊าซมีเทนด้วยเหมือนกัน ปริมาณการฉีดน้ำมันที่ใช้สามารถปรับให้ เหมาะสมกับคุณลักษณะของไอเสียและประสิทธิภาพของการลดก๊าซมีเทน ดังนั้นวิธีการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นการช่วยปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของไอเสียเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อนิสิต

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร

Anirut Noipeng 2011: A Study of Parameters for Methane Reduction from Diesel Dual Fuel Engines by Fuel Injection in front of Catalytic Converters. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Ekathai Wirojsakunchai, Ph.D. 136 pages.

In the current study, a technique, called raw fuel injection, is selected for heating up exhaust temperature sufficient to treat methane via Diesel Oxidation Catalyst (DOC). The benefit of using this technique lies in low energy consumption with minimal system complexity and costs as seen in many diesel aftertreatment operations. The raw fuel injection system is installed into the tailpipe of DDF engine where the first DOC is installed in order to increase temperature and the second DOC is installed downstream of the first DOC in order to treat methane. Engine speed, lambda, engine-out exhaust temperature, and raw fuel injection amounts are varied to investigate impact of various factors on reducing methane.

Results showed that the exhaust temperature of 200°C and Lambda of 1.7 was sufficiently high for oxidizing diesel fuel in DOC. Once this condition was met, the key important parameter on reducing methane is not only fuel injection amount (resulting in exhaust temperature variations), but also the characteristic of engine-out exhausts. Fuel injection amounts could be optimized with the characteristic of engine-out exhaust and  $CH_4$  conversion efficiency. Therefore, modified exhaust characteristics via raw fuel injection demonstrated improvements in reducing methane emissions from DDF engines.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

## สิบสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.คร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.คร.ธเนศ อรุณศรี โสภณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและ ข้อมูลต่างๆ ในด้านการวิจัย ตลอคจนแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ คุณนิโรจน์ อัครปัญญา คร.กฤษฎา วรรณทอง คุณธรรมรัตน์ ธรรมเคชศักดิ์ และคุณชินภัทร เหรียญประยูร รวมทั้งพนักงาน ของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. จังหวัดอยุธยาทุกท่านที่ให้กำแนะนำ รวมทั้งเอื้อเฟื้อในการ ใช้อุปกรณ์ สถานที่ และค่าใช้จ่ายของการทำวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณ บิดาและมารดาที่ให้กำเนิดข้าพเจ้าเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสสร้าง ประโยชน์ให้แก่สังคมและโลกใบนี้ คุณสุวิมล จิตรองอาจกิจ สำหรับความรัก กำลังใจและความ ช่วยเหลือ คุณกิตติพงษ์ เขาวาจาสำหรับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการฉีดน้ำมันของ วิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาและระบบการทำงานของเครื่องขนต์ คุณณภูมี ไวทยะพัธน์ คุณกิตติศักดิ์ กำสินลา คุณธนันชัย เตพิมลรัตน์ คุณวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ คุณณภูมี ไวทยะพัธน์ คุณกิตติศักดิ์ กำสินลา คุณธนันชัย เตพิมลรัตน์ คุณวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ คุณณภูมี ภัทรจารี และพนักงานช่างปตท. สำหรับการติดตั้ง ดำเนินการทดสอบและอำนวยความสะควก ทางค้านอื่น บริษัท AVL SEA & Australia CO., Ltd. สำหรับการสอนและกำปรึกษาการใช้งาน อุปกรณ์ของบริษัท AVL บริษัท HORIBA ABX Diagnostics Thailand Ltd สำหรับการสอนและ กำปรึกษาการใช้งานอุปกรณ์ของบริษัท HORIBA และสุดท้ายขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการศึกษาหาความรู้ตั้งแต่ปริญาตรีจนถึงปริญาโท

ผลกรรมความดีและกุศลทั้งปวงที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแค่ ตัวข้าพเจ้า บิคาและ มารดาของข้าพเจ้า ผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้ที่ข้าพเจ้ารักและผู้ที่รักข้าพเจ้า ญาติและมิตรสหายของ ข้าพเจ้า เจ้ากรรมนายเวรของข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตชาติจนถึงปัจจุบัน ต้นไม้ทุกต้นที่เสียสละชีวิตเพื่อ เป็นกระคาษให้กับหนังสือเล่มนี้ สิ่งมีชีวิตทั้งหลายที่ข้าพเจ้าได้เบียดเบียนทางด้าน วจีกรรม กายกรรม และมโนกรรม ทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ ตลอดจนผู้ที่ได้อ่านวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และสุดท้าย ขอให้กวามรู้จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก่อให้เกิดประโยชน์กับสิ่งมีชีวิตในสังคมนี้และโลกใบนี้

> อนิรุทธ์ น้อยเพิ่ง พฤษภาคม 2554

#### สารบัญ

(1)

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	47
อุปกรณ์	47
วิธีการ	54
ผลและวิจารณ์	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	106
สรุป	106
ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	109
ภาคผนวก	121
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	136



#### สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงกุณสมบัติของ Substrate ทั้ง 3 แบบ	26
2	แสดงวิธีการทดสอบทั้ง 3 แบบ	39
3	แสดงลักษณะการฉีดทั้ง 4 แบบ	44
4	รายละเอียดเครื่องยนต์ TOYOTA 2KD-FTV	48
5	รายละเอียคของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ OEM, OD, และ JM	54
6	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ	
	Mode 1 ถึง 8	57
7	ปริมาณมลพิษหลักของไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ของ Mode 1 ถึง 8	61
8	รายละเอียดคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2)	66
9	ตารางการดำเนินงาน	67
10	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 1	72
11	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 2	77
12	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 3	82
13	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 4	87
14	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 6	92
15	ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 7	99
16	ปริมาณ CH, และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 8	104

#### ตารางผนวกที่

1	รายละเอียดของเครื่อง 733S และ 753C	129
2	รายละเอียดคุณสมบัติของการทดสอบเชื้อเพลิง	131
3	ข้อมูลการทำงานของเครื่องยนต์ Mode 1 ถึง 8	132
4	แสดงระยะตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์	133
5	ข้อมูลของอุปกรณ์และเครื่องมือวัคไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR	135

(2)

ลิบสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพตัดขวางตามกวามยาวของเกรื่องยนต์ Ricrardo E6	5
2	แสดงจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลหลายกรั้งในห้องเผาใหม้ โดยใช้ ECU	
	ควบคุมคำสั่ง	11
3	แสดงระบบ EGR	12
4	แผนภูมิเส้นแสดงปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic reaction)	
	ของสารทั่วไป	13
5	ภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสีย	
	เชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Diesel oxidation catalyst (DOC)	15
6	แผนภูมิเส้นแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิ	16
7	แสดงหลักการทำงานของ Diesel oxidation catalyst	16
8	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพของสารแพลทินัมและพาเลเคียมใน DOC	17
9	แสดงตำแหน่งของ DOC	19
10	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมื	
	เมื่อเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาถูกใช้งานมากกว่า 400 ชั่วโมง	20
11	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่มี	
	แพลทินัมและพาเลเดียมในสัดส่วนที่ต่างกัน	21
12	แสดงการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับสารพาเลเดียม	22
13	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเมื่อ	
	ฉีดน้ำเข้าไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	23
14	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการการลด CH₄ ที่สภาวะ 5000 ppm: (■)	
	Pd/TiO <sub>2</sub> , ( $\bigcirc$ )Pd/SiO <sub>2</sub> , ( $\triangle$ )Pd/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ແລະ ( $\times$ ) Pd/ZrO <sub>2</sub>	24
15	ภาพถ่าย Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคแบบเม็ค, โฟม และรังผึ้ง	25
16	ภาพถ่าย Substrate ที่ทำมาจากโลหะแบบ Wire-Mesh Honeycomb	27
17	แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี	
	พาเลเคียมที่มี Substrate เป็นวัสคุต่างชนิดกัน	28
18	แสดงตำแหน่งเครื่องทำความร้อนที่ใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่ง	
	ปฏิกิริยา	32

19 แสดงตำแหน่งหัวเผาใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	33
20 แสดงตำแหน่งไมโครเวฟใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	34
21 แสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเมื่อ	
ใช้วิธี Reverse Flow	36
22 แสดงจังหวะการฉีดของ Post fuel	37
23 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซลของระบบ Raw Fuel Injection	39
24 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงแบบ Raw fuel Injection	
เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 600°C	41
25 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซล เกรื่องทำกวามร้อนและเกรื่องฟอกไอเสีย	
เชิงเร่งปฏิกิริยา	42
26 แสดงโมเดลวิธี Raw fuel injection และระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	
ของโปรแกรม GT-Power	43
27 แสดงอุปกรณ์วิธี Raw fuel injection และแผ่นความร้อน	46
28 แสดงการติดตั้งระบบไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	49
29 แสดงวงจรของระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	
	50
30 ภาพถ่ายหัวฉีคน้ำมันระบบ PGM-FI (ซ้าย) และภาพวาคตัดขวางหัวฉีด	
น้ำมันระบบ PGM-FI (ขวา) ของรถจักรยานยนต์ HONDA WAVE 125-I	51
31 ภาพเขียนหน้าแปลนรองรับหัวฉีดของระบบการฉีดน้ำมันของวิธี Raw fuel	
injection	51
32 แสดงอปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100DEGR	01
และวงจุรของสาย Sampling Line	52
33 แสดงการติดตั้งที่ท่อ ใอเสียขององโกรก์และเครื่องบือวัดของ	52
Onacimeter 430	53
34 IIAOJAASMOADIIIJII New Europeen Driving Cycle (NEDC)	55
ของเครื่องยาเต้อีเซลเชื้อเพลิงร่างเ	55

ภาพที่		หน้า
35	แสดงจำนวนของความดันยังผลเฉลี่ย (35A) และความเร็วรอบของ	
	เครื่องยนต์ (35B) การทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC)	56
36	แสดงตัวอย่างการฉีดน้ำมันที่ 10% Duration time	62
37	แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันโดยฉีดที่กวามคัน:	
	4 bar (41A), 5 bar (41B), และ 6 bar (41C)	63
38	แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันโดยฉีดที่กวามถี่:	
	50 Hz (42A), 60 Hz (42B), และ 70 Hz (42C)	64
39	แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมัน1โดยฉีดที่: 5% duration	
	time (43A), 11% duration time (43B), และ 15% duration time (43C)	65
40	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (44A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (44B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 1	70
41	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ MAIN-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VON Mode 1	71
42	ประสิทธิภาพของการลด CH <sub>4</sub> (46A) และ THC (46B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 1	73
43	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (47A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (47B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 2	75
44	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ MAIN-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VOV Mode 2	76
45	ประสิทธิภาพของการลด CH₄ (49A) และ THC (49B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 2	78
46	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (50A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (50B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 3	80
47	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VOV Mode 3	81
48	ประสิทธิภาพของการลด CH4 (52A) และ THC (52B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 3	83

## ลิขสิทฮิ์ มตาวิทยาลัยเทษยรต่าส่ยร<sup>์</sup>

ภาพที่		หน้า
49	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (53A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (53B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 4	85
50	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VON Mode 4	86
51	ประสิทธิภาพของการลด CH4 (55A) และ THC (55B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 4	88
52	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (56A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (56B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 5	90
53	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VON Mode 5	91
54	ประสิทธิภาพของการลด CH <sub>4</sub> (59A) และ THC (59B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 5	93
55	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (56A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (56B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 6	95
56	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (60A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (60B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 7	97
57	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VON Mode 7	98
58	ประสิทธิภาพของการลด CH4 (63A) และ THC (63B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 7	100
59	อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (64A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (64B)	
	ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 8	102
60	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15%	
	duration time VON Mode 8	103
61	ประสิทธิภาพของการลด CH4 (66A) และ THC (66B) ของระบบ	
	ฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 8	105

#### ภาพผนวกที่

1	แสดงวงจรควบคุมระบบการฉีดน้ำมันของวิธี Raw fuel injection ของ	
	โปรแกรม LapVIEW <sup>™</sup> 8.5	122
2	แสดงวงจรควบคุมทางไฟฟ้าของระบบการฉีดน้ำมันของวิธี	
	Raw fuel injection	124
3	ภาพถ่ายเครื่องฟอกไอเสีย PRE-CAT ของ OD	125
4	ภาพถ่ายเครื่องฟอกไอเสีย PRE-CAT ของ OD	125
5	ภาพถ่าย AC Dynamometer	126
6	ภาพถ่าย AVL Fuel balance & Fuel temperature control	128
7	ภาพถ่าย HORIBA MEXA 7100 DEGR	134



(7)

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### คำอธิบายสัญลักษณ์

%	=	เปอร์เซนต์, ร้อยละ
%ER	=	อัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงานที่ใช้
		ทั้งหมด (%)
%Mass	£	เปอร์เซนต์โดยมวล
%vol.	=	เปอร์เซนต์โดยปริมาตร
(A/F) <sub>s</sub>	. ₹	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในช่วงเผาใหม้พอดี
A		แฟคเตอร์ความถื่
$Al_2(SO_4)_3$	57= 4	สารอลูมินาซัลไฟด์
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	สารอลูมินา
ASTM		มาตรฐาน American Society for Testing and Materials
ATDC	=	หลังจุดศูนย์ตายบน (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
B2	=	น้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของ Diesel 98% กับ Biodiesel 2%
bar		หน่วยวัดกวามคัน (100000 N/m²)
BTDC		ก่อนจุคศูนย์ตายบน (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
°C	1 =	องศาเซลเซียส
сс	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
CEC	=	มาตรฐาน The Coordinating European Council
CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= 8	ซีเรียมออกไซค์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและอลูมินาเป็นสารเคลือบ
		Substrate
CH <sub>4</sub>	=	ก๊าซมีเทน
CLD	=	การวัดแบบ A Chemi-Luminescence Detector
CNG	=	ก๊าซธรรมชาติสามารถอัดตัวได้
СО	=	ก๊าซการ์บอนมอนนอกไซด์
CO <sub>2</sub>	=	ก๊าซการ์บอนไคออกไซค์
CO-Hb	=	คาร์บอกซีฮีโมโกลบิน

### คำอธิบายสัญลักษณ์

cSt	=	หน่วยวัดกวามหนืดของน้ำมันดีเซล
DDF	=	ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
DISI	=	ระบบ Direct Injection Spark Ignition
∆ṁ <sub>D</sub>	<b>₽</b>	ปริมาณการใช้ของน้ำมันดีเซล (kg/hr)
ΔΡ	=	ความดันถด (KPa)
DOC	=	เครื่องฟอกไอเสียแบบ Diesel Oxidation Catalyst
DOHC	=	ระบบเปิด-ปิควาล์วแบบ Double Over Head Camshaft
DPF	=	เครื่องฟอกไอเสียแบบ Diesel Particulate Filter
Δτ		ผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้วิธี Raw fuel injection (°C)
E	= /	พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา (KJ/mol)
ECU		อุปกรณ์ Electronic Control Unit
EGR or EEGR	i e	ระบบ Exhaust Gas Recirculation
EVC		จังหวะวาล์วไอเสียปิด (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
EVO	-	จังหวะวาล์วไอเสียเปิด (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
FID	=	การวัดแบบ Flame Ionization Detector
FLT		วิธีเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ได้อย่างรวดเร็ว
g/l	=	หน่วยวัดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเกมี (กรัมต่อลิตร)
g/ft <sup>3</sup>	- 2	หน่วยวัดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี (กรัมต่อลูกบาศก์ฟุต)
GSA	=	พื้นที่ผิวของรูปทรงเรขาคณิต (ft²/ft³)
hr	=	ชั่วโมง
Н	=	อะตอมของไฮโครเจน
H/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของไฮโครเจนต่อการ์บอน
H <sub>2</sub>	=	ก๊าซไฮโครเจน
H <sub>2</sub> O	=	น้ำ
HCCI	=	เครื่องยนต์แบบ Homogeneous Charge Compression Ignition

### คำอธิบายสัญลักษณ์

HFRR	=	การวัดค่าความหนืดของน้ำมันดีเซลด้วยวิธี High Frequency
		Reciprocating Rig
hhv <sub>d</sub>	=	ค่าความร้อนสูงของน้ำมันดีเซล (MJ/kg)
HRR	₽.S	อัตราการสูญเสียความร้อน
Hz	=	หน่วยวัดกวามถึ่
IMEP	Ξ	ความคันยังผลเฉลี่ย (bar)
IVC		จังหวะวาล์วดีเสียปิด
IVO	= 6	จังหวะวาล์วดีเสียเปิด
J/mol		หน่วยวัดพลังงาน (จูลต่อโมล)
ЈМ	=	Johnson Matthey
К	=/	หน่วยวัดอุณหภูมิ (เกวิล)
Kg/hr	Ę	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
Kg/Kmol		หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)
KJ/°C		หน่วยวัดพลังงาน (จูลต่อองศาเซลเซียส)
KJ/mol	=	หน่วยวัดพลังงาน (กิโลจูลต่อโมล)
KPa		หน่วยวัดกวามคัน (1000 N/m <sup>2</sup> )
λ	=	Lambda
LHV <sub>D</sub>	= 2	ก่ากวามร้อนต่ำของน้ำมันดีเซล (MJ/kg)
LHV <sub>NG</sub>	=	ค่าความร้อนต่ำของก๊าซธรรมชาติ (MJ/kg)
LT	=	Light off temperature (°C)
MAIN-CAT	=	เครื่องฟอกไอเสียตัวที่สองสำหรับถคปริมาณก๊าซมีเทน
max.	=	มากที่สุด
ḿ <sub>A</sub>	=	ปริมาณการใช้ของอากาศ (kg/hr)
ḿ <sub>D</sub>	=	ปริมาณการใช้ของน้ำมันคีเซล (kg/hr)
m <sub>G</sub>	=	ปริมาณการใช้ของก๊าซธรรมชาติ (kg/hr)
mg/m <sup>3</sup>	=	หน่วยวัดปริมาณมลพิษอนุภาค

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

### คำอธิบายสัญลักษณ์

mil	=	หน่วยวัคกวามหนาของสารเกลือบ Substrate (0.001 นิ้ว)
min.	=	น้อยที่สุด
MJ/Kg	=	หน่วยวัดพลังงาน (มิลลิจูลต่อกิโลกรัม)
mm	<u> </u>	มิลลิเมตร
МОР	=	ระยะยกและองศาการเปิดสูงสุดของวาล์ว (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
MPa	₹.	หน่วยวัดความคัน (100000 N/m²)
MPD		การวัดแบบ Metal Particle Detector Switch
msec	= /	หน่วยวัดเวลา (มิลลิวินาที)
MW		น้ำหนักของอะตอม
MW Application	=	เครื่องกำเนิดไม โครเวฟ
N		อะตอมของในโตรเจน
n	-	ลำดับของการเกิดปฏิกิริยา
N/C		อัตราส่วนระหว่างอะตอมของในโตรเจนต่อการ์บอน
NAC		เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ NOx Absorber Catalyst
NDIR	-	การวัดแบบ Nondispersive Infrared
NEDC	=	การทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle
Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	นิเกิลเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและอลูมินาเป็นสารเคลือบ Substrate
NIR	= 2	การวัดแบบ Near Infrared
Nm	=	นิวตันเมตร
NO	=	ในตริกออกไซด์
NO <sub>2</sub>	=	ในโตรเจนไดออกไซด์
NOx	=	ในโตรเจนออกไซด์
NVO or IEGR	=	ระบบ Negative Valve Overlap
0	=	อะตอมของออกซิเจน
O/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของออกซิเจนต่อการ์บอน

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

### คำอธิบายสัญลักษณ์

$O_2$	=	ก๊าซออกซิเจน
O <sub>3</sub>	=	ก๊าซโอโซน
OD	=	Ordegg
OEM	÷.	Original Equipment Manufacturer
OFA	=	พื้นที่เปิดด้านหน้า (%)
ОН	ΞŚ	ก๊าซไฮโครเจนออกไซค์
Р	42	ความคัน (KPa)
Pd	7= 6	แพลเลเดียม
Pd/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	แพลเลเดียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Alumina เป็นสารเคลือบ
		Substrate
Pd/SiO <sub>2</sub>	=	แพลเลเดียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Silica เป็นสารเคลื่อบ
		Substrate
Pd/TiO <sub>2</sub>		แพลเลเดียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Anatase เป็นสารเคลือบ
		Substrate
Pd/ZrO <sub>2</sub>	5 =	แพลเลเคียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Zirconia เป็นสารเคลือบ
		Substrate
PdO	=	แพลเลเดียมออกไซด์
PdO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= 2	แพลเลเดียมออกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Zirconia เป็น
		สารเคลื่อบ Substrate
Pd-Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	แพลเลเดียมและ Ruthenium เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและ Alumina
		เป็นสารเคลื่อบ Substrate
PID	=	Proportional Integral Derivative
PM	=	มลพิษอนุภาค
РМСС	=	การวัดค่าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลด้วยวิธี The Pensky Marateen
		Closed Cup
ppm	=	อัตราส่วนในล้านส่วน

### คำอธิบายสัญลักษณ์

ppmC	=	อัตราส่วนในล้านส่วนอะตอมของการ์บอน
PRE-CAT	=	เครื่องฟอกไอเสียตัวแรกสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ
Pt	=	แพลทินัม
PTT.	₹	บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)
QFT-Based	=	ระบบ the quantitative-feedback theory
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซมีค่า 8.314 J/Kmol
RFIR		ความสัมพันธ์ของปริมาณการฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซล
rpm	Y	หน่วยวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รอบต่อนาที
s	=	หน่วยวัดเวลา วินาที
SEC	2	ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
SG	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ
SO <sub>2</sub>		ก้าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
SO <sub>3</sub>	l €	สารซัลเฟต
SOF	<b>_</b>	Soluble Organic Fraction
sv	-	Space Velocity $(\mathbf{s}^{-1})$
Т		อุณหภูมิ (°C)
Temp Exh.	=	อุณหภูมิของไอเสีย (°C)
TDC	= 9	จุดศูนย์ตายบน (องศาเพลาข้อเหวี่ยง)
THC	=	สารประกอบไฮโครการ์บอน
V	=	หน่วยวัดแรงคันทางไฟฟ้า (โวลต์)
W	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้า (วัตต์)
WMH	=	โครงสร้างของ Substrate แบบ Wire-Mesh Honeycomb

### การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิชีการ ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

#### A Study of Parameters for Methane Reduction from Diesel Dual Fuel Engines by Fuel Injection in front of Catalytic Converters

# คำนำ

์ ในอดีตมนุษย์ใช้น้ำมันดีเซลในการคำเนินชีวิตประจำวันกันอย่างฟุ่มเฟือยเนื่องจากน้ำมัน ้ดีเซลมีราคาต่ำ แต่ปัจจุบันนี้จำนวนประชากรที่มีมากขึ้นประกอบกับปริมาณน้ำมันดีเซลที่มีอยู่จำกัด ทำให้เกิดกวามต้องการใช้น้ำมันดีเซลมากขึ้นจึงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยเฉพาะในช่วงฤดู หนาวของทวีปยุโรปและทวีปอเมริกาจะมีความต้องการใช้น้ำมันดิบอย่างมากส่งผลให้ราคาน้ำมัน ้ดีเซลในตลาดโลกสูงขึ้น นอกจากนี้ประเทศที่ไม่มีแหล่งน้ำมันดีเซลเป็นของตัวเองหรือมีปริมาณไม่ เพียงพอต่อความต้องการของประชากรในประเทศและยากจนหลายประเทศจึงประสบปัญหาใน การพัฒนาประเทศเนื่องจากภาวะเงินเฟ้อและต้นทุนการผลิตที่สูงซึ่งประเทศไทยก็เป็นหนึ่งใน ประเทศที่กำลังประสบปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเทค โน โลยีใหม่เพื่อลด การใช้น้ำมันดีเซลให้น้อยลงโดยการใช้พลังงานทดแทนเพื่อให้ประเทศมีเสถียรภาพทางด้าน พลังงานมากขึ้น การขุดพบหลุมก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยมากมายและการนำเอาก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีก๊าซมีเทน (CH4) เป็นองค์ประกอบหลักมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกจึงน่าจะช่วยแก้ไข ปัญหาการขาดแคลนน้ำมันดีเซลในประเทศไทยได้ อย่างไรก็ตามก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิด ภาวะเรือนกระจกโดยมีความรุนแรงของการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกมากกว่าการ์บอนไดออกไซด์ ถึง 23 เท่า ดังนั้นรัฐบาลของหลายประเทศทั่วโลกจึงได้ลงนามและให้สัตยาบันในพิธีสารเกียวโต (The Kyoto Protocol) ซึ่งมุ่งประเด็นไปที่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ สำหรับ ประเทศไทยทางคณะกรรมการสิ่งแวคล้อมแห่งชาติมีมติให้น้ำมันเชื้อเพลิงและรถยนต์ที่ผลิตใหม่ เป็นไปตามมาตรฐาน EURO4 โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1มกรากม พ.ศ. 2555 โดยให้ครรชนี มีเทนไม่ต่ำกว่า 50 หน่วย

เครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วมเป็นเครื่องยนต์ที่นำก๊าซมีเทนผสมกับอากาศก่อนเข้ากระบอกสูบ แล้วจุคระเบิคด้วยการฉีคน้ำมันคีเซล (ในปริมาณที่น้อยกว่าเครื่องยนต์จุคระเบิคด้วยการอัค) เข้าสู่ ห้องเผาไหม้ ไอเสียจากเครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีก๊าซไนโตรเจนออกไซค์ (NOx) และเขม่า

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

(Soot) ต่ำกว่า แต่มีสารประกอบไฮโครการ์บอน (THC) และการ์บอนมอนนอกไซด์ (CO) สูงกว่า ้เครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป อย่างไรก็ตามจะต้องมีการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิง ้ร่วมเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะที่อาจก่อให้เกิดชิงจุดระเบิดเองในเครื่องยนต์ ซึ่งอาจส่งผลให้ลูกสูบและ กระบอกสูบได้รับความเสียหายได้ นอกจากนี้การนำระบบดูดมาใช้เพื่อนำก๊าซมีเทนผสมกับอากาศ ้ก่อนเข้าสู่ห้องเผาใหม้ของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะในช่วงภาระต่ำอาจทำให้ก๊าซมีเทนใหลเข้าไปใน กระบอกสูบไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดล่าช้าหรือการไม่จุดระเบิดขึ้นในกระบอกสูบ (Ada et al., 2000; Liu et al., 2003; Papagiannakis et al., 2004; Wannatong et al., 2004, 2009) ้ไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์จะมีก๊าซมีเทนปนออกมาในปริมาณสูง การลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ ้ออกมาจากเครื่องยนต์นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Converter) ช่วย อย่างไรก็ตามก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่มีเสถียรภาพสูงมาก การออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนด้วย สารเร่งปฏิกิริยาเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่าอุณหภูมิ ของก๊าซไอเสียทั่วไป) และสารเร่งปฏิกิริยาเคมีควรมีส่วนผสมของพาเลเคียม (Pd) ที่สูง (สูงกว่า ้ปริมาณที่มีอยู่ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาทั่วไปสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล) ด้วยสาเหตุต่างๆที่ กล่าวมานี้ งานวิจัยและพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมและเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ของเกรื่องยนต์ชนิดนี้จึงมีความสำคัญและต้องถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องก่อนนำมาคัดแปลงใช้งานจริง ในรถยนต์ทั่วไป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยและผลกระทบต่อการปรับปรุงคุณลักษณะก๊าซไอเสียที่ออก จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้เหมาะสมต่อการลดปริมาณก๊าซมีเทนในเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิของไอเสียจะถูกควบคุมโดยการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเข้าที่ด้านหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิของไอเสีย เป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษาเพื่อใช้กำหนดช่วงการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยา

#### วัตถุประสงค์

 เพื่อศึกษาคุณลักษณะการฉีดน้ำมันให้เป็นละอองฝอยของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดก๊าซมีเทนของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระปานกลางโดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

#### ขอบเขตงานวิจัย

 สึกษาการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิง ร่วมเฉพาะช่วงภาระปานกลาง

 ใช้น้ำมันดีเซลเป็นตัวแทนของสารประกอบไฮโดรการ์บอนซึ่งจะใช้ในการเพิ่ม อุณหภูมิของก๊าซไอเสียในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

 งานวิจัยนี้ไม่รวมผลกระทบของเขม่าไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมต่อการ ทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

#### การตรวจเอกสาร

#### 1. ปัจจัยที่ทำให้เกิดมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

้เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเป็นเครื่องยนต์เผาใหม้ภายในที่มีการจึดน้ำมันดีเซลเข้าไป ในกระบอกสูบในช่วงก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นไปที่ศูนย์ตายบน (TDC) ในจังหวะอัด ส่วนผสม ของอากาศและน้ำมันสามารถจุดระเบิดได้เองเมื่อถึงสภาวะที่เหมาะสมในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์ จุดระเบิคด้วยการอัด โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนและสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ดีกว่า เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ เนื่องจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดมีอัตราส่วนการ ้อัดที่สูงกว่าเกรื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ นอกจากนี้เกรื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะเกิด เขม่า (Soot) และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) มากกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ แต่ เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะเกิดก๊าซการ์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และสารประกอบ ้ไฮโครการ์บอน (THC) น้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ เนื่องจากเครื่องยนต์จุดระเบิด ้ด้วยการอัดเป็นการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบโดยตรงทำให้เกิดการเผาไหม้แบบ Heterogeneous ส่วนเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟเป็นการฉีดเชื้อเพลิงผสมก่อนเข้าไปใน กระบอกสูบทำให้เกิดการเผาใหม้แบบ Homogeneous (Heywood et al., 1988; Turns et al., 2000) ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์เป็นเครื่องยนต์ Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ เครื่องขนต์ HCCI เป็นการเผาใหม้ถูกผสมระหว่างเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและจุดระเบิดด้วยการอัด โดย นำเชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันล่วงหน้าให้ได้สารผสมที่บางทำให้มีการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิค่ำ ซึ่งอาจเป็นการผสมกันภายนอกก่อนเข้าห้องเผาใหม้ หรือผสมกันในห้องเผาใหม้ในช่วงจังหวะดูค หรือในช่วงจังหวะอัด นอกจากนี้การใช้สารผสมที่บางและเป็นแบบ Homogeneous จะช่วยลด ปริมาณ NOx และเขม่าลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด แต่อย่างไรก็ตาม ้เครื่องยนต์ HCCI มีข้อจำกัดทางด้านการควบคุมการจุดระบิดได้ยากในช่วงเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์ เกิดการชิงจุดระเบิด (Knock) ในช่วงภาระสูงและ ไม่เกิดการจุดระเบิด (Misfire) ในช่วงภาระต่ำมาก และมีการปล่อยปริมาณ THC และ CO ในปริมาณที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วย การอัด (Onishi et al., 1979; Aroonsrisopon et al., 2002; Dec et al., 2006; Dahl et al., 2009)

ต่อมาใค้มีการพัฒนาเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ซึ่งเรียกว่าเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel dual fuel, DDF) ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีก่าออกเทนนัมเบอร์สูงกว่าก่า ออกเทนนัมเบอร์ของน้ำมันดีเซล โดยเชื้อเพลิงที่นำมาทดแทนส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH4)

สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรร่าสกร์

นอกจากนี้ได้ดัดแปลงเครื่องขนต์ Ricrardo E6 ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องขนต์จุดระเบิด ด้วยการอัดกลายเป็นเครื่องขนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม พบว่าการเพิ่มปริมาณของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซล ในกระบอกสูบจะทำให้ปริมาณ NOx เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ในกระบอกสูบสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ทำให้ปริมาณ CO และ THC ลดลงเนื่องจากมีอากาศ เข้าไปเผาไหม้ในกระบอกสูบในปริมาณที่พอดี และพบว่าการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณมากที่ภาระสูง ของเครื่องขนต์จะทำให้เกิดการชิงจุดระเบิดมากขึ้นเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงในกระบอกสูบ และที่ ภาระต่ำของเครื่องขนต์จะทำให้เกิดการชิงจุดระเบิดมากขึ้นเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงในกระบอกสูบ และที่ ภาระต่ำของเครื่องขนต์จะทำให้เกิดการจิงจุดระเบิดมากขึ้นเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงในกระบอกสูบ และที่ ภาระต่ำของเครื่องขนต์จุดระเบิดการจัดระเบิดในห้องเผาไหม้มากขึ้นเนื่องจากกระบอก สูบมีอุณหภูมิค่ำ ส่งผลให้มีปริมาณ THC และ CH4 ออกมากับไอเสียมากขึ้น (Ada et al. 2000) ต่อมาได้มีการนำเครื่องขนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบมีเทอร์โบชาร์จ มาดัดแปลงให้เป็นเครื่องขนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ทำให้ NOx และเขมาลดลง แต่มี THC และ CO เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ได้ป้องกันการจุดระเบิดผิดจังหวะเพื่อป้องกันกามเสียหายที่ เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้โดยเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงดีเซลในช่วงภาระด่ำร้อยละ 20 ของกำลังเครื่องยนต์ สูงสุด (Liu et al., 2003)



#### ภาพที่ 1 ภาพตัดขวางตามความยาวของเครื่องยนต์ Ricrardo E6

ที่มา: Ada et al. (2000)

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรศาสกร์

นอกจากนี้พบว่าปริมาณ NOx ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมน้อยกว่า เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เนื่องจากปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิในกระบอกสูบของ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมน้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด นอกจากนี้ปริมาณเขม่าในไอ เสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมน้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเนื่องจากปริมาณของ น้ำมันดีเซลที่ใช้มีปริมาณน้อยกว่า ในทางกลับกันปริมาณ CO ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วมจะมีมากกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเพราะอุณหภูมิการเผาไหม้ในกระบอกสูบ ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดทำให้เกิดการเผา ใหม้ไม่สมบูรณ์ และปริมาณ THC ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีมากกว่า เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเนื่องจากการเผาไหม้ที่ช้ากว่าในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีมากกว่า เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเนื่องจากการเผาไหม้ที่ช้ากว่าในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีมากกว่า เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเนื่องจากการเผาไหม้ที่ช้ากว่าในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีมากกว่า เกรื่องยนต์จุดระเบิดด้วยกรอัดเนื่องจากการเผาไหม้ที่ช้ากว่าในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (โดยเฉพาะในช่วงการะต่ำ) ทำให้มี THC บางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ เนื่องจากเชื้อเพลิงบางส่วนได้ หลุดเข้าไปตามร่องแหวนผสมกับน้ำมันหล่อลื่นในกระบอกสูบในช่วงจังหวะอัด และเชื้อเพลิงที่ ผสมกับนำมันหล่อลื่นได้หลุดกลับเข้ามาในกระบอกสูบในช่วงจังหวะขยายตัว (Papagiannakis *et al.*, 2004)

#### 2. มลพิษหลักในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

จากหัวข้อที่แล้วมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงมีปริมาณ NOx และเขม่าน้อยกว่า แต่มีปริมาณ CO และ THC มากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด นอกจากนี้การนำ CH<sub>4</sub> ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงร่วมมาเผาไหม้ทำให้มีปริมาณ CH<sub>4</sub> ออกมากับไอเสียของเครื่องยนต์ โดยใน ส่วนนี้จะอธิบายมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมบางชนิดที่น่าสนใจซึ่งได้แก่ NOx CO THC เขม่าและ CH<sub>4</sub>

ก๊าซ ในโตรเจนออกไซด์ (NOx) ประกอบไปด้วยก๊าซ 2 ชนิดคือ ในตริกออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซ ไม่มีสีและกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย และ ในโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) มีสภาพเป็น ก๊าซที่อุณหภูมิปกติ การเกิด NOx ในเครื่องยนต์เผาไม้ภายในเกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชัน กับก๊าซ ในโตรเจนในกระบอกสูบ ซึ่งในจังหวะอัดเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิและความดันในกระบอก สูบสูงทำให้เกิดปริมาณ NOx เพิ่มขึ้น และ ในจังหวะขยายตัวอุณหภูมิในกระบอกสูบลดลงอย่าง รวดเร็วทำให้ NOx ไม่สามารถแตกตัวเป็น N<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ได้ ดังสมการที่ 1, 2, และ 3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น นี้มีอุณหภูมิเป็นองก์ประกอบสำคัญที่สุด โดยต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 1800 K (Heywood *et al.*, 1988)

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษยรศาสยร์

$$O + N_2 \rightarrow NO + N$$
 (1)

$$N + O_2 \rightarrow NO + O$$
 (2)

$$N + OH \longrightarrow NO + H$$
 (3)

รถยนต์และ โรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งสำคัญของการเกิด NOx นอกจากนี้ NOx ทำ ปฏิกิริยากับ โอโซน (O<sub>3</sub>) ในบรรยากาศเกิดเป็นก๊าซ ในโตรเจน ใดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนดัง สมการที่ 4 ซึ่งก๊าซ ในโตรเจน ใดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ความดันต่ำทำให้เกิดฝนกรด (HNO<sub>3</sub>) (Martin, 1984; Turn, 2006)

$$NO + O_3 \longrightarrow NO_2 + O_2 \tag{4}$$

นอกจากนี้แสงแคคสามารถทำปฏิกิริยาย้อนกลับกับ NOx ในอากาศและแตกตัวเกิคมลพิษ ทางอากาศเป็นหมอกสีเหลืองคังสมการ (5) ทำให้ระคายเกืองต่อผิวหนังและทางเดินลมหายใจ (Kelly and Gunst, 1990; Haywood *et al.*, 1988)

$$NO + HC + O_2 + Sunlight \rightarrow NO_2 + O_3$$
 (5)

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซค์ (CO) เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ไฮโครคาร์บอน ซึ่งเกิดจากส่วนผสมหนา (Fuel Rich) รวมทั้งประสิทธิภาพการผสมกันของอากาศ และเชื้อเพลิงต่ำ (Poor mixing) ส่วนผสมหนานั้นเกิดขึ้นจากการขาดออกซิเจนในกระบวนการเผา ไหม้ ส่วนประสิทธิภาพการผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงต่ำนั้นเกิดขึ้นจากการเตรียมอากาศและ เชื้อเพลิงได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้ไฮโครคาร์บอนบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ตามกระบวนการ ออกซิเดชันดังสมการที่ 6

$$RH \rightarrow R \rightarrow RO_2 \rightarrow RCHO \rightarrow RCO \rightarrow CO$$
(6)

R แทนสาร Radical ของ HC ต่อมากระบวนการเปลี่ยน CO ไปเป็นก๊าซการ์บอนไดออกไซด์ (CO,) ในกระบวนการเผาไหม้ ได้แสดงไว้ดังสมการที่ 7 โดยต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 1500 K ในการ

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

เกิดปฏิกิริยาและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า โดยในช่วงการขยายตัวของกระบอกสูบทำให้อุณหภูมิ ในกระบอกสูบลดลง CO ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น CO<sub>2</sub> ได้ (Heywood *et al.,* 1988)

$$\rm CO + OH \longrightarrow \rm CO_2 + H$$
 (7)

CO เป็นสารไม่มีกลิ่น ไม่มีสี และไม่ระคายเคือง ตามปกติ CO จะถูกขจัดออกจากร่างกาย ทางการหายใจในรูปที่ไม่ เปลี่ยนแปลง และส่วนน้อยถูกเปลี่ยนไปเป็น CO<sub>2</sub> นอกจากนี้ กลไกการ เกิดพิษของ CO ในร่างกายมนุษย์สามารถเกิดได้มากกว่าหนึ่งวิธี กลไกหลัก คือ การรบกวนการ ขนส่งออกซิเจนจากถุงลมไปยังเนื้อเยื่อ เนื่องจาก CO สามารถแพร่ผ่าน Alveolar-capillary membrane ได้อย่างรวดเร็วและจับตัวกับอีโมโกลบินเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (CO-Hb) ได้ดีกว่า ออกซิเจนมากกว่า 200 เท่า กลไกการเกิดพิษอีกอย่างหนึ่ง ได้แก่ การจับตัวกับ Cytochromeoxidase ในไมโตรคอนเครียเป็นผลให้มีการรบกวนการหายใจระดับเซลล์ และชักนำให้เกิดการเสื่อมของ ระบบหัวใจและหลอดเลือด แล้วตามด้วยการเกิดอันตรายต่อ Endothelium โดยความรุนแรงของ การได้รับพิษขึ้นอยู่กับ อัตราการหายใจ ระยะเวลาการได้รับ สัดส่วนความเข้มข้นของ CO และ O<sub>2</sub> การลดความดันบรรยากาศ(เช่น ที่สูง) การเพิ่มการระบายอากาศในถุงลม(เช่น การออกกำลังกาย) รวมทั้งการมีโรคหลอดเลือดหัวใจและหลอดเลือดสมองที่เป็นอยู่ก่อน (Flachsbart, 1999; Prockop, 2007; Goldstein, 2008)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (THC) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการเผาใหม้ไม่สมบูรณ์ และเชื้อเพลิงกับน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ถูกเผาใหม้ในห้องเผาใหม้ THC บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ระกายเกืองต่อจมูก ตา หลอดลม และปอด ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ (Kelly and Gunst, 1990) และเป็นสารตั้งด้นของการเกิดเขม่า (Soot Precursor) THC ในเครื่องยนต์จุดระเบิด ด้วยการอัดและเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟเกิดขึ้นต่างกัน ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการ อัดนั้นการฉีดแบบ direct Injection (DI) จะทำให้แกนกลางของละอองฝอยเชื้อเพลิงไม่ถูกเผาไหม้ นอกจากนี้ในจังหวะอัดอาจทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนหลุดเข้าไปในหัวฉีดทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่ เกิดการเผาไหม้ ประการสุดท้ายกือการไม่เผาไหม้ (Misfire) ในกระบอกสูบทำให้ THC หลุด ออกมามาก ส่วนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟนั้นจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีการผสมกันของ เชื้อเพลิงและอากาศก่อนเข้ากระบอกสูบทำให้ในช่วงจังหวะอัดเชื้อเพลิงบางส่วนจะหลุดเข้าไปใน ช่องว่างระหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบและกระบอกสูบจึงไม่เกิดการเผาไหม้ เมื่อถึงจังหวะขยายตัว กวามดันในกระบอกสูบลดงทำให้เชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นหลุดกลับเข้ามาในห้องเผาไหม้ อีก ประการหนึ่งเกิดจากช่วงที่เชื้อเพลิงผสมกันกับอากาศนั้นเชื้อเพลิงบางส่วนยังระเหยเป็นไอไม่หมด

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ทำให้ช่วงการเผาใหม้ไม่เกิดเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เชื้อเพลิงที่ยังไม่ระเหยไม่เกิดการเผาใหม้ และ ประการสุดท้ายการเกิดการดับของเปลวไฟ (Flame Quenching) เนื่องจากการที่ไฟดับก่อนถึงผนัง ห้องเผาไม้ทำให้มีเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นบริเวณผนังห้องเผาไหม้ไม่ถูกเผาไหม้ (Heywood *et al.,* 1988)

มลพิษอนุภาค (Particulates Matter, PM) มืองค์ประกอบหลักคือ เขม่า (Soot), Soluble Organic Fraction (SOF), สารซัลเฟค (SO<sub>3</sub>) และขี้เถ้า (Ash) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของเครื่องยนต์จุด ระเบิดด้วยการอัด โดยปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากฝุ่นละอองที่เรียกว่าเขม่า Particle มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเขม่า Agglomerate 100 ไมโครเมตร, Particle 0.1–1 ไมโครเมตรและ Spherule 10–50 นาโนเมตร) [Stanmore *et al.* (2001)] ซึ่งสามารถเข้าไปสู่ทางเดินของระบบทางเดินหายใจและปอดได้เป็นอย่างคี จึงอาจก่อให้เกิดความ ผิดปกติของระบบทางเดินหายใจได้ เนื่องจากในเขม่ามีสารหลายชนิดที่เป็นสารก่อมะเร็ง (Lewis and Coughlin, 1973; Soto *et al.*, 2008) โดยเขม่า เกิดจากกระบวนการผสมหนาและมีอุณหภูมิ ในช่วง 1,000 ถึง 2,800 K ดังสมการที่ 8 (Heywood *et al.*, 1988)

$$C_m H_n + yO_2 \longrightarrow 2_y CO + \frac{n}{2} H_2 + (m - 2y)C_s$$
 (8)

สภาวะการเกิดเขม่ามี 2 สภาวะคือ สภาวะแรก เรียกว่า Particle Formation เกิดจากการ จัดเรียงตัวของโมเลกุลเชื้อเพลิงจากสภาวะก๊าซกลายเป็นสภาวะของแข็งขนาดเล็ก โดยกระบวนการ ออกซิเดชัน (Oxidation) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในรูปของไฮโดรคาร์บอนอะตอมหรือ ไฮโดรคาร์บอนอโรมาติก และสภาวะที่สอง เรียกว่า Particle growth ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการ Surface growth, Coagulation และ Aggregation โดยกระบวนการ Surface growth เป็นกระบวนการของก๊าซซึ่งล้อมรอบโมเลกุลเชื้อเพลิงรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็น อนุภาคขนาดเล็ก ต่อมากระบวนการ Coagulation เป็นกระบวนการชนกันของอนุภาคขนาดเล็กทำ ให้จำนวนอนุภาคขนาดเล็กลดลงแต่เขม่าปริมาณเท่าเดิม สุดท้ายคือกระบวนการ Aggregation เป็น กระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็ก กลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ โดยขนาดและน้ำหนัก ของอนุภาคขนาดใหญ่ ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของไฮโดรการ์บอน โดยอะตอมของไฮโดรการ์บอน มีการจับตัวจำนวนมากจะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น (Heywood *et al.*, 1988; Tao *et al.*, 2007; Eastwood, 2008) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) เป็นก๊าซที่หากถูกปล่อยสู่บรรยากาศสามารถก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก โดยมีความรุนแรงของการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกมากกว่า CO<sub>2</sub> สูงถึง 23 เท่า (Wuebbles and Hayhoe, 2002; Huttunen *et al.*, 2003; Graham *et al.*, 2008) การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วมจะนำ CH<sub>4</sub> ในสภาวะก๊าซผสมเข้าไปแบบ Premixed Charge เมื่อ CH<sub>4</sub> ทำปฏิกิริยากับ O<sub>2</sub> อย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้จะเปลี่ยนแปลงเป็น ไฮโครเจน (H<sub>2</sub>), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดอกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ น้ำ (H<sub>2</sub>O) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 K ดังสมการที่ 9, 10, 11, และ 12 [Hoang *et al.* (2005)]

$$CH_4 + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$$
 (9)

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$
 (10)

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$
 (11)

$$CH_4 + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 4H_2$$
(12)

การเผาใหม้ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาใหม้ การไม่เกิดการจุดระเบิด การต้านการจุดระเบิดของ เกรื่องขนต์ และการผสมเชื้อเพลิงกับน้ำมันหล่อลื่นที่ผนังห้องเผาใหม้ เป็นสาเหตุหลักในการเกิด มลพิษของ CH4 [Korakianitis *et al.* (2010)]

#### 3. การลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการจัดการเผาไหม้ในกระบอกสูบ

มลพิษหลักในไอเสียของเครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วมมี 5 ชนิคคือ เขม่า, NOx, CO, THC และ CH₄ การลคมลพิษของไอเสียเครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยวิธีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางเคมีในกระบอกสูบในช่วงที่เกิดการเผาไหม้

วิธี Injection Strategies เป็นวิธีการฉีดก่อน Bottom Dead Center (BTDC) การฉีดหลัง Bottom Dead Center (ATDC) รวมทั้งการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องเผาใหม้หลายครั้งเพื่อการเผา ใหม้ที่สมบูรณ์และลดมลพิษที่เกิดขึ้นโดยใช้ ECU ควบคุมการฉีดได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2 โดยมีการ นำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมให้มีการฉีดเชื้อเพลิงก่อนองศาการฉีดมาตรฐาน

## สิบสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

(30° BTDC) พบว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่องศาการฉีด 33.5° BTDC มีความล่าช้าของการจุดระเบิดลดลง ทำให้ปริมาณ CO ลดลงแต่ THC เท่าเดิมเนื่องจากมีเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น (Nwafor, 2007)



ภาพที่ 2 แสดงจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลหลายกรั้งในห้องเผาไหม้ โดยใช้ ECU ควบกุมกำสั่ง

ทีมา: Wirojsakunchai (2009)

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาการฉีดแบบ 2 จังหวะ โดยทดลองเครื่องขนต์ Ricardo Hydra ซึ่ง ถูกดัดแปลงเป็นเครื่องขนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยทดลองที่ความเร็ว 1600 และ 2400 rpm, IMEP 2 bar และใช้ CH<sub>4</sub> ร้อยละ 70 ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด พบว่าการฉีดแบบ 2 จังหวะ (ฉีด ในช่วงการอัดก่อนศูนย์ตายบนทั้ง 2 จังหวะ) มีประสิทธิภาพของการควบคุมการเผาไหม้และ แรงดันในกระบอกสูบดีกว่าได้ดีกว่าการฉีดแบบจังหวะเดียวเนื่องจากการฉีดแบบ 2 จังหวะมีการ เผาไหม้ที่สมดุล นอกจากนี้พบว่าการฉีดแบบ 2 จังหวะทำให้ปริมาณ NOx และ CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น [Aroonsrisopon *et al.* (2009)] นอกจากนี้ได้นำระบบควบคุมแบบ QFT-Based แทนที่ระบบควบคุม แบบ PID เพื่อควบคุมระบบแรงดันในราง Common rail ให้มีประสิทธิภาพการฉีดสูงขึ้นในช่วง เครื่องยนต์มีภาระต่ำและสูง เนื่องจากมีการทำงานที่รวดเร็วและลำดับการทำงานไม่ซับซ้อน ทำให้ ลดปริมาณ NOx และการชิงจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ได้ (Chatlatanagulchai *et al.,* 2009)

วิธี Exhaust Gas Recirculation (EGR) หรือบางที่เรียกว่า External Exhaust Gas Recirculation (EEGR) เป็นการนำไอเสียจากการเผาใหม้บางส่วนจากห้องเผาไหม้นำกลับมาผสมกับอากาศก่อน เข้ากระบอกสูบ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบเชื้อเพลิงร่วม ได้แสดง ไว้ดังภาพที่ 3 พบว่าการเพิ่มปริมาณ EGR ทำให้ปริมาณ NOx ลดลงแต่เขม่าเพิ่มขึ้น และ ช่วยลด การชิงจุดระเบิด (Knock) ได้ (Kim and Lee, 2006)



ภาพที่ 3 แสดงระบบ EGR

ทีมา: Kim and Lee (2006)

นอกจากนี้การนำปริมาณ EGR 15% มาใช้ในเครื่องยนต์ HCCI พบว่ามีผลกระทบต่อความคัน และอัตราการสูญเสียความร้อนในกระบอกสูบน้อย และไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสิ้นเปลือง น้ำมันเชื้อเพลิงอีกค้วย [Canova *et al.* (2007)] นอกจากนี้การฉีคแบบ 2 จังหวะร่วมกับการเพิ่ม ปริมาณ Hot EGR และมุมองศาของ Throttling ที่เหมาะสมทำให้ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ NOx ลดลง 90% และ 50% ตามลำคับ เนื่องจากการคับของเปลวไฟและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง แต่อย่างไรก็ ตามพบว่าไม่สามารถลดปริมาณก๊าซมีเทนได้หมด (Wannatong *et al.*, 2009)

จากที่กล่าวมาในหัวข้อนี้พบว่าการจัดการเผาใหม้ในกระบอกสูบไม่สามารถลดปริมาณ CH₄ ได้หมดและการเปลี่ยนแปลงการเผาไหม้ในกระบอกสูบอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงาน ของเครื่องยนต์ลดลง

#### 4. การลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว มลพิษหลักในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมี 5 ชนิดคือ เขม่า, NOx, CO, THC และ CH4 ซึ่งการลดมลพิษของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ด้วยการเปลี่ยนแปลงการเผาไหม้ของเครื่องยนต์อาจไม่เพียงพอที่จะส่งผลให้เครื่องยนต์ผ่าน มาตรฐานควบคุมมลพิษไอเสียและอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องขนต์ วิธีการที่ ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการลดมลพิษโดยใช้ระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งติดตั้งไว้ที่ ทางออกของไอเสียเครื่องขนต์ (Mouza *et al.*, 1995; Heeb *et al.*, 2000; Amatayakul and Ramnas 2001; Cinti *et al.*, 2002; Riveros *et al.*, 2002; Zhang and Kim 2002) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยากัน ระหว่างสารในไอเสียกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสารเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) และ Light off Temperature (LT) สามารถนำสมการของ Arrhenius equation มาอธิบายตัวอย่างของ การเกิดปฏิกิริยา  $A+B \leftrightarrow C+D$  ได้ดังสมการที่ 13

$$T = A \exp\left(\frac{-E}{\bar{R}T}\right)$$
(13)

และอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 14

$$\frac{d[C]}{dt} = k[A]^{\mathbf{m}}[B]^{\mathbf{n}} \tag{14}$$

โดยค่า k คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่า A คือแฟคเตอร์ความถี่ซึ่งเป็นค่าคงที่ ค่า E คือพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา (KJ/mol) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4 ค่า R คือค่าคงที่ของก๊าซมีค่า 8.314 J/Kmol ค่า T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) รวมทั้งค่า m และ n คือลำดับของการเกิดปฏิกิริยา



Reaction Coordinate

ภาพที่ 4 แผนภูมิเส้นแสดงปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic reaction) ของสารทั่วไป

ที่มา: Department of Chemistry (2010)

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยามีดังนี้ (Turns, 2000)

 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้นจะมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากจำนวนอนุภาคของสารตั้งต้นมีการชนกันมากขึ้น

 อุณหภูมิ สารตั้งต้นอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานสูงขึ้นและเคลื่อนที่เร็วขึ้นทำให้ชนกันมากขึ้น

 พื้นที่ผิวสัมผัส โมเลกุลของสารตั้งต้นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา เร็วขึ้น เนื่องจากมีการสัมผัสกันมากขึ้น

 4. ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารเคมีที่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา จะเข้าไปลดพลังงานการกระตุ้นปฏิกิริยา

5. ชนิดของสารตั้งต้นขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวและ โครงสร้างของ โมเลกุลและพบว่า สารประกอบไฮโครคาร์บอนประเภท Alkanes มีความเสถียรมากที่สุด

การเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Diesel oxidation catalyst (DOC) ซึ่งเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาของสารที่มีเนื้อต่างชนิดกัน (Heterogeneous) ได้ แสดงไว้ดังภาพที่ 5 โดย Froment and Bischoff (1990) ได้อธิบายไว้ดังนี้

 Mass Transfer สารตั้งต้นที่ใหลเข้ามาจะมีการทำปฏิกิริยากันเองใน Bulk gas จนถึง พื้นผิวของสารเคลือบ Substrate (Washcoat)

2. Pore Diffusion สารตั้งต้นจะแพร่ไปที่รูพรุนของพื้นผิว (สารเร่งปฏิกิริยาเคมีส่วนมาอยู่ ที่รูพรุนของพื้นผิว)

3. Adsorption เกิดการดูดซึมสารตั้งด้นเพื่อทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว

4. Catalytic Reaction เกิดการทำปฏิกิริยาของสาร โดยขึ้นอยู่กับ Rate limiting step ของ แต่ละสารที่ทำปฏิกิริยากัน

- 5. Desorption เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วสารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมา
- 6. Pore Diffusion สารผลิตภัณฑ์จะแพร่ออกมาที่พื้นผิวของสารเคลือบ Substrate
- 7. Mass Transfer สารผลิตภัณฑ์ใหลออกไปใน Bulk gas



ภาพที่ 5 ภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Diesel oxidation catalyst (DOC)

ที่มา: Hayes et al. (1997)

Heck et al. (2002) กล่าวว่าเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับ อุณหภูมิ พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นกระบวนการ Chemical Kinetic (ขั้นตอนที่ 3, 4, และ 5) ซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าเนื่องจากมีพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาน้อย และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพลังงานมากขึ้นจนถึง กระบวนการ Pore Diffusion (ขั้นตอนที่ 6) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Mass Transfer (ขั้นตอนที่ 7) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แผนภูมิเส้นแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิ

ทีมา: Heck et al. (2002)

Diesel oxidation catalyst (DOC) เป็นเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาหรือเครื่องฟอกไอ เสียที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลมีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการออกซิเดชันกับ THC และ CO เพื่อ เปลี่ยนเป็น CO<sub>2</sub> และทำให้เกิดความร้อนขึ้นดังสมการที่ 15 และ 16 ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ DOC เป็นอุปกรณ์เพื่อควบคุมอุณหภูมิไอเสียตามที่เราต้องการได้แสดงไว้ดังภาพที่ 7

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + Heat$$
 (15)



ภาพที่ 7 แสดงหลักการทำงานของ Diesel oxidation catalyst

16

## ลิขสิทปิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

Stein (1996) ได้ทดลองการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC กับ เครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรลแบบมีเทอร์โบชาร์จ (Direct Injection Turbocharged-Intercooled Commercial Vehicle Engine) พบว่าความเร็วในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Space Velocity, SV) ที่ช้ากว่าสามารถลดปริมาณ CO และ THC ได้คีกว่าความเร็วในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ ้เร็วกว่าเนื่องจากมีเวลาเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวนานกว่า ประเด็นต่อมาสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เป็น แพลทินัมอย่างเคียวสามารถลคปริมาณ CO และ THC ได้ดีกว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เป็นพาเลเคียม ้อย่างเดียว นอกจากนี้สารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมที่มีปริมาณสารแพลทินัมผสมอยู่มากสามารถลด ้ปริมาณ CO และ THC ได้ดีกว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมที่มีปริมาณสารแพลทินัมผสมอยู่น้อย แต่ เมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่า 700°C เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพของการลด CO และ THC ใกล้เคียงกันเนื่องจาก Light off temperature ของสารประกอบใกล้เคียงกันได้แสดงไว้ดัง ภาพที่ 8 ประเด็นต่อมาในช่วงอุณหภูมิต่ำเขม่าที่ออกจากเครื่องยนต์มีปริมาณที่สูงมาก เมื่อไหลผ่าน เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณเขม่าลดลงเนื่องจาก the Soluble Organic Fraction (SOF) ที่เคลือบบนผิวเขม่าเกิดกระบวนการออกซิเดชันทำให้ปริมาณเขม่าลดลง ต่อมาในช่วง อุณหภูมิสูงพบว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมที่มีสารแพลทินัมปริมาณน้อยและสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ เป็นสารพาเลเดียมอย่างเดียวจะมีปริมาณก๊าซซัลเฟต (SO,) เกิดขึ้นน้อย ดังนั้นการนำสารเร่ง ้ปฏิกิริยาเกมีที่เป็นสารแพลทินัมและพาเลเดียมผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อสามารถลด ปริมาณ CO THC และเขม่าได้ และเมื่อนำสาร Methyl Ester ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ปริมาณ CO และ THC เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณเขม่าลคลงผสมในน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับ DOC ทำให้ปริมาณ CO และ THC ลดลงได้



#### ภาพที่ 8 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพของสารแพลทินัมและพาเลเดียมใน DOC

ที่มา: Stein (1996)

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

Zhang et al. (2010) กล่าวว่า เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยใช้ก๊าซเมทานอล (CH<sub>3</sub>OH) ้เป็นเชื้อเพลิงร่วม เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลแล้วมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนและเขม่าน้อยกว่าแต่มี ปริมาณ THC และ CO มากกว่า นอกจากนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางไอเสียของ ้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกับอัตราส่วนของปริมาณก๊าซเมทานอลต่ออากาศ (Fumigation Ratio) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของปริมาณก๊าซเมทานอลต่ออากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ THC และ CO มากขึ้นเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในกระบอกสูบ เมื่อนำ DOC ซึ่งเป็นแบบ Engelhard CCX8772A มาติดตั้งแสดงไว้ดังภาพที่ 9 พบว่าจะทำให้ปริมาณ THC, CO และเมทานอลลดลง เนื่องจากมีสารที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าปริมาณ NOx ลดลงเล็กน้อยแต่ ้ก๊าซในโตรเจนใดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนของปริมาณก๊าซเม ทานอลต่ออากาศทำให้อากาศลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาใหม้ในกระบอกสูบและปริมาณ NOx ลดลง และ  $\mathrm{NO}_2$  ไม่สามารถเกิดกระบวนการออกซิเดชันเป็น  $\mathrm{N}_2$  และ  $\mathrm{O}_2$  ได้ เมื่อนำ DOC มาติดตั้ง พบว่าจะทำให้ NO2 ลคลงเนื่องจากสามารถเกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสม ใน DOC ดังนั้นปริมาณ NOx จึงลดลงด้วย นอกจากนี้พบว่าเมื่อเขม่าไหลผ่าน DOC ทำให้ปริมาณ เขม่าลุคลง เนื่องจาก the Soluble Organic Fraction (SOF) ที่อยู่บนผิวของเขม่าเกิดกระบวนการ ออกซิเคชันกับสารเร่งปฏิกิริยาเคมีใน DOC นอกจากนี้พบว่าปริมาณก๊าซเมทานอลเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การหลุดเข้าไปของก๊าซเมทานอลในร่องแหวนของกระบอกสบ (Crevices) และการคับของเปลวไฟ ก่อนถึงผนังของกระบอกสบ (Quenched) เมื่อนำก๊าซเมทานอลไหลผ่าน DOC พบว่าทำให้ปริมาณ ก๊าซเมทานอลลดลง เนื่องจาก DOC เกิดกระบวนการออกซิเดชันกับสารชนิดอื่นทำให้ DOC มี อุณหภูมิสูงขึ้นจนสามารถลคปริมาณของก๊าซเมทานอลได้


ภาพที่ 9 แสดงตำแหน่งของ DOC

ทีมา: Zhang et al. (2010)

ในปัจจุบันระบบฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลคปริมาณ CH4 ส่วนใหญ่จะมี Substrate เป็น Cordierite โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมที่มีพาเลเดียม (Pd) และแพลทินัม (Pt) เคลือบอยู่บน พื้นผิวของ Alumina (Al2O3) เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ CH4 ดังสมการที่ 17

$$CH_4 + 2O_2 + Pd/Pt \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + Pd/Pt$$
 (17)

Yamamoto and Uchida (1998) ได้ศึกษาการทำงานของระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (Catalytic Oxidation) เพื่อลดปริมาณ CH4 ในไอเสียของเครื่องยนต์ ก๊าซธรรมชาติที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 658 K โดยเปรียบเทียบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Pd-Pt/Alumina, Pt-Rh/Alumina, Pd/Alumina, และ Pt/Alumina พบว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่มี Pd-Pt/Alumina มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH4 และมีอายุการใช้งานมากกว่าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมชนิดอื่นเนื่องจาก CH4 ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ดีกับสารพาเลเดียม (Pd) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณสารพาเลเดียมในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาที่มี Pd-Pt/Alumina โดยเพิ่มได้ถึง 15 g/I ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการลดของ CH4 และมี อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มปริมาณสารแพลทินัม (Pt) โดยเพิ่มได้ถึง 7 g/I ส่งผลให้

## ลิบสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ  $CH_4$  และมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสาร พาเลเดียมสามารถเกิดการ Sintering (เป็นสาเหตุหนึ่งทีทำให้สารเร่งปฏิกิริยาเคมืลดประสิทธิภาพ การทำงาน) ได้ดีกว่าสารแพลทินัม นอกจากนี้ได้ทดลองเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้งาน มากกว่า 400 ชั่วโมงพบว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสม Pd-Pt/Alumina โดยมีปริมาณส่วนผสมสารพาเลเดียม 10 g/l และสารแพลทินัม 10 g/l จะมี ประสิทธิภาพของการลด  $CH_4$  ดีกว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมแบบอื่นได้แสดงไว้ดังภาพที่ 10 เนื่องจากสารแพลทินัมเกิดการ Sintering ช้ากว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีชนิดอื่น



Conversion of hydrocarbon at 658 K as a function of time on stream for various catalysts. ( $\bigcirc$ ) Pt(10 g/l)–Pd(10 g/l)/alumina, ( $\triangle$ ) Pt(10 g/l)/alumina, ( $\bigcirc$ ) Pd(10 g/l)/alumina.

ภาพที่ 10 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี เมื่อเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาถูกใช้งานมากกว่า 400 ชั่วโมง

ที่มา: Yamamoto and Uchida (1998)

Persson et al. (2006) ได้กล่าวว่า ในสภาวะ ไม่คงที่ (Transient State) ของการทำงานเครื่อง ฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Pd/Alumina มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ CH<sub>4</sub> สูงกว่า Pd-Pt/Alumina ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 11 แต่ในสภาวะคงที่ (Steady State) ของการทำงาน Pd/Alumina จะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ต่ำกว่า เนื่องจากช่วงสภาวะไม่คงที่ของการทำงานใน เครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีอุณหภูมิไม่สูงมากและสารพาเลเดียมมี Light off Temperature ของ CH<sub>4</sub> ต่ำกว่าสารแพลทินัม ส่วนช่วงสภาวะคงที่ของการทำงานจะมี ไอน้ำปนมากับ ไอเสียมาก ส่งผลให้ O<sub>2</sub> ของไอน้ำเข้าไปแย่งทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารพาเลเดียมเป็นสารพาเลเดียมออกไซด์ (PdO) นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Pd-Pt/Alumina มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ CH<sub>4</sub> ได้ดีกว่าสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมชนิดอื่น



Transient activity tests during heating. The methane conversion is shown versus the inlet temperature to the catalysts for  $Pd_{100}Pt_0$  ( $\blacksquare$ ),  $Pd_{80}Pt_{20}$  ( $\bullet$ ),  $Pd_{67}Pt_{33}$  ( $\blacktriangle$ ),  $Pd_{50}Pt_{50}$  ( $\bigtriangleup$ ),  $Pd_{33}Pt_{67}$  ( $\bigcirc$ ) and  $Pd_0Pt_{100}$  ( $\square$ ).

ภาพที่ 11 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่มีแพลทินัมและ พาเลเดียมในสัคส่วนที่ต่างกัน

ทีมา: Persson et al. (2006)

Gelin (2003) ได้ทดสอบประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาที่มีสาร Pd/Al<sub>2</sub>O, และ Pt/Al<sub>2</sub>O, แบบใหม่และใช้งานแล้ว พบว่า Pd/Al<sub>2</sub>O, แบบใหม่และใช้ งานแล้วมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า Pt/Al<sub>2</sub>O, แบบใหม่และใช้งานแล้ว เนื่องจาก แพลทินัมสามารถเกิด Sintering ได้ดีกว่าพาเลเดียม ต่อมาเมื่อทดสอบโดยการฉีดน้ำเข้าไปในเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีสาร Pd/Al<sub>2</sub>O, แบบใหม่และ ใช้งานแล้วและ Pt/Al<sub>2</sub>O, แบบใหม่ มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ลดลงมาก เนื่องจาก O<sub>2</sub> ของไอ น้ำสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ CH<sub>4</sub> ทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันกับสารพาเลเดียมลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ CH<sub>4</sub> ทำปฏิกิริยา Pt/Al<sub>2</sub>O, แบบใช้งานแล้ว มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสามารถทำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้น้อยอยู่แล้ว ต่อมาเมื่อฉีดก๊าซซัลเฟอร์ได ออกไซด์เข้าไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแทนน้ำ พบว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่มีสาร Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แบบใหม่และใช้งานแล้ว มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ลดลงมากกว่า Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แบบใหม่และใช้งานแล้ว เนื่องจาก SO<sub>2</sub> เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา กลายเป็น SO<sub>3</sub> ไปเกาะอยู่บนพื้นผิวของ PdO และสารอลูมินา (Alumina) กลายเป็น PdSO<sub>4</sub> ทำให้ CH<sub>4</sub> ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารพาเลเดียมลดลงได้แสดงไว้ดังภาพที่ 12 ส่งผลให้สารพาเลเดียม เกิด Poisoning ได้ดีกว่าสารแพลทินัม



ภาพที่ 12 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับสารพาเลเดียม

ที่มา: Gelin (2003)

Lapisardi (2006) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาที่มีสาร Pd-Pt/Alumina เป็นโลหะผสมในไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ พบว่าเมื่อ เพิ่มปริมาณสารพาเลเดียมทำให้ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารพาเลเดียมทำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ CH<sub>4</sub> ได้ง่าย และเมื่อเพิ่มปริมาณสารพาเลเดียมถึงร้อยละ 0.93 ของ 200 mg catalyst จะมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ใกล้เกียงกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีสาร พาเลเดียมอย่างเดียว ต่อมาเมื่อฉีดน้ำเข้าไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่าประสิทธิภาพ ของการลด CH<sub>4</sub> ต่ำลง และพบว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณสารพาเลเดียมร้อยละ 0.93 ของ 200 mg catalyst จะมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ดีกว่าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาที่มีสารพาเลเดียมอย่างเดียวแสดงไว้ดังภาพที่ 13

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรศาสกร์



ภาพที่ 13 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเมื่อฉีดน้ำเข้าไปใน เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

**ทีมา**: Lapisardi (2006)

นอกจากสารเร่งปฏิกิริยาเคมีจะมีผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของ CH<sub>4</sub> แล้วสารเคลือบ Substrate (Washcoat or Carrier or Support) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการแพร่และความทนทานของสารเร่ง ปฏิกิริยาเคมีก็มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน ส่วนใหญ่สารเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นสาร พาเลเดียมและแพลทินัมจะใช้สารเคลือบ Substrate เป็นสาร Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เนื่องจากพื้นที่ผิว (Surface areas) ขนาดของแกน (Pore size distributions) คุณสมบัติความเป็นกรดของพื้นผิว (Surface areas) ขนาดของแกน (Pore size distributions) คุณสมบัติกวามเป็นกรดของพื้นผิว (Surface acidic properties) และ โครงสร้างของผลึก (Crystal structure) ที่หลากหลาย ซึ่งคุณสมบัติ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนและวิธีการผลิตของผู้ผลิต แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 800°C) พบว่าเกิดการสูญเสียพื้นผิวของสารเคลือบ Substrate เนื่องจาก โครงสร้างผลึกของ Alumina เปลี่ยน จาก γ-Alumina เป็น α-Alumina (โครงสร้างผลึกขยายใหญ่ขึ้น) (Yang *et al.*, 2000) และเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิจนถึง 1,150°C พบว่าเกิดการชนกันของพื้นผิวทำให้เกิดความเสียหายและการหดตัวของรู พื้นผิวเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาทางเคมีในเครื่องฟอกไอเสีย ลดลง (Heck *et al.*, 2000)

Escandon *et.al.* (2005) กล่าวว่าเมื่อใช้สารพาเลเดียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมี และทดสอบ สารเคลือบ Substrate เป็นสาร Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Silica (SiO<sub>2</sub>), Anatase (TiO<sub>2</sub>), และ Zirconia (ZrO<sub>2</sub>) ทดสอบ 15 ชั่วโมง ที่สภาวะ 450°C, SV 12 h<sup>-1</sup>, และ 5000 ppm of CH<sub>4</sub> พบว่า Pd/TiO<sub>2</sub> มี Light off temperature สูงสุด และ Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pd/SiO<sub>2</sub> และ Pd/ZrO<sub>2</sub> มี Light off temperature ของ CH<sub>4</sub> ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าของ Pd/TiO<sub>2</sub> เนื่องจากพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาของ Pd/TiO<sub>2</sub> (

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

78.7 kJmol<sup>-1</sup>) สูงกว่า Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( 76.3 kJmol<sup>-1</sup>), Pd/SiO<sub>2</sub> ( 75.0 kJmol<sup>-1</sup>) และ Pd/ZrO<sub>2</sub> ( 77.0 kJmol<sup>-1</sup>) ภาพที่ 14 แสดงประสิทธิภาพการการลด CH<sub>4</sub>ในงานวิจัยดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อทดสอบ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว (BET surface area) พบว่า Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Pd/ZrO<sub>2</sub> ไม่มีผลกระทบจากการ เปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว แต่ Pd/SiO<sub>2</sub> มีพื้นที่ผิวลดลง 44% ต่อมาเมื่อทดสอบการแพร่ (Pd dispersion) พบว่า Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ไม่เปลี่ยนแปลงแต่ Pd/SiO<sub>2</sub> ลดลง และ Pd/ZrO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น (อาจเกิดจากปฏิกิริยา Redox ของอะตอม Yttria ที่เป็นสารประกอบอยู่ในสาร ZrO<sub>2</sub>) ต่อมาเมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลง รูปร่างที่เป็นโครงสร้างผลึก (XRD) พบว่า Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Pd/SiO<sub>2</sub> มีรูปร่างที่เป็นโครงสร้างผลึก น้อยกว่า Pd/ZrO<sub>2</sub>



ภาพที่ 14 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการการลด CH₄ ที่สภาวะ 5000 ppm: (■) Pd/TiO₂, (○)Pd/SiO₂, (△)Pd/Al₂O₃, และ (米) Pd/ZrO₂



นอกจากสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและสารเคลือบ Substrate ที่กล่าวมาแล้วนั้นพบว่ายังมีอีกหลาย ปัจจัยที่มีผลต่อการลคมลพิษในไอเสียโคยปฏิกิริยาออกซิเคชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การถ่ายเทมวล (Mass transfer), ความคันลด (Pressure Drop) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ของก๊าซไอเสียในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา คังนั้นจึงมีการออกแบบ Substrate ให้มี วัตถุประสงก์ตามความต้องการของการใช้งาน ในปัจจุบัน Substrate ที่นิยมในเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยามี 3 แบบ คือ แบบเม็ค (Pellets), โฟม (Foam) และรังผึ้ง (Honeycomb) ได้แสคงไว้คัง ภาพที่ 15 ซึ่งแต่ละแบบถูกออกแบบให้มีความแตกต่างทางค้านกายภาพ ประเด็นแรกเมื่อพิจารณา การถ่ายเทมวลที่อุณหภูมิและความเร็วเดียวกันพบว่า Substrate แบบเม็คมีการถ่ายเทมวลมากที่สุด แต่แบบรังผึ้งมีการถ่ายเทมวลน้อยที่สุด เนื่องจากแบบเม็คมีความพรุนหรือพื้นที่ผิวของรูปทรง

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

เรขากณิด (Geometric Surface Area, GSA) มากที่สุดและแบบรังผึ้งมีความพรุนน้อยที่สุด ต่อมาเมื่อ เพิ่มความเร็วมากขึ้น โดยให้อุณหภูมิคงที่พบว่าการถ่ายเทมวลของก๊าซ ไอเสียในเครื่องฟอกไอเสีย เซิงเร่งปฏิกิริยาแบบเม็ดและแบบ โฟมมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นแต่แบบรังผึ้งมีการกระจายตัวเท่าเดิม ต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น โดยให้ความเร็วคงที่พบว่าแบบเม็คมีการถ่ายเทมวล ได้มากที่สุดแต่ แบบรังผึ้งมีการถ่ายเทมวลน้อยที่สุด ประเด็นต่อมาเมื่อพิจารณาความดันลดที่อุณหภูมิและความเร็ว มีสภาวะเดียวกันพบว่าแบบเม็คมีความดันลดมากที่สุดแต่แบบรังผึ้งมีความดันลดที่อุณหภูมิและความเร็ว เนื่องจาก Substrate แบบเม็คมีความพรุนมากกว่าแบบ โฟมและรังผึ้ง ต่อมาเมื่อพิจารณาความดันลด ของ Substrate แต่ละแบบพบว่า Substrate แบบเม็คที่มีขนาดเล็กจะมีความดันลดมากกว่าขนาดใหญ่ เนื่องจาก Substrate แบบเม็คที่มีขนาดเล็กมีความพรุนมากกว่า Substrate แบบเม็ดที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจาก function ก็ที่มีขนาดเล็กมีความพรุนมากกว่า Substrate แบบเม็ดที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจาก function ก็มีการณาการถ่ายเทความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิและความเร็วสภาวะเดียวกัน แบบเม็ดมีการถ่ายเทความร้อน ได้มากที่สุดทำให้อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาไม่สูงมาก แต่แบบรังผึ้งมีการกูมิสูงมาก เนื่องจากแบบเม็ดมีความพรุนมากกว่าแบบ โฟม และรังผึ้งดังตารางที่ 1 (Heck *et al.*, 2001; Giani *et al.*, 2005; Patcus *et al.*, 2007)



ภาพที่ 15 ภาพถ่าย Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคแบบเม็ค, โฟม และรังผึ้ง

ที่มา: Patcus et al. (2007)

รายการ	เม็ด	<b>โฟม</b>	รังผึ้ง
(Items)	(Pellets)	(Foam)	(Honeycomb)
การถ่ายเทมวล (Mass transfer)	มาก	ปานกลาง	น้อย
ความพรุน (Porous)	มาก	ปานกลาง	น้อย
การถ่ายเทมวลโดยเพิ่มความเร็ว	ເพີ່ນ	ເพີ່ມ	เท่าเดิม
การถ่ายเทมวลโดยเพิ่มอุณหภูมิ	ເพື່ມນາກ	เพิ่ม	เพิ่มน้อย
ความคันลด (Pressure drop)	มาก	ปานกลาง	น้อย
การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)	<b>ນ</b> າຄ	ปานกลาง	น้อย

#### ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของ Substrate ทั้ง 3 แบบ

นอกจากนี้ได้มีการออกแบบลักษณะของ Substrate แบบรังผึ้งในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาหลายแบบ เช่น ทรงกลม ทรงสามเหลี่ยม ทรงสี่เหลี่ยม และทรงหกเหลี่ยม เป็นต้น เพื่อให้มี กวามสามารถในการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น(Balakotaiah and West, 2002; Bhattacharya *et al.*, 2004; Liu and Roy, 2004) ต่อมาได้มีการพัฒนาลักษณะของ Substrate แบบรังผึ้งให้เป็นแบบ Wire-Mesh Honeycomb (WMH) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 16 โดยลักษณะ Substrate แบบรังผึ้งให้เป็นแบบ Wire-Mesh Iaหะ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นยึดติดกัน โดยแผ่นแรกเป็นแผ่นเรียบและแผ่นที่สองเป็น ลูกกลื่น เพื่อให้มีประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลและความร้อนใกล้เคียงกับแบบเม็ดและมีความ ดันลดใกล้เกียงกับแบบรังผึ้ง เนื่องจาก WMH มีพื้นที่ผิวของรูปทรงเรขาคณิตมากกว่าแบบรังผึ้งทำ ให้มีพื้นที่ของการถ่ายเทมวลและความร้อนมากขึ้น และมีพื้นที่เปิดด้านหน้า (Open Frontal Area, OFA) มากกว่าแบบรังผึ้งทำให้มีแรงดันด้านการไหลน้อยลง (Ahlstrom-Silversand and Odenbrand, 1999; Mei *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2003, 2004, 2006; Sun *et al.*, 2008)



ภาพที่ 16 ภาพถ่าย Substrate ที่ทำมาจากโลหะแบบ Wire-Mesh Honeycomb

#### ทีมา: Mei et al. (2004)

ในปัจจุบันวัสคุที่นิยมนำมาใช้ทำ Substrate ที่มีลักษณะแบบรังผึ้งในเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยามี 2 ชนิดคือ โลหะ (Metal) และเซรามิค (Ceramic) ในช่วงแรกของการนำเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยามาใช้ลดปริมาณสารมลพิษในรถยนต์ได้ผลิต Substrate ที่ทำมาจากเซรามิค ซึ่ง ้ส่วนใหญ่ทำมาจาก แมกนี้เซียมออกไซด์ (MgO) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากเซรามิกมีราคาถูก สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ อุณหภูมิของการหลอมละลายสูง (ประมาณ 1450°C) และสามารถต่อต้าน การเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้ ต่อมา Substrate ที่ทำมาจากโลหะซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจาก เหล็ก (Fe) โครมีเนียม (Cr) และอลูมินัม (Al) ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากโลหะสามารถ ้ออกแบบได้หลากหลาย มีพื้นที่ผิวของรูปทรงเรขาคณิตและพื้นที่เปิดด้านหน้ามาก การส่งผ่าน ้ความร้อนได้ดี มีการกระจายความร้อนสูง แข็งแรง และมีความดันลดต่ำ แต่มีรากาแพง ้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง และอุณหภูมิของการหลอมละลายต่ำกว่าเซรามิค (Pfalzgraf *et al.*, 1996; Nijhuis *et al.*, 2001; Williams, 2001; Avila *et al.*, 2005) นอกจากนี้พบว่า Substrate ที่เป็นเซรามิคไม่สามารถยึดติดกับด้านนอกของ Substrate (Shell) โดยการเชื่อมได้ เนื่องจากด้านนอกของ Substrate ทำมาจากวัสดุโลหะ แต่ Substrate ที่เป็นโลหะสามารถยึดติดกับ ้ด้านนอกของ Substrate โดยการเชื่อมได้เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการของหลอมเหลว ใกล้เคียงกัน (Heck et al., 2001; Garin, 2004) ต่อมาเมื่อพิจารณาสารเร่งปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุที่ นำมาใช้เป็น Substrate โดยใช้สารซีเรียมออกไซด์และอลูมินา (CeO,/Al,O,) เป็นสารสารเคลือบ

Substrate พบว่าที่ความเร็วในช่องว่างของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Space Velocity, SV) ต่ำ Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคมีประสิทธิภาพการลด CO และ THC สูงกว่าโลหะ เนื่องจาก เซรามิคมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำกว่าโลหะทำให้ไม่เกิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากวัสดุ ของ Substrate แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ความเร็วในช่องว่างของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Space Velocity, SV) สูง Substrate ที่ทำมาจากโลหะมีประสิทธิภาพการลด CO และ THC สูงกว่า โลหะ เนื่องจากเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาตรเท่ากัน Substrate ที่ทำมาจากโลหะ สามารถออกแบบให้มีพื้นที่ผิวของรูปทรงเรขาคณิต (Geometric surface area, GSA) มากกว่า Substrate ที่ทำมาจากเซรามิค [Santos and Costa (2008)] นอกจากนี้เมื่อนำนา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นสารเร่ง ปฏิกิริยาเคมีของ CH<sub>4</sub> พบว่า Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า โลหะ เนื่องจาก Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคมีการส่งผ่านความร้อนต่ำกว่า Substrate ที่ทำมาจาก โลหะ ทำให้ Substrate ที่ทำมาจากเซรามิคมีอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสูงกว่า Substrate ที่ทำมาจากโลหะได้แสดงไว้ดังภาพที่ 17 (Kikuchi *et al.*, 2003)



ภาพที่ 17 แผนภูมิเส้นแสดงประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีพาเลเคียมที่มี Substrate เป็นวัสดุต่างชนิดกัน

ทีมา: Kikuchi et al. (2003)

นอกจากนี้ Bartholomew (2001) ได้กล่าวว่าการ ไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีในเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นปัญหาที่สำคัญและต่อเนื่องเป็นเวลานานในอุตสาหกรรมเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปการสูญเสียการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆซึ่ง เป็นประเด็นสำคัญของการวิจัย พัฒนาและออกแบบ เพื่อป้องกันการลดประสิทธิภาพลงของเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการ Poisoning, Fouling, Sintering, Gas/vapor-solid and solidstate reaction และ Attrition ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดสาเหตุต่างๆ ของการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยา เคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาดังนี้

Poisoning เป็นสาเหตุการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาทางเคมี โดยสารพิษที่ทำให้เกิด Poisoning ทำปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้

 รวมตัวกับอะตอมของสารพิษด้วยกันทำให้มีขนาดของอะตอมใหญ่ขึ้นแล้วอุดรูพื้นที่ ผิวของสารเคลือบ Substrate ทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา

 สารพิษทำปฏิกิริยากับสารในไอเสียทำให้ไอเสียไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสารเร่ง ปฏิกิริยาเคมีได้

 สารพิษทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเกิดพื้นที่ผิวที่มีสารพิษเจือปนทำให้พื้นที่ผิว ของสารเคลือบ Substrate มีประสิทธิภาพลดลง

4. สารพิษที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่ผิวของสารเคลือบ Substrate ขัดขวางการทำปฏิกิริยา กันระหว่างไอเสียกับสารเร่งปฏิกิริยาเคมี

นอกจากนี้ Poisoning จะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารพิษที่ปน มากับ ใอเสียซึ่งมีมากมายหลายชนิด สารพิษที่ทำให้เกิด Poisoning ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเร่ง ปฏิกิริยาเกมี เช่น สารเร่งปฏิกิริยาเกมีที่เป็น โลหะแพลทินัมและพาเลเดียม จะมีสารพิษที่เป็น สารประกอบจำพวก ตะกั่ว ฟอสฟอรัส สังกะสี ซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ และเหล็ก ปนเปื้อนมากับไอเสีย เป็นต้น Fouling เป็นสาเหตุการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาทางกล โดยเกิดจากการรวมตัวกันของ THC เปลี่ยนเป็นถ่าน (Coke) ปกคลุมพื้นที่ผิวและรู ของสารเคลือบ Substrate และเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Substrate แบบเม็คเมื่อถูก อนุภาคการ์บอนขนาดเล็กอุดรูช่องว่างของ Substrate ทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไม่ สามารถทำงานได้ นอกจากนี้ โครงสร้างแบบของถ่านบนสารเคลือบ Substrate ของโลหะออกไซด์ และซัลไฟด์ที่เกิดจากสารอโรมาติก (Aromatic) จะมีโครงสร้างขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างแบบอื่น เมื่อถ่านที่เกิดจากสารอโรมาติกเกิดขึ้นในรูของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีความหนามากขึ้นส่งผลให้รู ของสารเคลือบ Substrate มีขนาดเล็กลงส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง และ

สามารถเกิครอยร้าว (Cracking) ที่รูของสารเคลือบ Substrate ใค้เนื่องจากความเครียคที่พื้นผิว

Sintering เป็นสาเหตุการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาทางความร้อน โดยเกิดจากอุณหภูมิสูงในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการ รวมตัวของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี Sintering จะเกิดมาก ขึ้นเมื่อมีไอน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับไอเสียและสารเร่งปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้พื้นที่ผิวของสาร เกลือบ Substrate จะเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสูง เกินจุดหลอมเหลวทำให้เกิดการย่อยสลายของพื้นที่ผิวและรูของสารเคลือบ Substrate นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการข้อนกลับในการโตของผลึก (Redispersion) ซึ่งเกิดจากสารระเหยโลหะออกไซด์และคลอไรด์ที่อยู่บนพื้นผิวของสารเคลือบ Substrate สลายตัวส่งผลให้สารเร่งปฏิกิริยาเคมีมีขนาดเล็กลง ทำให้อนุภาคออกไซด์สามารถปก กลุมสารเร่งปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลง

Gas/vapor-solid and solid-state reaction เป็นสาเหตุการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาทางเคมี โดยเกิดจากสารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำปฏิกิริยากับไอน้ำ หรือก๊าซบางชนิดในไอเสีย เช่น การทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารอลูมินา ทำให้เกิดสารอลูมินาซัลไฟด์ (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) ซึ่งไปปีดรูที่เคลือบผิว Substrate ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่ง ปฏิกิริยาลดลง หรือการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) กับไอน้ำทำให้สาร ซิลิกอนออกไซด์ได้รับความเสียหายได้ นอกจากนี้สารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำปฏิกิริยากับสารระเหย (Volatile) ในไอเสีย เช่น สารระเหยออกไซด์ (Oxide Volatile) บางชนิดทำปฏิกิริยากับสารเร่ง ปฏิกิริยาเคมี Pd-Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทำให้สารรูเทอเนียม (Ruthenium, Ru) มีประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพเดิม หรือสารระเหยอาร์บอนนิว (Carbonyls Volatile) บางชนิดทำ ปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเคมี Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทำให้สารนิเกิล (Ni) สลายตัวจนมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรร่าสกร์

สารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ Substrate เช่น สารเร่งปฏิกิริยาเคมี Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> กลายเป็น PdO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เนื่องจาก Pd ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและ ไอน้ำที่อยู่ในสารอลูมินาส่งผล ให้มี Light off temperature สูงกว่าเดิม

Attrition เป็นสาเหตุการไม่ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเกมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาทางกล โดยเกิดจากความเครียดเนื่องจากความร้อนและเคมี โดยความเครียดเนื่องจากความ ร้อนเกิดจากอนุภาคของสารเร่งปฏิกิริยาเกมีถูกให้ความร้อนและเย็นอย่างรวดเร็วแต่สัมประสิทธิ์ การขยายตัวของสารเคลือบ Substrate ไม่เท่ากัน และความเครียดเนื่องจากเคมีเกิดจากความ หนาแน่นไม่เท่ากันของสารเคลือบ Substrate กับอนุภาคของสารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ นอกจากนี้การเกิด Attrition มี 2 เหตุการณ์คือการแตกร้าวของสารเคลือบ Substrate เนื่องจากความหนาของสารเคลือบ Substrate บางเกินไป และการสึกกร่อนของสาร เกลือบ Substrate เนื่องจากการชนกันของอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนัง รวมทั้งแรงเลือน เนื่องจากความเร็วหมุนวนและการแตกของฟองอากาศที่ความเร็วสูง นอกจากนี้สาเหตุที่สารเคลือบ Substrate มีความหนาลดลง (สึกกร่อน) เกิดจากปัจจัยดังนี้

- 1. ปริมาณความเครียด
- 2. ความทนทานของสารเคลื่อบ Substrate
- 3. ความหนาและพื้นที่ผิวของสารเคลือบ Substrate
- 4. ขนาดความลึกและความกว้างของรูของสารเคลือบ Substrate

#### 5. วิธีเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ได้อย่างรวดเร็ว (Fast Light-off Temperature, FLT)

การนำวิธีเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ใค้อย่างรวดเร็ว (Fast Light-off Temperature, FLT) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้ สามารถทำงานได้เร็วขึ้น ซึ่งมีด้วยกัน 2 ระบบคือ ระบบ Active System และระบบ Passive System

ระบบแรก Active Systems เป็นการนำพลังงานจากภายนอกเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึง Light off temperature ได้แก่ การใช้เครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า (Electrical heater) หัวเผา (Fuel Burner) และไมโครเวฟ (Microwave) ซึ่งจะอธิบายดังนี้

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรศาสกร์

เครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า (Electrical heater) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 18 เป็นอุปกรณ์ที่ นำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้พัฒนาเครื่องทำความร้อนทาง ไฟฟ้าในรถบรรทุกขนาดใหญ่ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งได้มีการติดตั้งระบบ นำอากาศเข้ามาในระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 พบว่าต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และพื้นที่ในการบรรจุแบตเตอรี่จำนวนมาก (Wade *et al.*, 1981, 1983; Ludecke and Demick, 1983; Niura *et al.*, 1986)



ภาพที่ 18 แสดงตำแหน่งเครื่องทำความร้อนที่ใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

หมายเหตุ: B คือเครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า, E คือเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Locker et al. (2004)

ในปัจจุบันเครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพ การทำงานสูงขึ้น โดยนำมาใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Diesel Particulars Filter (DPF) ในรถบรรทุกเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (เครื่องยนต์ดีเซล) ขนาดเล็ก และพัฒนา วิธีการทำงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ได้อย่างรวดเร็ว (Golben, 1997; Locker et al., 2004) แต่อุปกรณ์ที่นำมาใช้มีค่าใช้จ่ายสูง อายุการใช้งานน้อยและมีข้อจำกัดในการใช้งาน หลายประการ

หัวเผา (Fuel Burner) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 19 เป็นอุปกรณ์ที่นำมาประชุกต์ใช้ในการเพิ่ม อุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของ เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยนำมาใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ NOx Absorber Catalyst (NAC) และ Diesel Particulars Filter (DPF) ในรถเครื่องยนต์ดีเซล (Webb *et al.*, 2004)

## สิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ซึ่งติดตั้งที่บริเวณทางเข้า DPF พบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ได้อย่าง รวดเร็วทุกสภาวะของความเร็วรอบและภาระการทำงานของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาใน การออกแบบระบบหัวเผา ระบบควบคุมการทำงาน ระบบการนำอากาศเข้ามาเพื่อให้เกิดเปลวไฟคงที่ การกำจัดเขม่าที่เกิดจากเปลวไฟและพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์หัวเผา (Wirojsakunchai *et al.*, 2007)



ภาพที่ 19 แสดงตำแหน่งหัวเผาใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ทีมา: Wirojsakunchai et al. (2007)

นอกจากนี้หัวเผาต้องออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อสามารถใช้เชื้อเพลิงปริมาณมากและ ระบบนำอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อสามารถทำให้เปลวไฟคงที่ (Zelenka *et al.*, 2002) นอกจากนี้ได้พัฒนาหัวเผาพลาสมา (Plasma Burner) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ อิเล็กตรอนไปกระตุ้น สารประกอบในไอเสีย เพื่อเปลี่ยน  $CH_4$  และ  $O_2$  เป็นก๊าซชนิดอื่นเช่น น้ำ ( $H_2O$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ออกไซด์ (OH) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ฯลฯ (Liu *et al.*, 1999; Sreethawong *et al.*, 2007) คุณสมบัติที่ดีของหัวเผาพลาสมาคือสามารถใช้ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเล็กน้อยในการเผาไหม้ ทำให้เกิดเปลวไฟคงที่ ในปัจจุบันประสิทธิภาพของหัวเผาพลาสมาถูกพัฒนาให้สามารถเพิ่ม อุณหภูมิให้ถึง Light off temperature ได้อย่างรวดเร็วทุกสภาวะของความเร็วรอบและภาระการ ทำงานของเครื่องยนต์ (Costa *et al.*, 2008; Chen, 2009; Lee *et al.*, 2009) ไมโครเวฟ (Microwave) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 20 เป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการให้ ความร้อน โดยติดตั้งอุปกรณ์ให้กำเนิดกลื่นไมโครเวฟในระบบไอเสีย ซึ่งกลื่นไมโครเวฟจะกระจาย อยู่ในแผ่นกรอง (Filter) เพื่อกระตุ้นโมเลกุลน้ำในไอเสียทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แล้วเผาไหม้เขม่าที่ถูก ดักไว้ในแผ่นกรองของ DPF ได้รวดเร็ว และพบว่าไมโครเวฟเป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิสูง กว่าวิธีการเพิ่มอุณหภูมิกับ DPF แบบอื่น (Garner *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 1992)



ภาพที่ 20 แสดงตำแหน่งใมโครเวฟใช้ร่วมกับระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Palma (2007)

นอกจากนี้ได้พัฒนาสารเร่งปฏิกิริยาเคมีใน DPF ที่สามารถใช้ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดย ใช้วัสดุ Quartz glass ที่อยู่ภายในจะไม่ดูดซึมคลื่นไมโครเวฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เขม่า (Ciambelli *et al.*, 2003; Palma, 2007) นอกจากนี้พบว่าคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการ เปลี่ยน CH<sub>4</sub> ให้เป็น CO สูงโดยใช้เม็ดคาร์บอนเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมี แต่อย่างไรก็ตามพบว่า อุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟถูกออกแบบอย่างซับซ้อนและมีราคาสูงมาก (Dominguez *et al.*, 2007)

ระบบที่สอง Passive Systems เป็นการออกแบบระบบการทำงานของไอเสียที่สามารถใช้ ร่วมกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึง Light off temperature อย่างรวคเร็ว โดยใช้วิธี Reverse flow, Post fuel Injection, และ Raw fuel Injection ซึ่ง จะอธิบายดังนี้

วิธี Reverse flow หรือวิธีการนำไอเสียไหลไปข้างหน้าและย้อนกลับในเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC เพื่อกักเก็บปริมาณความร้อนในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

นานที่สุด ทำให้สามารถถึง Light off temperature และรักษาอุณหภูมิให้นานขึ้น เพื่อให้สารไอเสีย สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตลอคเวลาได้แสดงวิธีการไว้ดัง ภาพที่ 21 การนำก๊าซไอเสียไหลไปข้างหน้าและย้อนกลับ 1 ครั้งกิดเป็น 1 รอบการทำงานของวิธี Reverse Flow ถ้าใช้เวลาการใหลไปข้างหน้าเท่ากับการใหลไปข้างหลังจะเป็นการใหลแบบ ้สมมาตร แต่ถ้าใช้เวลาการไหลไปข้างหน้าไม่เท่ากับการไหลไปข้างหลังจะเป็นการไหลแบบไม่ สมมาตร Liu et al. (2001) กล่าวว่าการทำงานในช่วงภาระต่ำของเครื่องยนต์คีเซลเชื้อเพลิงร่วม พบว่าถึงแม้ว่าได้มีการนำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีสารพาเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ พบว่าไอเสียมีอุณหภูมิต่ำเกินไปซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาต่ำ จึงมีการนำวิชี Reverse Flow มาใช้ พบว่าที่ภาระต่ำสามารถเพิ่มอุณหภูมิใน ้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้มากกว่าในช่วงภาระอื่นเนื่องจากมีปริมาณ CH4 และ CO มากกว่าในช่วงภาระอื่น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความถี่ของการทำงานพบว่าอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอ ้เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลคลงเนื่องจาก CH₄ และ CO มีเวลาในการทำปฏิกิริยาได้น้อยลง นอกจากนี้เมื่อ เพิ่มอุณหภูมิของก๊าซไอเสียพบว่าอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้นเนื่องจาก  ${
m CH}_4$ และ CO สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ต่อมา Salomons et al. (2004) กล่าวว่าความเข้มข้นของ  $\mathrm{CH}_4$  และความเร็วของการ ใหลมีผลต่อการทำงานของเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Reverse Flow ซึ่งมีสารพาเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ความเข้มข้นของ CH4 มากและ ้ความเร็วในการไหลต่ำสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงกว่าที่ความเข้มข้นของ CH, น้อยและความเร็วใน การใหลสูง เนื่องจากที่ปริมาณความเข้มข้นของมี CH, มากสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่าที่ปริมาณ ้ความเข้มข้นของมี CH, น้อย และที่ความเร็วต่ำจะมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน น้อยกว่าที่ความเร็วสูง Graham et al. (2006) ได้มีการนำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC และ DPF มาใช้ร่วมกับวิธี Reverse Flow พบว่าถึงแม้ว่าสามารถทำให้อุณหภูมิใน DPF ถึง Light off temperature และเผาใหม้เขม่าได้ตลอดเวลา แต่พบว่าวิธี Reverse Flow มีการทำงานที่ซับซ้อนยาก ต่อการควบคุม ราคาแพงและอายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้น



ภาพที่ 21 แสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้วิธี Reverse Flow

#### ทีมา: Salomons et al. (2004)

วิธี Post-Fuel Injection หรือวิธีการฉีดเชื้อเพลิงหลังการฉีดเชื้อเพลิงหลักในช่วงวาล์วไอ เสียเปิดเพื่อเพิ่มปริมาณ THC ในการทำปฏิกิริยาทางเกมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น ในปัจจุบันระบบ Common rail ของเครื่องยนต์จุคระเบิดค้วยการอัด สามารถฉีดเชื้อเพลิงได้ทุกดำแหน่งองสาของเพลาข้อเหวี่ยง และระบบควบคุมการทำงานทางไฟฟ้า ของรถยนต์ (ECU) สามารถฉีดเชื้อเพลิงได้ 5 ครั้งต่อ 1 รอบการ นอกจากนี้พบว่าถ้าฉีดเชื้อเพลิง หลังการฉีดเชื้อเพลิงหลักเร็วเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาจะถูกเผาไหม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิไอเสีย สูงขึ้นเล็กน้อยและความดันยังผลเฉลี่ย (IMEP) ของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น แต่ถ้าฉีดเชื้อเพลิงหลังการ ฉีดเชื้อเพลิงหลักช้าเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาจะถูกเผาไหม้เล็กน้อยและเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อุณหภูมิในไอเสีย เพิ่มขึ้น และความดันยังผลเฉลี่ย (IMEP) ของเครื่องยนต์ลดลง ดังนั้นการฉีดเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อุณหภูมิในไอเสีย เพิ่มขึ้น และความดันยังผลเฉลี่ย (IMEP) ของเครื่องยนต์ลดลง ดังนั้นการฉีดเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อุณหภูมิในไอเสีย เพิ่มขึ้น และความดันยังผลเฉลี่ย (IMEP) ของเครื่องยนต์ลดลง ดังนั้นการฉีดเชื้อเพลิงทลังการฉีด เชื้อเพลิงหลักที่ดำแหน่งองสาของเพลาข้อเหวี่ยงที่เหมาะสมสามารถเพิ่มอุณหภูมิและและกวามดัน ยังผลเฉลี่ยสูงขึ้นได้แสดงจังหวะการฉีดของ Post fuel ไว้ดังภาพที่ 22 (Blakeman *et al.,* 2003; Zheng, 2006)



ภาพที่ 22 แสดงจังหวะการฉีดของ Post fuel

ทีมา: Zheng (2006)

นอกจากนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทำให้ไม่สามารถควบคุมการ เพิ่มอุณหภูมิด้วยวิธี Post fuel ให้คงที่ได้ และไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากเมื่อเทียบกับการเพิ่ม อุณหภูมิด้วยวิธีอื่นเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนและการล่าช้าของการเพิ่มอุณหภูมิเกิดขึ้น (Asad et al., 2007) ปัญหาที่สำคัญของการฉีดเชื้อเพลิงหลังการฉีดเชื้อเพลิงหลักคือน้ำมันที่ผสมมา พร้อมกับน้ำมันหล่อลื่น พบว่ามีถึงร้อยละ 10 ถึง 15 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นอันตรายต่อน้ำมันหล่อลื่น และเครื่องยนต์ (Deconninck, 2005) แต่สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้โดยการเพิ่มแรงคันการฉีด เชื้อเพลิงและฉีดเชื้อเพลิงให้เร็วขึ้น (Takiguchi, 2005)

วิชี Raw fuel injection หรือการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC เพื่อเพิ่มปริมาณ THC ในการทำปฏิกิริยาทางเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ อุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นถึง Light off temperature ของเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา

Chiew et al. (2005) กล่าวว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ทางเข้า Diesel Particulate Filter (DPF) โดย ใช้วิธี Raw fuel injection เป็นวิธีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไอเสียที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูกกว่าวิธีอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การเพิ่มอุณหภูมิแบบอื่นพบว่าวิธีนี้ใช้พลังงานน้อยกว่า ต่อมา ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ DOC โดยใช้หัวฉีดน้ำมันดีเซล (Vaporizer) ของ บริษัท ArvinMeritor ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 23 กับเครื่องยนต์ขนาด 1.9 ลิตร ที่ความเร็วรอบเครื่อง 1200 rpm และแรงบิด 60 Nm พบว่าเมื่อฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซล 8 ml/min สามารถเพิ่มอุณหภูมิ

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ของไอเสียจาก 230°C ถึง 530°C ทำให้ปริมาณ THC เพิ่มขึ้น 30 ppm และเมื่อฉีดน้ำมันดีเซล 16 ml/min สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้มากกว่า 600°C ทำให้ปริมาณ THC เพิ่มขึ้น THC 25 ppm ต่อมาได้ ทำการทดลองโดยฉีดน้ำมันดีเซล 8 ml/min โดยที่ทางเข้า DOC มีอุณหภูมิของไอเสีย 165°C, 195°C, 230°C และ 255°C ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิของไอเสีย 165°C ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิที่ ทางออก DOC สูงขึ้น รวมทั้งมีปริมาณ THC และ CO มาก ขณะที่อุณหภูมิของไอเสีย 195°C พบว่า อุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้นเล็กน้อย รวมทั้งมีปริมาณ CO ลดลง ขณะที่อุณหภูมิของไอเสีย 230°C พบว่าอุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้น รวมทั้งมีปริมาณ THC น้อยและ ไม่มีปริมาณ CO และ ้งณะที่อุณหภูมิของไอเสีย 255°C พบว่าอุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้น รวมทั้งมีปริมาณ THC น้อย มากและไม่มีปริมาณ CO ต่อมาได้ทำการทดลองโดยฉีดน้ำมันดีเซล 20 ml/min โดยที่ทางเข้า DOC ้มีอุณหภูมิของไอเสียมากกว่า 200°C พบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 650°C ได้อย่างรวคเร็วและมี ปริมาณ THC สูงช่วงแรกเนื่องจากมีน้ำมันดีเซลที่ไม่ได้ระเทยเหลืออยู่ในท่อหลังจากหยุดฉีดซึ่ง แก้ไขโดยการให้ความร้อนในท่อไอเสียหลังจากหยุดฉีดเพื่อให้น้ำมันดีเซลระเหยจนหมด รวมทั้ง ้น้ำมันดีเซลถูกฉีดมากเกินไปในช่วงเริ่มต้นของการฉีดซึ่งแก้ไขโดยการฉีดในปริมาณที่เหมาะสม ของอุณหภูมิไอเสียในช่วงนั้น นอกจากนี้ได้ทดลองการทำงานของเครื่องยนต์กับการใช้วิธี Raw fuel injection เปรียบเทียบกับวิธี Post fuel ซึ่งใช้เครื่องยนต์ขนาด 2 ถิตร โดยเพิ่มอุณหภูมิของ ไอเสียจาก 300°C ถึง 700°C และให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1200 rpm และ 2000 rpm สลับกันตลอคเวลา พบว่าวิธี Raw fuel injection เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลัง DOC เนื่องจาก การเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์น้อยกว่า รวมทั้งสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้เร็วกว่า และใช้ พลังงานน้อยกว่าวิธี Post fuel อีกด้วย นอกจากนี้ได้ทุดลองที่ความเร็วรอบและแรงบิดที่แตกต่างกัน ของเครื่องยนต์ขนาด 7.3 ลิตร พบว่าที่อัตราการใหลและอุณหภูมิที่ทางเข้า DOC สูง ถ้าฉีดละออง ฝอยน้ำมันดีเซลในปริมาณน้อยทำให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิที่ทางออก DOC ได้ ดังนั้นจะต้องฉีด ละอองฝอยน้ำมันคีเซลในปริมาณที่เหมาะสมกับอัตราการไหลและอุณหภูมิที่ทางเข้า DOC



ภาพที่ 23 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซลของระบบ Raw-Fuel Injection

ที่มา: Chiew et al. (2005)

Nakane et al. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของ DOC ใหม่และใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 16 ชั่วโมง ด้วยวิธี Raw fuel injection เพื่อนำไปใช้ร่วมกับ DPF ในเครื่องยนต์จุดระเบิด ด้วยการอัดขนาดกลางและใหญ่ซึ่งมีด้วยกัน 3 แบบ คือ แบบ A เป็นเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาที่มี Pt เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมือย่างเดียวและใช้วิธี Raw Fuel Injection แบบ B เป็นเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Pt/Pd เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีผสมและแบบ C เป็นเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี Pt/Pd เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีและใช้วิธี Raw Fuel Injection ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงวิธีการทดสอบทั้ง 3 แบบ

Catalyst	PGM type	Additive
А	Pt	W
В	Pt/Pd	w/o
С	Pt/Pd	W

ที่มา: Nakane et al. (2005)

ประเด็นแรกเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลด CO ในกรณี DOC ใหม่พบว่าแบบ A มี ประสิทธิภาพการลด CO สูงกว่าแบบ B และ C เนื่องจาก Pt สามารถเร่งการทำปฏิกิริยาของ CO ได้ ดีกว่า Pd นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในกรณี DOC ใช้งานแล้ว (หลังจากใช้งานที่ 800°C และ 16 ชั่วโมง) พบว่าแบบ C มีประสิทธิภาพการลด CO สูงกว่าแบบ A และ B เนื่องจาก Pt มีประสิทธิภาพลดลง มากกว่า Pd ต่อมาเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลด HC พบว่าแบบ C มีประสิทธิภาพการลด HC ้สูงกว่าแบบ A และ B ทั้งในกรณีของ DOC ใหม่และใช้งานแล้วเนื่องจาก Pt/Pd สามารถเร่งการทำ ้ปฏิกิริยาของ HC ได้ดีกว่า Pt รวมทั้งน้ำมันสามารถเพิ่มการทำปฏิกิริยาของ HC อีกด้วย ประเด็นเมื่อ พิจารณาแบบ A และ C โดยกำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าที่ 300°C และ 350°C เพิ่มขึ้นจนถึง 600°C พบว่าที่อุณหภูมิทางเข้า 300°C แบบ C มีการใช้น้ำมันปริมาณน้อยกว่าแบบ A ทั้งกรณี DOC ใหม่ และใช้งานแล้ว ในทางกลับกันที่อุณหภูมิทางเข้า 350°C พบว่าแบบ A มีการใช้น้ำมันปริมาณ ้น้อยกว่าแบบ C ทั้งกรณี DOC ใหม่และใช้งานแล้วคังแสคงในภาพที่ 24 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ โดยวิธี Raw fuel injection นั้นจะต้องขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้น้ำมัน สารเร่งปฏิกิริยาเคมีใน DOC และสภาวะไอเสีย การทคลองต่อมาได้กำหนดให้อุณหภูมิทางเข้า DOC ที่ 300°C โดยใช้น้ำมัน ้ปริมาณที่เท่ากัน พบว่าในกรณี DOC ใหม่มีปริมาณ THC ที่ทางออก DOC ใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิ ที่ทางออกแบบ A ต่ำกว่าแบบ C ส่วนในกรณี DOC ใช้งานแล้ว พบว่ามีปริมาณ THC ที่ทางออก DOC แบบ A มีปริมาณมากกว่าแบบ C แต่อุณหภูมิที่ทางออกแบบ A ต่ำกว่าแบบ C เนื่องจาก Pt/Pd สามารถเร่งการทำปฏิกิริยาของ HC ได้ดีกว่า Pt ส่งผลให้อุณหภูมิแบบ C สูงกว่าแบบ A ต่อมาได้ กำหนดให้มีอุณหภูมิทางเข้า DOC ที่ 250°C พบว่าส่วนใหญ่มีอุณหภูมิสูงขึ้นใกล้เคียงกันยกเว้น กรณี DOC ที่ใช้งานแล้วแบบ A ซึ่งมีอุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้นเล็กน้อยแล้วลคลงอย่างรวคเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิที่ทางเข้า DOC ต่ำเกินไปและประสิทธิภาพของ Pt ลคลง เมื่อนำ DOC ที่ทคลองนี้ มาแบ่งออกเป็น 4 ชิ้นเท่าๆกัน พบว่าส่วนใหญ่มีปริมาณการ์บอนปนอยู่ที่ชิ้นแรกและชิ้นที่สอง ยกเว้นกรณี DOC ที่ใช้งานแล้วแบบ A ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนปนอยู่ทั้ง 4 ชิ้นเนื่องจากปริมาณ ้ การ์บอนที่อยู่ใน DOC แสดงให้เห็นถึงกวามสามารถของการทำปฏิกิริยาทางเกมีใน DOC ลดลงซึ่ง สอคกล้องกับอุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้นเล็กน้อยแล้วลคลงอย่างรวคเร็ว



ภาพที่ 24 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงแบบ Raw fuel Injection เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ ให้ถึง 600°C

ทีมา: Nakane et al. (2005)

Asad et al. (2007) ได้ศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ขนาด 6 สูบ กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC และ DPF ด้วยวิธี Raw fuel injection โดยติดตั้งเครื่องทำความร้อนในท่อไอเสียขนาด 0.8 kW ก่อนถึงหัวฉีดน้ำมันและใช้หัวฉีดน้ำมัน ้เป็นหัวฉีดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่บริเวณท่อไอเสียก่อนถึง DOC 300 มิถลิเมตร และฉีดที่ความดัน 200 kPa โดยให้ความร้อนกับไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ช่วยในการระเหย และผสมกันของละอองฝอยน้ำมันดีเซลกับไอเสียดังแสดงในภาพที่ 25 นอกจากนี้ได้ศึกษา ผลกระทบของความเร็วไอเสียผ่าน DOC และ DPF ที่ภาระเดียวกันแต่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ต่างกัน โดยกำหนดความสัมพันธ์ของปริมาณการฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซล (Relative Fuel Injection Rate, RFIR) ซึ่งเป็นสัคส่วนของอัตราการฉีคละอองฝอยน้ำมันคีเซลกับอัตราการไหลของ ไอเสีย โดยทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิที่ทางออก DOC จาก 300°C ถึง 550°C ที่ความเร็วของ เครื่องยนต์ 1400 RPM และแรงบิด 37 Nm กำหนดให้มีการฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซล 3 แบบคือ แบบที่ 1 ฉีด RFIR 1.3 % แบบที่ 2 ฉีด RFIR 2.6 % ใช้เวลา 110 วินาทีแล้วฉีดแบบที่ 1 ต่อ และแบบที่ 3 ี ฉีด RFIR 3.9 % ใช้เวลา 70 วินาทีแล้วฉีดแบบที่ 1 ต่อ พบว่าแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถเพิ่ม อุณหภูมิและความเร็วมากกว่าแบบที่ 1 นอกจากนี้แบบที่ 1 ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิถึง 550°C ได้ เมื่อทคสอบการเพิ่มอุณหภูมิที่ทางออก DOC จาก 290°C ถึง 630°C ที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1800 RPM และแรงบิด 38 Nm กำหนดให้มีการฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซล 3 แบบคือ แบบที่ 1 ฉีด RFIR 1.5% แบบที่ 2 ฉีด RFIR 2.6% ใช้เวลา 50 วินาทีแล้วฉีดแบบที่ 1 ต่อ และแบบที่ 3 ฉีด RFIR 3.6%

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ใช้เวลา 40 วินาทีแล้วฉีดแบบที่ 1 ต่อ พบว่าแบบที่ 1 แบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วใกล้เคียงกัน เมื่อสังเกตที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1800 RPM สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ มากกว่าที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1400 RPM เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงทำให้อัตราการพาความ ร้อนระหว่างสารในไอเสียและสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การใช้พลังงาน โดยวิเคราะห์จากอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ซึ่ง เป็นสัดส่วนของพลังงานที่ใช้จริงต่อพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิคังสมการที่ 18

Specific Energy Consumption = Energy consumed (KJ)/Rise in temperature ( $^{\circ}$ C) (18)

พบว่าที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1800 RPM มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะน้อยกว่าที่ กวามเร็วของเครื่องยนต์ 1400 RPM เนื่องจากที่ 1800 RPM มีปริมาณออกซิเจนในไอเสียมากกว่าที่ 1400 RPM ทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อหยุดฉีดละอองฝอย น้ำมันดีเซลพบว่าอุณหภูมิของ DOC ที่ 1800 RPM ลดลงเร็วกว่าที่ 1400 RPM เนื่องจากมีการ สูญเสียความร้อนจากการพาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณการฉีดละอองฝอยน้ำมันดีเซลมากเกินไป ทำให้มีโอกาสเกิดกระบวนการออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ใน DOC มากขึ้น ดังนั้นปริมาณของละออง ฝอยน้ำมันดีเซลและอุณหภูมิไอเสียเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ใน DOC



ภาพที่ 25 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซล เครื่องทำความร้อนและเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยา

ทีมา: Asad et al. (2007)

Wirojsakunchai et al. (2009) กล่าวว่าการจำลองการทำงานของวิธี Raw fuel injection และ ระบบฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC ในสภาวะการทำงานคงที่ (Steady state) ในเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นการลดค้นทุนทางด้านเวลาและก่าใช้จ่ายก่อนที่จะนำไปติดตั้งในรถยนต์ การพัฒนาการจำลองการทำงานร่วมกันของวิธี Raw fuel injection และระบบฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาแบบ DOC ทั้ง 2 โมเดล โดยใช้ Catalyst Brick ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่มีให้ใน โปรแกรม GT-Power ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 26 โดยโมเดลสามารถแบ่งปริมาตรการไหลได้ซึ่งแต่ละ การไหลถูกแทนด้วยเส้น 1 เส้นและใช้สมการสมดุลทางมวล โมเมนตัมและพลังงาน ในการหา ผลลัพธ์ ในการจำลอง DOC ที่เป็น Pre-Catalytic Converter นั้น กำหนดสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็น แพลทินัมอย่างเดียว ซึ่งในโปรแกรม GT-Power กำหนดมาให้โดย CO และ THC สามารถเกิด กระบวนการออกซิเดชันได้โดยไม่นำกระบวนการออกซิเดชันของ NOx และเขม่ามากำนวณเพื่อให้ ง่ายต่อการวิเคราะห์ ส่วนการจำลอง DOC ที่เป็น Main-Catalytic Converter นั้น กำหนดสารเร่ง ปฏิกิริยาเคมีเป็นอัตราส่วนแพลทินัมต่อพาเลเดียม ซึ่งจะต้องกำหนดกระบวนการออกซิเดชันของ CH, เพิ่มในโปรแกรม GT-Power โดย CO THC และ CH, สามารถเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้





ทีมา: Wirojsakunchai et al. (2009)

#### 43

ผลจากการศึกษาผลกระทบของการฉีดแบบ Raw fuel injection กับอุณหภูมิไอเสียและ ประสิทธิภาพของการถด CH₄ โดยกำหนดสภาวะเครื่องยนต์ A มีความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที และอุณหภูมิไอเสีย 240°C และสภาวะเครื่องยนต์ B มีความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิไอเสีย 253°C พบว่าเมื่อฉีดแบบ Raw-Fuel Injection โดยมีปริมาณการฉีด 7.5% ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่ทางออกของ Pre-Catalytic Converter และ Main-Catalytic Converter ใด้ทั้งสภาวะเครื่องยนต์ A และ B ใด้ เนื่องจากปฏิกิริยาคายความ ร้อนของกระบวนการออกซิเคชัน และการให้อุณหภูมิที่ทางออกของ Pre-Catalytic Converter มี อุณหภูมิสูงและคงที่จะต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงจำนวนมาก ต่อมาเมื่อศึกษาประสิทธิภาพของการลด CH4 พบว่าสภาวะเครื่องยนต์แบบ B มีประสิทธิภาพของการลด CH4 มากกว่าแบบ A 10% ของการ ลดปริมาณ CH4 ทั้งหมด เนื่องจากปริมาณก้าซออกซิเจนของสภาวะเครื่องยนต์แบบ B มากกว่าแบบ A 6% ของปริมาณก๊าซไอเสียทั้งหมด นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการฉีด 7.5%, 15%, และ 30% ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด พบว่าการฉีดทั้ง 3 แบบ สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีประสิทธิภาพของการลด  ${
m CH}_4$ สูงสุดที่ 80% ของการลดปริมาณ  ${
m CH}_4$ ทั้งหมดเนื่องจากข้อจำกัดของโมเคลในกระบวนการออกซิเคชันกับ CH, เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 600°C นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบของรูปแบบการฉีดโดยทำการทดสอบกับสภาวะเครื่องยนต์แบบ A ตารางที่ 3 พบว่าการฉีดแบบ B มีประสิทธิภาพของการลด CH4 60% เมื่อเทียบกับการฉีดแบบ A และการฉีดแบบ D สามารถรักษาอุณหภูมิใกล้เคียงกับการฉีดแบบ A ที่สุด เนื่องจากการฉีดแบบ D ี้มีการหยุดฉีดน้อยกว่าทำให้สูญเสียความร้อนน้อยกว่าการฉีดแบบ B และ C ซึ่งความถี่ในการฉีด แบบ Raw fuel เหมือนกับความถี่ในการบังคับทิศการ ใหลเข้าของเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา แบบ Reverse Flow

Cycle	Injection Duration	Deactivation Duration
	(min)	(min)
A (Single Pulse)	2	0
B (Multiple Pulse)	0.3	0.1
C (Multiple Pulse)	0.3	0.01
D (Multiple Pulse)	0.03	0.01

ตารางที่ 3 แสดงลักษณะการฉีดทั้ง 4 แบบ

ที่มา: Wirojsakunchai et al. (2009)

## ลิขสิทปิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

นอกจากนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ Substrate ของ Pre-Catalytic Converter พบว่าการออกแบบทางกายภาพที่เหมาะสมของ Substrate คือแบบรังผึ้ง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของ รูปทรงเรขาคณิตและพื้นที่เปิดค้านหน้ามาก ต่อมาได้ศึกษา Pre-Catalytic Converter ที่มีปริมาตร Substrate และความหนาของผนังเท่ากันโดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างและจำนวนช่องของเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาและฉีดปริมาณเชื้อเพลิงของวิธี Raw fuel injection ที่เท่ากัน พบว่าการเพิ่ม จำนวนช่องของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น แต่ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจทำให้วัสดุในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเสียหายได้เนื่องจาก ความทนทานเชิงกลลดลง ดังนั้นความหนาแน่นของเซลในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ เหมาะสมที่สุดคือ 600 CPSI และเมื่อเปลี่ยนรูปร่างช่องของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา พบว่า รูปสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> มากที่สุดแต่มีความดันลดมากที่สุดเนื่องจากมีเส้น รอบวงน้อยที่สุด แต่รูปหกเหลี่ยมมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> น้อยที่สุดแต่มีความดันลดน้อย ที่สุดเนื่องจากมีเส้นรอบวงมากที่สุด ดังนั้นพบว่ารูปร่างช่องของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา รูปสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากรูปสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ประมาณ 68% ซึ่งมากกว่ารูปหกเหลี่ยม และมีความดันลดต่ำกว่ารูปสามเหลี่ยม

ความคันในการฉีดด้วยวิชี Raw-Fuel Injection มีความสำคัญมาก เนื่องจากถ้าฉีดไม่มี ประสิทธิภาพน้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดออกมาแตกตัวเป็นละอองฝอย (Atomizing) ไม่ดีทำให้บริเวณ ภายในท่อไอเสียและ Substrate ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเปียกไปด้วยน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากเกิดการระเหยไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีด แต่ถ้าการฉีดมีประสิทธิภาพจะทำให้น้ำมัน ้ดีเซลที่ถูกฉีดออกมาแตกตัวเป็นฝอยและระเหยเป็นก๊าซ สามารถทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเคมี ใน DOC ได้ง่าย และพบว่าความคันในการฉีดเป็นปัจจัยหลักของการฉีดให้น้ำมันเชื้อเพลิงแตกตัว เป็นละอองฝอย นอกจากนี้การฉีดที่แรงดันต่ำจะทำให้ความเร็วของเหลวที่ฉีดพุ่งต่ำ และเกิดหยด เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่ารูของหัวฉีด มีมุมละอองฝอยเล็กและมีความยาวที่แตกเป็นละอองฝอย ้ยาวเพราะพื้นผิวของหยดเชื้อเพลิงมีแรงตึงผิวน้อยและมีความเสถียรของหยดเชื้อเพลิงมาก เมื่อเพิ่ม แรงคันให้สูงขึ้นจะทำให้ความเร็วของเหลวที่ฉีดพุ่งสูงขึ้น และเกิดหยดเชื้อเพลิงที่มีขนาคเท่ารู ้หัวฉีด มีมุมละอองฝอยใหญ่ขึ้นและมีความยาวที่แตกเป็นละอองฝอยสั้นลงเพราะพื้นผิวของหยด เชื้อเพลิงมีแรงตึงผิวมากขึ้นและมีความเสถียรของหยดเชื้อเพลิงน้อยลง และเมื่อเพิ่มแรงคันให้สูง ้มากขึ้นจะทำให้ความเร็วของเหลวที่ฉีดพุ่งสูงมากขึ้น จะเกิดหยดเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่ารูหัวฉีด ้มีมุมละอองฝอยมากและมีความยาวที่แตกเป็นละอองฝอยสั้นเพราะพื้นผิวของหยดเชื้อเพลิงมีแรง ์ ตึงผิวมากและมีความเสถียรของหยดเชื้อเพลิงน้อย และเมื่อเพิ่มแรงคันให้สูงขึ้นไปอีกจะเกิดการ แตกตัวของหยดเชื้อเพลิงก่อนออกจากหัวฉีด ทำให้หยดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กมากและไม่มีความยาว ที่แตกเป็นละอองฝอยเกิดขึ้น และการชนกันระหว่างเชื้อเพลิงกับก๊าซภายนอกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำ ให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย (Heywood *et al.*, 1988)

Hilden et al. (2006) ได้ติดตั้งแผ่นความร้อนในท่อไอเสีย บริเวณที่น้ำมันดีเซลถูกฉีด ออกมาของวิธี Raw fuel injection เพื่อช่วยให้น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดจากหัวฉีดความคันต่ำในสามารถ ระเหยได้ดีขึ้นแสดงไว้ดังภาพที่ 27 โดยใช้ร่วมกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่เป็น DOC และ DPF พบว่าสามารถฉีดน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิและความดันต่ำได้ เนื่องจากสามารถเพิ่มการคลุกเคล้า และการแตกเป็นละอองฝอยของน้ำมันดีเซลก่อนเข้า DOC มากขึ้น



ภาพที่ 27 แสดงอุปกรณ์วิธี Raw fuel injection และแผ่นความร้อน

ที่มา: Hilden et al. (2006)

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลด CH<sub>4</sub> จาก เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่าปัจจัย ที่สำคัญได้แก่ ปริมาณการฉีดน้ำมัน, คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของไอเสีย, อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, ความเข้มข้นขององค์ประกอบ ของก๊าซไอเสีย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจเอกสารมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบร่วมกับ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ด้วย วิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### อุปกรณ์

ในหัวข้อนี้บรรยายถึงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (วิธี Raw fuel injection) และเครื่องมือวัดต่างๆดังนี้

#### 1. เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ในการศึกษาปัจจัยของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub> ของเครื่องฟอกเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้ร่วมกับวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องยนต์ TOYOTA 2KD-FTV เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด 4 จังหวะ ฉีดน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ขนาด 2.5 ลิตร 4 กระบอกสูบแถวเรียง แบบมีเทอร์โบชาร์จ (หรือ เรียกว่าเครื่องยนต์ TOYOTA D4D) รายละเอียดของเครื่องยนต์ถูกกำหนดไว้ตามตารางที่ 4 ซึ่งถูก ดิดตั้งในรถ TOYOTA รุ่น Hilux, Fortuner, Innova, Hiace, และ 4Runner ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2001 ซึ่งเป็น รถที่นิยมมากในประเทศไทย เครื่องยนต์ดังกล่าวได้ถูกคัดแปลงให้เป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิง ร่วมโดยติดตั้งหัวฉีด CNG ที่ทางเข้าท่อไอดี เพื่อฉีดก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) และมีมุมการเปิดวาล์วไอเสีย 19°C ก่อนศูนย์ตายบน ควบคุมจังหวะและปริมาณการฉีด น้ำมันดีเซลรวมทั้งปริมาณก๊าซธรรมชาติอัดโดยโปรแกรม LapVIEW<sup>™</sup> 8.5 ความดันในกระบอก สูบถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดแรงดัน Kistler Pressure Transducer ซึ่งทำงานร่วมกับชุดอุปกรณ์กวบคุม กำสั่งของ National Instrument นอกจากนี้ AVL PUMA Open test bed รุ่น V 1.4 System และ EMCON รุ่น P400 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานและอุปกรณ์รับกำสั่งของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วมตามลำดับ (Aroonsrisopon *et al.*, 2009; Wannatong *et al.*, 2004, 2009)

#### ตารางที่ 4 รายละเอียดเครื่องยนต์ TOYOTA 2KD-FTV

รายการ	รายละเอียด
Engine type:	2KD-FTV
Number of cylinders:	4 cylinders, inline arrangement
Number of valves:	16 valves (DOHC)
Combustion chamber:	Direct Injection
Manifold:	Cross-flow with turbocharger
Fuel system:	Common rail
Displacement volume:	2,494 cc
Bore:	92 mm
Stroke:	93.8 mm
Connecting rod:	158.5 mm
Compression ratio:	18.5:1

#### 2. วิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

วิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นระบบที่ใช้ในการลดปริมาณ มลพิษในไอเสีย ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบย่อยคือระบบฟอกไอเสีย (After treatment system) และ ระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Raw fuel injection system) โดยจะ อธิบายดังนี้

# 2.1 ระบบฟอกไอเสีย

การติดตั้งระบบ After treatment แสดงไว้ดังภาพที่ 28 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ตัว และท่อไอเสียงนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm. โดยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาตัวแรกมีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและฟอกไอเสียเรียกว่า PRE-CAT (ตำแหน่ง b) ซึ่งถูกติดตั้งต่อ จากหน้าแปลนรองรับหัวฉีดระบบฉีดน้ำมันของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยา (ตำแหน่ง a) ส่วนเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตัวที่สองเรียกว่า MAIN-CAT (ตำแหน่ง c) ซึ่งถูกติดตั้งต่อจาก PRE-CAT ต่อมาได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงคัน (T) และอุณหภูมิ (P) บริเวณหลัง เทอร์โบชาร์จ (T1 และ P1 ตำแหน่ง d) PRE-CAT (T2 และ P2 ตำแหน่ง e) และ MAIN-CAT

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

(T3 และ P3 ตำแหน่ง f) ตามลำดับ รวมทั้งพันฉนวนกันความร้อนทั้งหมดของระบบฟอก ไอเสีย เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ โดยระยะตำแหน่งของอุปกรณ์แสดง ไว้ตารางผนวกที่ 4



ภาพที่ 28 แสดงการติดตั้งระบบไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

2.2 ระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแสดงไว้ดังภาพที่ 29 สามารถ ปรับแรงดันจากวาล์วควบคุมความดัน (ตำแหน่ง f) โดยมีมาตรวัดความดัน (ตำแหน่ง g) และ เกรื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำมันดีเซล Thermo Couple Type K (ตำแหน่ง c) เป็นอุปกรณ์บอกความดัน และอุณหภูมิในระบบ ระบบฉีด Raw fuel เพิ่มความดันในระบบ โดยปั้มเชื้อเพลิง (ตำแหน่ง a) ซึ่ง จ่ายไฟจาก Power Supply และใช้โปรแกรม LapVIEW<sup>™</sup> 8.5 สั่งการทำงานของระบบฉีด Raw fuel โดยหัวฉีดน้ำมัน (ตำแหน่ง d) ซึ่งติดตั้งไว้ที่หน้าแปลนรองรับหัวฉีด (ตำแหน่ง e) และระยะ ตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันแสดงไว้ตารางผนวกที่ 4 โดยหัวฉีดน้ำมันที่ใช้เป็นหัวฉีดของน้ำมัน เบนซินเนื่องจากใช้แรงดันในการฉีดต่ำเพียง 2-5 bar ซึ่งต่ำกว่าแรงดันที่ใช้ในหัวฉีดของน้ำมัน เอลที่ใช้แรงดันมากกว่า 1,600 bar รวมทั้งหัวฉีดของน้ำมันเบนซินมีขนาดเล็กกว่าหัวฉีดของน้ำมัน ดีเซลทำให้สามารถติดตั้งหัวฉีดที่บริเวณภายในหน้ากระโปรงรถได้ นอกจากนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน (ตำแหน่ง b) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบโดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ



ภาพที่ 29 แสดงวงจรของระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาและระบบ ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

รายละเอียคอุปกรณ์ของระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

1. ปั้มเชื้อเพลิง (Fuel Pump) ของ BOSCH กำลังไฟฟ้า 15 W และแรงคันไฟฟ้า 220 V

2. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

3. เกรื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำมันดีเซล Thermo Couple Type K

4. หัวฉีดน้ำมัน (Injector) ระบบ PGM-FI ของรถจักรยานยนต์ HONDA WAVE 125-I แสดงไว้ในภาพที่ 30

5. หน้าแปลนรองรับหัวฉีด (Adapter Flange) แสดงไว้ในภาพที่ 31

6. วาล์วกวบกุมกวามคัน (Globe Valve)

7. มาตรวัดความดัน (Pressure Gauge)

8. ท่อเหล็ก (Pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

## ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

- 9. ท่อถักสแตนเลส (Flexible Tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร
- 10. ท่อน้ำมันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร
- 11. ระบบควบคุมทางไฟฟ้า (Electrical Control System)



ภาพที่ 30 ภาพถ่ายหัวฉีดน้ำมันระบบ PGM-FI (ซ้าย) และภาพวาดตัดขวางหัวฉีดน้ำมันระบบ PGM-FI (ขวา) ของรถจักรยานยนต์ HONDA WAVE 125-I



ที่มา: Wirojsakunchai (2009)

ภาพที่ 31 ภาพเขียนหน้าแปลนรองรับหัวฉีดของระบบการฉีดน้ำมันของวิธี Raw fuel injection

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

#### 3. อุปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสีย

3.1 Exhaust gas dilution system

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR แสดงไว้ดังภาพที่ 32 (สามารถวัดจากไอเสียโดยตรงหรือแบบ CVS-diluted จากไอเสีย) เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ เหมาะสมในการวัดมลพิษหลักของไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ซึ่งมี NOx CO THC และ CH<sub>4</sub> เนื่องจากสามารถวัดได้ทั้ง THC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO/ NOx, HC, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, และ EGR-CO<sub>2</sub> โดยข้อมูลดังแสดงตารางผนวกที่ 5 แต่อุปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR มีช่องของ Sample Line เพียง 1 ช่องจึงจำเป็นต้องต่อวาล์ว 3 ทางเพื่อใช้ในการ วัดทั้ง 3 จุดแสดงไว้ดังภาพที่ 32 โดยระยะตำแหน่งของ Sample Line (E1 E2 และ E3) แสดงไว้ ตารางผนวกที่ 4



ภาพที่ 32 แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100DEGR และวงจร ของสาย Sampling Line

**ที่มา**: Horiba (2010)

#### 3.2 Particulate matter measurement

Opacimeter 439 เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือวัดมลพิษอนุภาคโดยวัดความหนาแน่นของ แสงตามวิธีการของ Beer-Lambert ซึ่งสามารถหาปริมาณของมลพิษอนุภาคโดยใช้ความสัมพันธ์ ของ Opacity และ FSN [AVL (2005)] นอกจากนี้ Opacimeter 439 เหมาะสมในการวัดมลพิษ อนุภาคของไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เนื่องจากสามารถวัดได้ทั้ง Black smoke (C), Blue smoke (HC) และ White smoke (H<sub>2</sub>O) ได้ แสดงไว้ดังภาพที่ 33 โดยระยะตำแหน่งของ Sample Line (S1 และ S2) แสดงไว้ตารางผนวกที่ 4



ภาพที่ 33 แสดงการติดตั้งที่ท่อไอเสียของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดของ Opacimeter 439

ที่มา: AVL (2005)

#### 4. รายละเอียดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ระบบฟอกไอเสียนั้นประกอบไปด้วยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ตัว เรียกว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ซึ่ง PRE-CAT เป็นอุปกรณ์ในการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> จากไอเสียและเพิ่ม อุณหภูมิ ส่วน MAIN-CAT เป็นอุปกรณ์ในการลดปริมาณ CH<sub>4</sub> จากไอเสีย ในการทดลองนี้จะใช้ เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ Original Equipment Manufacturing (OEM) และ Ordegg (OD) ส่วนของ MAIN-CAT จะใช้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ Johnson Matthey (JM) เพื่อ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลของการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ PRE-CAT อันเดิม (OEM) และอันใหม่ (OD) ซึ่งทั้งคู่นั้นมีความหนาแน่นของเซลในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

## ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

เท่ากัน และมี Substrate เป็นแบบ Honeycomb เหมือนกัน แต่ OEM มีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็น แพลทินัมทั้งหมด และ OD มีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นแพลเลเดียมทั้งหมดเนื่องจากต้องการเพิ่ม อุณหภูมิในช่วงของ Transient [Persson et al. (2006)] ส่วนความหนาของ Substrate ปริมาตรของ DOC และปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน ส่วน MAIN-CAT นั้นมีปริมาตรของ Substrate มากที่สุดและมีสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นแพลทินัมและแพลเลเดียมผสมกันอยู่ในอัตราส่วน 1:5 เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีเมื่อมีน้ำและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำให้มีอายุการใช้งานนานขึ้น [Yamamoto and Uchida (1998); Gelin et al. (2003); Lapisardi et al. (2006)] โดยรายละเอียดแสดง ไว้ในตารางที่ 5

Parameter	PRE-CAT		MAIN-CAT		
Designation	OEM	OD	JM		
Cell Density (CPSI)	400	400	400		
Cell shape	square	square	square		
wall thickness (mm)	0.12	0.1651	0.1524		
wall thickness (mil)	4.7	6.5	6		
Length (mm)	150	105	152.4		
Diameter (mm)	129	143.8	143.8		
Substrate Volume (liter)	1.96	1.7	2.48		
Pt:Pd	1:0	0:1	1:5		
PGM Loading (g/ft <sup>3</sup> )	14	200	241		
	V. Q V				
วิธีการ					

ตารางที่ 5 รายละเอียดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ OEM, OD, และ JM

#### 1. สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

การทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle (NEDC) แสดงไว้ในภาพ ที่ 34 เป็นมาตรฐานการวัดปริมาณไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในซึ่งมีทั้งหมด 13 cycle ต่อ 1 รอบการทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบของรถยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมบน Chassis dynamometer ้จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. พบว่ามีความคันยังผลเฉลี่ย (IMEP) ส่วนใหญ่ประมาณ 2 ถึง
5 bar (แสดงไว้ในภาพที่ 35A) ซึ่งเป็นการทำงานของเครื่องยนต์ในช่วงภาระปานกลาง (Wannatong et al., 2009) และความเร็วของเครื่องยนต์ 1,900 rpm และ 2,400 rpm เป็นความเร็วของเครื่องยนต์ ในช่วงภาระปานกลางที่ถูกใช้งานมากที่สุดและรองลงมาตามลำดับดัง (แสดงไว้ในภาพที่ 35B) รวมทั้งอุณหภูมิใอเสียออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C จากข้อมูลของ การทดสอบพบว่าที่ Lambda 1.7 (แสดงไว้ในสมการที่ 19) เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เมื่อกำหนดอัตราส่วนการใช้พลังงาน CH<sub>4</sub> ต่อพลังงานทั้งหมด (Energy Ratio) ประมาณ 70% (แสดงไว้ในสมการที่ 20) ซึ่งเป็นอัตราส่วนการใช้พลังงาน CH<sub>4</sub> ต่อพลังงานทั้งหมด ของงานวิจัยนี้



ภาพที่ 34 แสดงการทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC) ของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2553)





ภาพที่ 35 แสดงจำนวนของความคันยังผลเฉลี่ย (35A) และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (35B) การทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC)

$$\lambda = \frac{(m_A)/(m_g + m_D)}{(A/F)_s}$$

m<sub>A</sub> คือ ปริมาณการใช้ของอากาศ (kg/hr)
m<sub>g</sub> คือ ปริมาณการใช้ของก๊าซธรรมชาติ (kg/hr)
m<sub>D</sub> คือ ปริมาณการใช้ของน้ำมันดีเซล (kg/hr)
(A/F)<sub>s</sub> ≈ 12.4 คำนวณจาก Turns *et al.* (2002)

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์มาประยุกต์ใช้ในการทดสอบ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณ CH4 ด้วยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยออกแบบการทดลองไว้ดังแสดงในตารางที่ 6

56

(19)

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษยรศาสยร์

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
Engine Speed (rpm)	2400	2400	2400	1900	1900	1900	1900	1900
Lambda	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	2.1	1.3
Temp Exh. (°C)	230	290	230	230	200	170	230	230
PRE-CAT	OEM	OEM	OD	OD	OD	OD	OD	OD
MAIN-CAT	JM	JM	JM	JM	ЛМ	JM	JM	ЈМ

ตารางที่ 6 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมของ Mode 1 ถึง 8

ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิง ร่วมของ Mode 1 ถึง 8 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH4 ดังต่อไปนี้

 1.1 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ได้ ทดสอบที่สภาวะการทำงานใน Mode 1 แล้วฉีดน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time กำหนดให้

1.1.1 ตัวแปรอิสระคือ ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

1.1.2 ตัวแปรตามคือ อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของ การลด CH4

 1.1.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และ MAIN-CAT, ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, Lambda

 1.2 ผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ ได้ทคสอบที่สภาวะการ ทำงานใน Mode 2 แล้วฉีคน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time เพื่อเปรียบเทียบกับ Mode 1

1.2.1 ตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, ปริมาณมลพิษในไอเสียที่
ออกจากเครื่องยนต์

## ลิขสิทฮิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

1.2.2 ตัวแปรตามคือ อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของ การลด CH4

 1.2.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และ MAIN-CAT, ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์, Lambda

1.3 ผลกระทบเนื่องจากคุณลักษณะของ PRE-CAT ได้ทดสอบที่สภาวะการทำงานใน
Mode 3 แล้วฉีดน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time เพื่อเปรียบเทียบกับ Mode 1

1.3.1 ตัวแปรอิสระคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT

1.3.2 ตัวแปรตามคือ ประสิทธิภาพของการลด CH4 ของ PRE-CAT

 1.3.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ MAIN-CAT, ปริมาณ การฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, อุณหภูมิ ใอเสีย ออกจากเครื่องยนต์, Lambda

1.4 ผลกระทบเนื่องจากความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ได้ทดสอบที่สภาวะการทำงานใน
Mode 4 แล้วฉิดน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time เพื่อเปรียบเทียบกับ Mode 3

1.4.1 ตัวแปรอิสระคือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, ปริมาณมลพิษในไอเสียที่ออก จากเครื่องยนต์

1.4.2 ตัวแปรตามคือ อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub>

1.4.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และMAIN-CAT, ปริมาณการฉีดน้ำมัน, อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, Lambda

 1.5 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ ได้ทดสอบที่สภาวะการทำงาน ใน Mode 5 และ Mode 6 แล้วฉีดน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time เพื่อเปรียบเทียบกับ Mode 4

 1.5.1 ตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิไอเสียออกจากไอเสียออกจากเครื่องยนต์, ปริมาณ มลพิษในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์

1.5.2 ตัวแปรตามคือ อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub>

 1.5.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และ MAIN-CAT, ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์, Lambda

1.6 ผลกระทบเนื่องจาก Lambda ใด้ทคสอบที่สภาวะการทำงานใน Mode 7 และ Mode 8 แล้วฉีคน้ำมันที่ 5%, 10%, และ 15% duration time เพื่อเปรียบเทียบกับ Mode 4

1.6.1 ตัวแปรอิสระคือ Lambda, ปริมาณมลพิษในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์

1.6.2 ตัวแปรตามคือ อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT, ประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub>

 1.6.3 ตัวแปรควบคุมคือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT และ MAIN-CAT, ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์, อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์

#### 2. ลักษณะใอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

โดยทั่วไปสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันจะมีคุณลักษณะของไอเสียที่ แตกต่างกันซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวแปรอิสระในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง ความเร็วรอบ ภาระ การทำงาน และ Lambda ของเครื่องยนต์มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ ทั้งสิ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการลดมลพิษไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เมื่อ พิจารณาปริมาณมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ของ Mode 1 ถึง 8 (แสคงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) พบว่ามีปริมาณมลพิษอนุภาคน้อยยกเว้น Mode 2 เนื่องจาก Mode 2 เป็นสภาวะการทำงานที่มีอัตรา สิ้นเปลืองน้ำมัน มากกว่าทุก Mode นอกจากนี้พบว่า Mode 6 มีปริมาณ CH4 THC และ CO มาก เนื่องจากมีอุณหภูมิของการเผาใหม้ต่ำ ต่อมาพบว่า Mode 7 มีปริมาณ NOx มากเนื่องจากมีปริมาณ ก๊าซออกซิเจนมากและอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันค่อนข้างมากทำให้มีอุณหภูมิของการเผาใหม้สูงเพียง พอที่จะเกิดกระบวนการออกซิเคชันกับก๊าซในโตรเจนได้มากขึ้น [Heywood (1988)] เมื่อพิจารณา ปริมาณมลพิษที่ทางออกของ PRE-CAT ของ Mode 1 ถึง 8 พบว่าปริมาณ CH4 และ THC ไม่เกิด การเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสามารถลดปริมาณ CO ได้หมดยกเว้น Mode 1, Mode 2, เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ต่ำเกินไปทำให้ PRE-CAT มี และ Mode 6 ประสิทธิภาพของการลด CO ต่ำ เมื่อพิจารณาปริมาณมลพิษที่ทางออกของ MAIN-CAT พบว่า ้ปริมาณ CH4 และ THC ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับ PRE-CAT แต่อย่างไรก็ตามพบว่า Mode 6 ไม่สามารถลดปริมาณ CO ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก PRE-CAT ต่ำเกินไป ทำให้ MAIN-CAT ไม่สามารถลดปริมาณ CO ได้ ประเด็นต่อมาเมื่อพิจารณาถึงความดันลด (ΔP) ที่ เกิดขึ้นใน PRE-CAT (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) พบว่า PRE-CAT ที่เป็นของ OEM (Mode 1 และ Mode 2) มีความคันสดมากกว่าของ OD (Mode 3 ถึง Mode 8) เนื่องจาก PRE-CAT ที่เป็นของ OEM มีขนาคที่ยาวกว่าของ OD [Heck et al. (2002)]

	IMEP	$\Delta$ P	Emissions	$CH_4$	THC	СО	NOx	O2	PM
Mode	bar	kPa	Measurement	ppm	ppmC	ppm	ppm	%vol	mg/m <sup>3</sup>
1	1.9	1.24	Engine-Out	4514	7230	3200	8	11	
			After PRE-CAT	4040	6550	2400	10	11	0
			After MAIN-CAT	3991	5798	100	9	11	
2	5.1	3.76	Engine-Out	2904	4925	2000	35	11	
			After PRE-CAT	2853	4465	200	40	11	13
			After MAIN-CAT	2719	4199	0	37	11	
3	2.83	0.24	Engine-Out	4788	7730	3000	5	12	
			After PRE-CAT	4721	6877	0	8	12	0
			After MAIN-CAT	4479	6867	0	6	12	
4	3.15	0.2	Engine-Out	3254	5085	2000	22	11	
			After PRE-CAT	3288	4713	0	27	11	0
			After MAIN-CAT	3240	4487	0	24	11	
5	2.48	0.16	Engine-Out	5253	8024	5500	3	12	
			After PRE-CAT	5284	7151	0	4	12	0
			After MAIN-CAT	5146	6539	0	4	12	
6	2.85	0.19	Engine-Out	8221	15324	9000	5	12	
			After PRE-CAT	7790	14478	8800	6	12	0
			After MAIN-CAT	7699	13851	9200	5	12	
7	2.54	0.39	Engine-Out	1669	3357	1300	75	12	
			After PRE-CAT	1699	3214	0	79	12	3
			After MAIN-CAT	1603	2987	0	66	13	
8	2.64	0.11	Engine-Out	5837	10110	2700	9	8	
			After PRE-CAT	5781	9198	0	11	8	0
			After MAIN-CAT	5423	8574	0	10	8	

ตารางที่ 7 ปริมาณมลพิษหลักของไอเสียในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

#### 3. การกำหนดปริมาณน้ำมันของระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

3.1 ระยะเวลาของการฉีด (Duration time)

จากที่กล่าวไปแล้วข้างค้นพบว่าน้ำมันดีเซลเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากปริมาณน้ำมันสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีใน เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ (Asad *et al.*, 2007; Wirojsakunchai *et al.*, 2009) แต่อย่างไร ก็ตามพบว่าปริมาณน้ำมันสามารถกำหนดได้โดยใช้การฉีดเป็น Duration time ซึ่งเป็นเวลาของ การยก Needle valve ในหัวฉีด ภาพที่ 36 ได้แสดงตัวอย่างการทำงานของหัวฉีดเมื่อกำหนดให้ 1 รอบการทำงานของหัวฉีดเท่ากับ 1000 msec พบว่าที่ความถี่ 50 Hz ทำให้ระยะเวลาของการฉีดที่ 100% เท่ากับ 20 msec ในการทดลองได้เลือกใช้ที่ 5%, 10% และ 15% duration time เป็น ตัวอย่างในการศึกษาผลกระทบเนื่องจากปริมาณน้ำมัน ดังนั้นเวลาของการยก Needle valve ใน หัวฉีดเท่ากับ 1, 2 และ 3 msec ตามลำดับ

50  Hz = 20 msec

ภาพที่ 36 แสดงตัวอย่างการฉีดน้ำมัน ที่ 10% Duration time

3.2 การฉีดเป็นละอองฝอย

การฉีดเป็นละอองฝอยมีความสำคัญมากต่อวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยาเนื่องจากต้องการให้น้ำมันดีเซลที่ฉีดออกมามีสภาวะเป็นก๊าซเพื่อสามารถเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ดี แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหัวฉีดของน้ำมันดีเซลมี ขนาดใหญ่และหนัก นอกจากนี้การฉีดน้ำมันดีเซลออกมาเพื่อให้เป็นละอองฝอยต้องใช้แรงดันสูง (มากกว่า 1600 bar) ส่งผลให้ระบบการฉีดน้ำมันของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ปฏิกิริยาต้องใช้ปั้มสร้างแรงคันและวัสดุที่สามารถทนแรงคันสูงได้ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาค่าใช้จ่ายของ ระบบสูง คังนั้นจึงเลือกใช้หัวฉีดของน้ำมันเบนซินซึ่งมีขนาดเล็กและเบา รวมทั้งใช้แรงคันต่ำ (2-5 bar) ส่งผลให้ระบบการฉีดน้ำมันของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไม่ต้องใช้ปั้ม สร้างแรงคันและวัสคุที่ทนแรงคันสูงทำให้ก่าใช้จ่ายอุปกรณ์ต่ำ ถึงแม้ว่าการเลือกใช้หัวฉีดของ น้ำมันดีเซลจะมีข้อดีคังที่กล่าวมาข้างต้น แต่รูหัวฉีดฉีดของน้ำมันเบนซินต้องการฉีดเชื้อเพลิงเป็น แบบหยดมากกว่าละอองฝอยเนื่องจากความต้องการของการเผาใหม้ภายในที่แตกต่างกัน พบว่า ขนาดรูของหัวฉีด ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง อุณหภูมิภายนอก แรงคันและความถี่ของการฉีดเป็น ปัจจัยหลักของการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอย [Heywood (1988)] แต่ขนาดรูของหัวฉีด ความ หนาแน่นของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิภายนอกเป็นปัจจัยกงที่ในการทดสอบ ดังนั้นแรงคันและ ความถิ่ของการฉีดถูกทดสอบหาสภาวะที่ทำให้น้ำมันดีเซลถูกฉีดออกมาเป็นละอองฝอย

3.2.1 การศึกษาผลกระทบการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยเนื่องจากแรงคันของการฉีด

การทดลองแรกเป็นการศึกษาผลกระทบการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยเนื่องจาก แรงดันของการฉีด ได้ทดสอบแรงดันของการฉีดที่ 4 bar, 5 bar และ 6 bar โดยกำหนดให้อุณหภูมิ ของน้ำมัน 40°C กวามถี่ 50 Hz และ Duration time 10% กงที่ทุกการทดลอง พบว่ากวามเป็นละออง ฝอยดีที่สุดคือ 6 bar, 5 bar และ 4 bar ตามลำดับแสดงไว้ในภาพที่ 37 เนื่องจากที่ 6 bar มีหยดของ น้ำมันขนาดเล็ก และมีกวามยาวที่แตกเป็นละอองฝอยสั้นที่สุด แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อฉีดที่ 6 bar และ Duration time 5% ไม่สามารถฉีดออกมาได้เนื่องจากแรงดันในหัวฉีดน้ำมันมากเกินไปทำให้ Needle Valve ในหัวฉีดไม่สามารถทำงานในช่วงเวลาสั้นได้ และแรงดัน 6 bar เป็นแรงดันที่สูงเกิน กว่าระบบการฉีดน้ำมันสามารถทนได้



ภาพที่ 37 แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันโดยฉีดที่ความดัน: 4 bar (37A), 5 bar (37B), และ 6 bar (37C)

หมายเหตุ: สถานที่การทคลองเป็นระบบเปิด

#### 63

# ลิบสิทปิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

3.2.2 การศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยเนื่องจากความถี่ของการฉีด

การทดลองต่อมาเป็นการศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอย เนื่องจากความถิ่ของการฉีด ได้ทดสอบความถิ่ของการฉีดที่ 50 Hz, 60Hz และ 70 Hz โดย กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำมัน 40°C แรงคัน 5 bar และ Duration time 10% คงที่ทุกการทดลอง พบว่าความเป็นละอองฝอยใกล้เคียงกันแสดงไว้ในภาพที่ 38 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดที่ความถี่ตั้งแต่ 60 Hz ขึ้นไปและ Duration time 5% พบว่าไม่สามารถฉีดออกมาได้เนื่องจากวาล์วแบบเข็มใน หัวฉีดทำงานเร็วมากจนไม่สามารถฉีดได้



ภาพที่ 38 แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมัน โดยฉีดที่ความถี่: 50 Hz (38A), 60 Hz (38B), และ 70 Hz (38C)

หมายเหตุ: สถานที่การทดลองเป็นระบบเปิด

3.2.3 การศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยเนื่องจากระยะเวลาของ การฉีด

การทดลองต่อมาเป็นการศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอย เนื่องจากระยะเวลาของการฉีด ได้ทดสอบที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของการฉีดโดย กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำมัน 40°C แรงดัน 5 bar และความถี่ 50 Hz คงที่ทุกการทดลอง พบว่า ระบบการฉีดน้ำมันถูกฉีดออกมาเป็นละอองฝอยทุกสภาวะ แสดงไว้ในภาพที่ 39 นอกจากนี้พบว่า 5% duration time ฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยดีที่สุดแสดงไว้ในภาพที่ 39A และ 15% duration time ฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยแย่ที่สุดแสดงไว้ดังภาพที่ 39C เนื่องจากที่ 5% duration time วาล์วแบบเข็ม ในหัวฉีดมีเวลาทำงานสั้น ทำให้มีความยาวที่แตกเป็นละอองฝอยสั้นที่สุด และที่ 15% duration time วาล์วแบบเข็มในหัวฉีดมีเวลาทำงานยาว ทำให้มีความยาวที่แตกเป็นละอองฝอยยาวที่สุด

# ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์



ภาพที่ 39 แสดงภาพถ่ายการแตกตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันโดยฉิดที่: 5% duration time (39A), 11% duration time (39B), และ 15% duration time (39C)

หมายเหตุ: สถานที่การทคลองเป็นระบบเปิด

จากผลการทคลองพบว่าการฉีดที่แรงคัน 5 bar, ความถี่ 50 Hz และอุณหภูมิ 40°C เป็น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของระบบการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เนื่องจาก สามารถฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยได้ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time

4. รายละเอียดของเชื้อเพลิง

น้ำมันดีเซล (B2) ซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์ ใดออกไซด์ 0.0283% โดยมวล, กำมะถันน้อยกว่า 0.01%โดยมวล และน้ำน้อยกว่า 0.05%โดยปริมาตร ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วมและวิธี Raw fuel injection น้ำมันดีเซล (B2) เป็นน้ำมันดีเซลที่ถูกผลิตโดยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โดยจำหน่ายวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2551 นอกจากนี้คุณสมบัติของก๊าซ ธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2) แสดงไว้ในตารางที่ 8 โดยที่ก๊าซธรรมชาติเป็นข้อมูลจาก สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 ถึงเดือน กันยายน พ.ศ. 2554 และน้ำมันดีเซล (B2) เป็นค่าที่ประมาณจากน้ำมันดีเซล (B0) และ น้ำมันดีเซล (B5) มีค่า LHV, H/C, SG อ้างอิงจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. นอกจากนี้ (A/F)<sub>,</sub> และ H/C กำนวณโดย MW (Heywood, 1988)

ITEM	Natural Gas	Diedel (B2)	Unit
LHV	34.14	42.8	MJ/kg
MW	22.198	170	kg/kmole
(A/F) <sub>s</sub>	11.711	14.5	
H/C	3.24348	1.8	
O/C	0.25589	215	
N/C	0.03533		
SG	0.77	0.83	<b>.</b>

ตารางที่ 8 รายละเอียดคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล (B2)

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

จากตารางที่ 8 สามารถคำนวณหาอัตราส่วนร้อยละของพลังงานก๊าซธรรมชาติต่อพลังงาน ที่ใช้ทั้งหมด (%Energy Ratio, %NG) แสดงไว้ในสมการที่ 20 (Wannatong *et al.*, 2009)

$${}_{\rm 6NG} = \frac{({\rm LHV}_{\rm NG} \times \Delta m_{\rm NG})}{({\rm LHV}_{\rm NG} \times m_{\rm NG}) + ({\rm LHV}_{\rm D} \times m_{\rm D})} \times 100$$

(20)

(21)

โดยที่ %NG คือ อัตราส่วนของพลังงานของ CH₄ และพลังงานเชื้อเพลิงทั้งหมด Δm<sub>NG</sub> คือ ผลต่างของปริมาณการใช้ของก๊าซธรรมชาติ (kg/h)

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) แสดงไว้ในสมการที่ 21 [Asad *et al.* (2007)]

$$SEC = \frac{Raw \text{ fuel consumptions}}{Rise \text{ in temperature}} = \frac{(LHV_D \times \Delta m_D \times \Delta t)}{\Delta T}$$

โดยที่ **SEC** คือ ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/°C)

∆T คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้วิธี Raw fuel injection (°C)

∆t คือ เวลาที่ใช้ในการฉีดทั้งหมด

# จิ่มสิ่งอิ้มตาวิทยาลัยเทษกรร่าสกร์

#### 5. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์

### 6. จัดทำรูปเล่ม

### ตารางที่ 9 ตารางการดำเนินงาน

ชื่อโครงงาน : A Study of Parameters for Methane Reduction from Diesel Dual Fuel Engines by Fuel												
Injection in front of Catalytic Converters.												
อาจารย์ที่ปรึกษ	ยา : ผู้ช่วย	ยศาสตร	าจารย์เอ	กไท วิโ	รจน์สกุล	ลชัย, Pł	n.D.		ผู้จัดทำ	: อนิรุท	าธ์ น้อยเ	พึ่ง
	อาจา	เรย์ธเนศ	' อรุณศ์	ີ່ວ ໂຕກຒ,	Ph.D.							
สถานที่ดำเนินโครงการ :				ເรີ່ມໂຄ	รงการ	: 1 เม	เษายน 2	553	9			
มหาวิทยาลัยเก	ษตรศาส	ตร์และส	าถาบันว์	ີ່າຈັຍ	สิ้นสด	โครงก	າງ : 31 ຄໍ	<u>มีนาคม</u> (	2554			
เทคโนโลยี ปต	ท. จำกัด	(มหาชเ	1)									
ขั้นตอนการ		78	7		1.00	$\mathcal{A}$						
ดำเนินงาน	ເນ.ຍ.	พ.ค.	ນີ້.ຍ.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาข้อมูล	R		J E	6	$\mathcal{O}^{(1)}$				21			
และ												
ตรวจสอบ												
เอกสาร			J.		1.						A	
2.เตรียมการ		ΞA							H		9	
ทคลองและ												
ศึกษาการใช้												
เครื่องมือ						20						
3.ຫຳຄາຮ			2					50				
ทคลองและ								9				
เก็บข้อมูล												
4.วิเคราะห์												
ข้อมูล												
5.จัดทำ												
รูปเล่ม												
วิทยานิพนธ์												

#### ผลและวิจารณ์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลด CH<sub>4</sub> จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการฉีด น้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Raw fuel injection technique) ได้กำหนดให้เครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ตัวต่ออนุกรมกันซึ่งตัวแรกเป็น PRE-CAT มีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและ ลดปริมาณ CH<sub>4</sub> จากไอเสีย ส่วนตัวที่ 2 เป็น MAIN-CAT มีหน้าที่ลดปริมาณ CH<sub>4</sub> จากไอเสีย ใน สภาวะการทำงานของ Mode 1 และ Mode 2 ได้กำหนด PRE-CAT เป็นของ OEM และ MAIN-CAT เป็นของ JM ซึ่ง Mode 1 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, และ Mode 2 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, และ Mode 2 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, และ Mode 2 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ ใอเสียออกจากเครื่องยนต์ ส่วนในสภาวะการทำงานของ Mode 3 ถึง Mode 8 ได้กำหนด PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM ซึ่ง Mode 3 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจาก คุณลักษณะของ PRE-CAT, Mode 4 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, Mode 7 และ Mode 8 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจาก Lambda ผลจากการทดลองที่สภาวะการทำงาน ของ Mode 1 ถึง Mode 8 สามารถอธิบายปัจจัยที่มีผลต่อการลด CH<sub>4</sub> ได้ดังนี้

### 1. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ใด้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2400 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออก จากเครื่องยนต์ 230°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 1) ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่มีการใช้งาน ค่อนข้างมาก กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OEM และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้เล็กน้อย (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 7) ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT ไม่ เกิดการเปลี่ยนแปลง (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 40A) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 60 วินาที) ที่ 5% duration time พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ไม่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็น 10% และ 15% duration time พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ไม่เพิ่มขึ้นเช่นกัน (แสดงไว้ในภาพที่ 40A) เนื่องจากสารแพลทินัมใน PRE-CAT มีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ได้ เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่า MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้เกือบหมด (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 7) ทำให้ อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นจาก 230°C เป็น 250°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 40B) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 420°C, 533°C และ 636°C ตามลำดับ (แสดงไว้ ในภาพที่ 40B) เนื่องจากสารแพลทินัมผสมกับพาเลเดียมมีปริมาณมากใน MAIN-CAT ส่งผลให้ สามารถเพิ่มอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 170 วินาที และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่าอุณหภูมิลดลงที่เวลา 330 วินาที เนื่องจากในขณะที่หยุดฉีด น้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น MAIN-CAT มีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่สามารถ เกิดปฏิกิริยาทางเกมีเองได้ช่วงเวลาหนึ่ง

เมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ของ MAIN-CAT โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่า มีค่า 8.39 kJ/°C และ 8.00 kJ/°C และ 7.51 kJ/°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 41) แสดงว่าที่ 15% duration time ใช้พลังงานจำเพาะในการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่าที่ 5% และ 10% duration time เนื่องจากที่ 15% duration time มีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูงกว่าที่ 5% และ 10% duration time



ภาพที่ 40 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (40A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (40B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 1





ภาพที่ 41 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ MAIN-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 1

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ PRE-CAT พบว่าการฉีด น้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ส่งผลให้ PRE-CAT ไม่สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้ (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 10) เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ไม่เพิ่มขึ้น (แสดงไว้ในภาพที่ 40A) ต่อมาเมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสีย ที่ทางออกของ MAIN-CAT พบว่าการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time ส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้ (แสดงข้อมูลไว้ใน ตารางที่ 10) เนื่องจากอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่สามารถลดปริมาณ THC และ CH<sub>4</sub> ได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 10% และ 15% duration time ทำให้ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ลดลงตามลำดับ (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 10) เนื่องจากอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูงขึ้นตามลำดับ (Wirojsakunchai *et al.*, 2009)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยพิจารณาจากปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ทางออกของ MAIN-CAT เปรียบเทียบกับที่ออกจากเครื่องยนต์ในช่วงที่ฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการ ลด CH<sub>4</sub> 14.60%, 42.68% และ 80.45% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 42A) และมีประสิทธิภาพของ การลด THC 27.67%, 50.37% และ 71.57% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 42B) ดังนั้นเมื่อฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ที่ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์ 2400 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 230°C พบว่า PRE-CAT ไม่สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ แต่อย่างไรก์

## สิบสิทบิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ตาม MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สามารถเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิที่สามารถลด CH<sub>4</sub> ได้ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิใน MAIN-CAT สูงขึ้น

	Duration	Energy	Fuel	Emissions	CH <sub>4</sub>	THC
Mode	Time	Ratio	Energy	Measurement		
	(%)	(%)	(kW)		(ppm)	(ppmC)
1	0	68	0	After PRE-CAT	4040	6550
				After MAIN-CAT	3991	5798
	5	60.36	3.98	After PRE-CAT	4379	9336
				After MAIN-CAT	3854	5229
	10	57.79	6.22	After PRE-CAT	4311	9937
				After MAIN-CAT	2587	3588
	15	54.34	8.09	After PRE-CAT	4586	10720
18		191		After MAIN-CAT	882	2055

ตารางที่ 10 ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 1





ภาพที่ 42 ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> (42A) และ THC (42B) ของระบบฟอกไอเสียที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 1

### 2. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์

ใด้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2400 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออก จากเครื่องยนต์ 290°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 2) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 1 พบว่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์และ Lambda เท่ากับ Mode 1 แต่มีอุณหภูมิไอเสียออก จากเครื่องยนต์สูงกว่า Mode 1 และมี CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ที่ออกจากเครื่องยนต์ปริมาณน้อยกว่า Mode 1 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OEM และ MAIN-CAT เป็น ของ JM เหมือน Mode 1 เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้เกือบหมด (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7)

# ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นจาก 290°C เป็น 310°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีใน ภาพที่ 43A) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 346°C, 372°C และ 399°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพ 43A) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT แตกต่างจาก Mode 1 ที่ไม่สามารถเพิ่ม อุณหภูมิได้เนื่องจากอุณหภูมิออกจากเครื่องยนต์ที่ 290°C เป็นอุณหภูมิที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทาง เกมีใน PRE-CAT ได้ และพบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 100 วินาที

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 43B) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 356°C, 408°C และ 455°C ตามลำคับ (แสดงไว้ในภาพ 43B) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ในช่วง ที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่า Mode 1 เนื่องจาก Mode 2 มีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub> และ THC ที่ออกจาก PRE-CAT น้อยกว่า Mode 1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 100 วินาที และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่า อุณหภูมิลดลงทันทีที่เวลา 300 วินาที เนื่องจากในขณะที่หยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยานั้น MAIN-CAT มีอุณหภูมิสูงไม่ถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเองได้

เมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ MAIN-CAT โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 12.86 kJ/°C, 12.98 kJ/°C, และ 12.62 kJ/°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 44) ถึงแม้ว่าที่ 15% duration time มีค่า สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดของ Mode 2 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า Mode 2 มีค่าสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะมากกว่า Mode 1 เนื่องจาก Mode 2 อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT



ภาพที่ 43 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (43A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (43B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 2





ภาพที่ 44 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ MAIN-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 2

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ทางออกของ PRE-CAT พบว่าเมื่อฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT ไม่ สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้เช่นเดียวกับ Mode 1 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 11) เนื่องจาก อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นไม่ถึงอุณหภูมิที่สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้ ต่อมาเมื่อ พิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ทางออกของ MAIN-CAT พบว่าเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถลด ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้เล็กน้อย ถึงแม้ว่า MAIN-CAT ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT มากขึ้น แต่ CO, THC, และ CH<sub>4</sub> ในไอเสียออกจาก PRE-CAT มีปริมาณน้อยส่งผลให้อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> 14.66%, 23.51 และ 23.89% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 45A) และมีประสิทธิภาพของการลด THC 24.48%, 34.32% และ 32.36% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 45B) ถึงแม้ว่าที่ 15% duration time มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงที่สุดของ Mode 2 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub> ต่ำกว่า Mode 1 เนื่องจาก Mode 2 มีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ต่ำกว่า Mode 1 ดังนั้น เมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ที่ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2400 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 290°C พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพบว่า PRE-CAT ไม่สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub>

## สิบสิทบิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ได้ เนื่องจากปริมาณ CO, CH4, และ THC ในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์น้อยส่งผลให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทำให้ประสิทธิภาพของการลด CH4 ต่ำ

	Duration	Duration Energy			CII	THO	
Mode	Time	Ratio	Energy	Emissions		IIIC	
	(%)	(%) (kW)		Measurement	(ppm)	(ppmC)	
2	0	70	0	After PRE-CAT	2853	4466	
				After MAIN-CAT	2719	4199	
	5 4	67.82	1.87	After PRE-CAT	2803	5009	
				After MAIN-CAT	2478	3916	
	10	64.26	4.48	After PRE-CAT	2711	5436	
				After MAIN-CAT	2222	3235	
	15	62.14	6.34	After PRE-CAT	2757	6572	
				After MAIN-CAT	2310	3336	

ตารางที่ 11 ปริมาณ  $CH_4$  และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 2



77





เมื่อพิจารณาวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มี PRE-CAT เป็นของ OEM และ MAIN-CAT เป็นของ JM สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สามารถเพิ่มขึ้น ได้ที่อุณหภูมิ ใอเสียออกจากเครื่องยนต์ 290°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิ ใอเสียที่ สูงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ภาระปานกลาง แต่อย่าง ไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิ ใอเสีย ออกจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ภาระปานกลางส่วน ใหญ่มีอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ (ต่ำกว่า 290°C) ดังนั้นจึงเปลี่ยน PRE-CAT เป็นของ OD เนื่องจาก OD มีปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเคมี มากกว่า OEM ส่งผลให้ OD สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิต่ำกว่า OEM ได้ (แสดงข้อมูล ไว้ในตารางที่ 5)

#### 3. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากคุณลักษณะของ PRE-CAT

ได้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องขนต์ 2400 rpm, Lambda 1.3, และอุณหภูมิของไอเสีย 230°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 3) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 1 พบว่ามี ความเร็วรอบของเครื่องขนต์, Lambda 1.3, และอุณหภูมิของไอเสียเท่ากับ Mode 1 และมีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ที่ออกจากเครื่องขนต์ใกล้เคียงกับ Mode 1 กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้หมด (แสดงข้อมูลไว้ใน ตารางที่ 7) ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นจาก 230°C เป็น 255°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 46A) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 345°C, 434°C และ 492°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 46A) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เมิปริมาณมากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีใน PRE-CAT ได้ที่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 230°C (ต่ำกว่าอุณหภูมิไอเสียออกจาก เครื่องยนต์ของ Mode 2) และพบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT มีปริมาณมากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีใน

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่หลัง PRE-CAT เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 46B) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 341°C, 478°C, และ 502°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 46B) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ในช่วงที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่า Mode 1 เนื่องจาก Mode 3 มีปริมาณ THC ที่ออกจาก PRE-CAT น้อยกว่า Mode 1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 190 วินาที และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่าอุณหภูมิ ลดลงที่เวลา 370 วินาทีซึ่งใช้เวลานานกว่า Mode 1 เนื่องจาก MAIN-CAT มีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเองได้ รวมทั้งได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT

เมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 7.30 kJ/°C, 5.22 kJ/°C และ 5.87 kJ/°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 47) แสดงว่าที่ 10% duration time ใช้พลังงานจำเพาะใน การเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่าที่ 5% และ 15% duration time เนื่องจากที่ 10% duration time มีอุณหภูมิ หลัง PRE-CAT สูงกว่าที่ 5% และ 15% duration time

## ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์



ภาพที่ 46 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (46A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (46B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 3





ภาพที่ 47 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 3

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH4 และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ PRE-CAT พบว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CH4 และ THC ได้มากขึ้น (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 12) เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สูงถึงอุณหภูมิที่สามารถลดปริมาณ CH4 และ THC ได้ นอกจากนี้การฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 10% duration time ส่งผลให้ PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CH4 ได้หมด เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สูงถึงอุณหภูมิที่สามารถ ลด CH4 ได้หมด ต่อมาเมื่อพิจารณาปริมาณ CH4 และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ MAIN-CAT พบว่าการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time ส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH4 และ THC ได้เล็กน้อย (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 12) เนื่องจากอุณหภูมิ หลัง MAIN-CAT สูงไม่เพียงพอที่สามารถลด CH4 ได้หมด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> 24.69%, 100% และ 100% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 48A) และมีประสิทธิภาพของการลด THC 31.01%, 81.87% และ 94% ตามลำดับ(แสดงไว้ในภาพที่ 48B) นอกจากนี้ที่ 10% และ 15% duration time ของ Mode 3 มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า Mode 1 เนื่องจาก Mode 3 มีคุณสมบัติ ทางกายภาพและทางเคมีของ PRE-CAT แตกต่างจาก Mode 4 ดังนั้นเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2400 rpm, Lambda 1.3, และอุณหภูมิของไอเสีย 230°C พบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub>

## สิบสิทบิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ได้เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มถึงอุณหภูมิที่สามารถลด CH₄ ได้ นอกจากนี้เมื่อเพิ่ม ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลด CH₄ มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มสูงขึ้น

Mode	Duration Time	Energy Ratio	Fuel Energy	Emissions	$\mathrm{CH}_4$	THC
	(%)	(%)	(kW)	Measurement	(ppm)	(ppmC)
3	0	74	0	After PRE-CAT	4721	6877
				After MAIN-CAT	4479	6867
	5	68.54	2.61	After PRE-CAT	4313	5792
				After MAIN-CAT	3606	5333
	10	66.1	3.86	After PRE-CAT	0	1401
				After MAIN-CAT	0	1353
	15	64.06	5.85	After PRE-CAT	0	560
				After MAIN-CAT	0	464

ตารางที่ 12 ปริมาณ  $CH_4$  และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 3





ภาพที่ 48 ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> (48A) และ THC (48B) ของระบบฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 3

### 4. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ใด้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออก จากเครื่องยนต์ 230°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 4) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 3 พบว่ามี Lambda และอุณหภูมิของไอเสียเท่ากับ Mode 3 แต่มีความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ต่ำกว่า Mode 3 และมีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ที่ออกจากเครื่องยนต์น้อยกว่า Mode 3 เล็กน้อย กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลด ปริมาณ CO ได้หมดเช่นเดียวกับ Mode 3 ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 230°C เป็น 245°C (แสดงไว้ที่

# ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 49A) สาเหตุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า Mode 3 เนื่องจากปริมาณ CO ของ Mode 4 น้อยกว่า Mode 3 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 359°C, 463°C, และ 516°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 49A) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ใกล้เคียง Mode 3 เนื่องจากมีอัตราการไหลของอากาศ ปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC และอุณหภูมิใอ เสียที่ออกจากเครื่องยนต์ใกล้เคียงกัน (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7 และตารางผนวกที่ 3) และพบว่า อุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 150 วินาที

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่าอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลัง PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 49B) เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 364°C, 465°C, และ 515°C ตามลำดับ (แสดงไว้ที่ในภาพที่ 49B) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ใกล้เคียง Mode 3 เนื่องจาก MAIN-CAT ของ Mode 4 ได้รับความร้อนจาก PRE-CAT ใกล้เคียง Mode 3 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 200 วินาที และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่าอุณหภูมิ ลดลงที่เวลา 380 วินาทีซึ่งใช้เวลาใกล้เคียง Mode 3 เนื่องจาก Mode 4 มีอัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหลัง MAIN-CAT ใกล้เคียงกับ Mode 3 ส่งผลให้ Mode 4 มีอัตราการสูญเสีย ความร้อนจากการพาใกล้เคียงกับ Mode 3

เมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ใอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 6.68 kJ/°C, 5.71 kJ/°C และ 6.26 kJ/°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 50) ซึ่งมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะใกล้เคียงกับ Mode 3 แสดงว่า Mode 4 ใช้พลังงานจำเพาะในการเพิ่มอุณหภูมิใกล้เคียงกับ Mode 3 เนื่องจาก Mode 4 มี อุณหภูมิหลัง PRE-CAT ใกล้เคียงกับ Mode 3



49B

ภาพที่ 49 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (49A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (49B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 4



ภาพที่ 50 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 4

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ PRE-CAT พบว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้มากขึ้นเช่นเดียวกับ Mode 3 (แสดงข้อมูลไว้ในตาราที่ 13) นอกจากนี้พบว่าการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 10% duration time ส่งผลให้ PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ได้เกือบหมดเช่นเดียวกับ Mode 3 ต่อมาเมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ทางออกของ MAIN-CAT พบว่าการฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time ส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้เล็กน้อยเช่นเดียวกับ Mode 3 (แสดงข้อมูลไว้ในตาราที่ 13) เนื่องจากอุณหภูมิ หลัง MAIN-CAT สูงไม่ถึงอุณหภูมิที่สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> ได้หมด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> 22.51%, 100%, และ 100% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 51A) และมีประสิทธิภาพของการลด THC 36.11%, 85.59%, และ 90.01% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 51B) ซึ่ง Mode 4 มี ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ใกล้เคียงกับ Mode 3 เนื่องจาก Mode 4 มีอัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สูงใกล้เคียงกับ Mode 3 ดังนั้นเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ที่ Lambda 1.7 และอุณหภูมิไอเสียออกจาก เครื่องยนต์ 230°C พบว่าที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 และ 2400 rpm ถึงแม้ว่า CO, CH<sub>4</sub>, THC มีปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอัตรา การไหลของอากาศและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT ใกล้เคียงกัน

### สิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

	Duration	Energy	Fuel	Emissions	СН	THC
Mode	Time	e Ratio Energy				me
	(%)	(%)	(kW)	Measurement	(ppm)	(ppmC)
4	0	71	0	After PRE-CAT	3289	4713
				After MAIN-CAT	3239	4487
	5	64.55	2.86	After PRE-CAT	2859	3739
				After MAIN-CAT	-2522	3249
	10	61.25	4.48	After PRE-CAT	149	750
				After MAIN-CAT	0	733
	15	59.35	5.97	After PRE-CAT	0	625
				After MAIN-CAT	0	508
		A.S.				

ตารางที่ 13 ปริมาณ  $CH_4$  และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 4



ภาพที่ 51 ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> (51A) และ THC (51B) ของระบบฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 4

### 5. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์

ใด้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิของไอเสีย 200°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 5) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 4 พบว่ามี ความเร็วรอบของเครื่องยนต์และ Lambda เท่ากับ Mode 4 แต่มีอุณหภูมิของไอเสียต่ำกว่า Mode 4 และมีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ที่ออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีด น้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้หมด เช่นเดียวกับ Mode 4 ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มจาก 200°C เป็น 265°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 52A) สาเหตุที่มีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สูงกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 มี ปริมาณ CO ในไอเสียออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) ต่อมาเมื่อ ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่า อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 493°C, 571°C, และ 605°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 52A) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT สูงกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 มีปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสีย ที่ออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 ถึงแม้ว่า Mode 5 มีอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ด่ำ กว่า Mode 4 ก็ตาม และพบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 170 วินาที

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลัง PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 52B) เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 438°C, 494°C, และ 526°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 52B) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูง กว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT มากกว่า Mode 4 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 260 วินาที และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่า อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ลดลงที่เวลา 460 วินาทีซึ่งใช้เวลานานกว่า Mode 4 เนื่องจากในขณะที่ หยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น อุณหภูมิหลัง PRE-CAT ลดลงทำให้ CH4 และ THC ที่ออกจาก PRE-CAT มีปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกัน MAIN-CAT ยังคงมีอุณหภูมิสูง อยู่ส่งผลให้อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูงขึ้นช่วงเวลาหนึ่ง

ประเด็นต่อมาเมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT โดยการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 4.29 kJ/°C, 4.54 kJ/°C และ 5.29 kJ/°C ตามลำคับ (แสดงไว้ในภาพที่ 53) แสดงว่า Mode 5 ใช้พลังงานจำเพาะ ในการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหลัง PRE-CAT สูงกว่า Mode 4



ภาพที่ 52 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (52A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (52B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 5




ภาพที่ 53 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 5

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ PRE-CAT และ MAIN-CAT พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้ มากขึ้นเช่นเดียวกับ Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 14) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time ของ Mode 5 ส่งผลให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ได้มากกว่าของ Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 มี อุณหภูมิหลัง PRE-CAT มากกว่า Mode 4 รวมทั้ง MAIN-CAT ของ Mode 5 ได้รับการถ่ายเทความ ร้อนจาก PRE-CAT สูงกว่าของ Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 14)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> 88.06%, 100% และ 100% ตามลำดับ (แสดงภาพที่ 51A) และมีประสิทธิภาพของการลด THC 87.46%, 94.79% และ 100% ตามลำดับ (แสดงภาพที่ 51B) ถึงแม้ว่า Mode 5 มีอุณหภูมิไอเสียที่ออก จากเครื่องยนต์ต่ำกว่า Mode 4 แต่ที่ 5% duration time ของ Mode 5 มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่าของ Mode 4 เนื่องจาก Mode 5 มีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ในไอเสียมากกว่า Mode 4 ส่งผลให้ Mode 5 มีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงกว่า Mode 4

	Duration	Energy	Fuel	<b>.</b>	CH	THC
Mode	Time	Ratio	Energy	Emissions	$CH_4$	THC
	(%)	(%)	(kW)		(ppm)	(ppmC)
5	0	71	0	After PRE-CAT	5284	7151
				After MAIN-CAT	5146	6539
	5	64.87	2.98	After PRE-CAT	1834	2248
				After MAIN-CAT	627	1006
	10	61.66	4.23	After PRE-CAT	0	426
				After MAIN-CAT	0	418
	15	59.1	5.22	After PRE-CAT	0	645
				After MAIN-CAT	0	0
		A 1				

ตารางที่ 14 ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 5





ต่อมาได้ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 1.7, และ อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 170°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 6) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะ การทำงานของ Mode 4 พบว่ามีความเร็วรอบของเครื่องยนต์และ Lambda เท่ากับ Mode 4 แต่มี อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ต่ำกว่า Mode 4 และมีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ออกจาก เครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 มาก กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถลดปริมาณ CO ได้ ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่เกิด การเปลี่ยนแปลง (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10% และ 15% duration time) พบว่า PRE-CAT และ MAIN-CAT ไม่สามารถลด

# ลิบสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ปริมาณ CH4 และ THC ได้ส่งผลให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT ได้ (แสดงไว้ในภาพที่ 55A และ 55B) เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 170°C เป็นอุณหภูมิ ที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีใน PRE-CAT และ MAIN-CAT ได้ (Chiew *et al.*, 2005)

ดังนั้นเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10% และ 15% duration time) ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 1.7, และอุณหภูมิไอเสียออกจาก เครื่องยนต์ 200°C ถึงแม้ว่าจะมีอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ก่อนข้างต่ำแต่มีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ในไอเสียออกจากเครื่องยนต์มากทำให้มีประสิทธิภาพการลด CH<sub>4</sub> มาก โดยเฉพาะ การฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของ การลด CH<sub>4</sub> มากกว่า 80% แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 170°C ถึงแม้ว่ามี ปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ในไอเสียมากกว่าที่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 200°C ก็ตาม แต่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ 170°C เป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา ทางเคมีใน PRE-CAT และ MAIN-CAT ได้



ภาพที่ 55 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (55A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (55B) ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 6

### 6. พิจารณาผลกระทบเนื่องจาก Lambda

ใด้ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 2.1, และอุณหภูมิไอเสียออก จากเครื่องยนต์ 230°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 7) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 4 พบว่ามีความเร็วรอบของเครื่องยนต์และอุณหภูมิของไอเสียเท่ากับ Mode 4 แต่มี Lambda สูงกว่า Mode 4 และมีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ที่ออกจากเครื่องยนต์น้อยกว่า Mode 4 กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลด ปริมาณ CO ได้หมดเช่นเดียวกับ Mode 4 ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มจาก 230°C เป็น 240°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 56A) สาเหตุที่อุณหภูมิหลัง PRE-CAT ต่ำกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 7 มีปริมาณ CO ในไอเสียออกจากเครื่องยนต์น้อยกว่า Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ใน ตารางที่ 7) ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 294°C, 351°C, และ 389°C ตามลำคับ (แสดงไว้ในภาพที่ 56A) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ต่ำกว่าของ Mode 4 เนื่องจาก Mode 7 มี ปริมาณ CH<sub>4</sub> และ THC ในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์น้อยกว่า Mode 4 และพบว่าอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาที

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลัง PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 56B) เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 300°C, 355°C, และ 394°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 56B) ซึ่งมีหลัง MAIN-CAT อุณหภูมิต่ำ กว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 7 ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT น้อยกว่า Mode 4 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 175 วินาที และเมื่อ หยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่าอุณหภูมิลดลงที่เวลา 330 วินาทีซึ่งใช้เวลาเร็วกว่าของ Mode 4 เนื่องจากในขณะที่หยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยานั้น ถึงแม้ว่า MAIN-CAT ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT แต่อุณหภูมิใน MAIN-CAT สูงไม่ถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทงเคมีเองได้

ประเด็นต่อมาเมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT โดยการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 11.26 kJ/°C, 10.31 kJ/°C และ 9.49 kJ/°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 57) ซึ่งมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง กว่า Mode 4 แสดงว่า Mode 7 ใช้พลังงานจำเพาะในการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 7 มีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT ต่ำกว่า Mode 4



ภาพที่ 56 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (56A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (56B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 7





ภาพที่ 57 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 7

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH4 และ THC ในไอเสียที่ทางออกของ PRE-CAT และ MAIN-CAT พบว่าเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ THC ได้เล็กน้อยแต่ไม่สามารถลด ปริมาณ CH4 ได้ (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 15) เนื่องจากอุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งไม่เพียงพอที่สามารถลดปริมาณ CH4 ได้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด  $CH_4$  และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด  $CH_4$ 19.35%, 18.29% และ 20.58% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 58A) และประมีสิทธิภาพของการลด THC 14.48%, 24.90% และ 38.23% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 58B) ซึ่งมีประสิทธิภาพของการ ลด  $CH_4$  และ THC ต่ำกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 7 มีปริมาณ CO,  $CH_4$ , และ THC ในไอเสียที่ ออกจากเครื่องยนต์น้อยกว่า Mode 4 ส่งผลให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงกว่า Mode 4

Mode	Duration	Energy	Fuel	Energy Consumption	CII	THC
	Time	Ratio	Energy		CH <sub>4</sub>	THC
	(%)	(%)	(kW)		(ppm)	(ppmC)
7	0	71	0	After PRE-CAT	1698	5214
				After MAIN-CAT	1603	4987
	5	66.98	2.11	After PRE-CAT	1398	4663
				After MAIN-CAT	-1346	4581
	10	64.4	4.10	After PRE-CAT	1249	4538
				After MAIN-CAT	1364	4023
	15	62.88	5.35	After PRE-CAT	1271	3947
				After MAIN-CAT	1326	3309
		AL.				

ตารางที่ 15 ปริมาณ  $CH_4$  และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 7



ภาพที่ 58 ประสิทธิภาพของการลด CH4 (58A) และ THC (58B) ของระบบฟอกไอเสียที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 7

ต่อมาได้ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm, Lambda 1.3, และอุณหภูมิ ของไอเสีย 230°C ในช่วงภาระปานกลาง (Mode 8) เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของ Mode 4 พบว่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์และอุณหภูมิของไอเสียเท่ากับ Mode 4 แต่มี Lambda ต่ำกว่า Mode 4 และมีปริมาณ CO, CH₄, และ THC ที่ออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 กำหนดให้ PRE-CAT เป็นของ OD และ MAIN-CAT เป็นของ JM เมื่อพิจารณาที่ทางออก PRE-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีด น้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า PRE-CAT สามารถลดปริมาณ CO ได้หมด เช่นเดียวกับ Mode 4 ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มจาก 230°C เป็น 260°C (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 59A) สาเหตุที่อุณหภูมิ PRE-CAT สูงกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 มี ปริมาณ CO ในไอเสียออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 7) ต่อมาเมื่อ

# ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่า อุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นถึง 512°C, 620°C และ 652°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 59A) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 มี CH₄ และ THC ในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ ปริมาณมากกว่า Mode 4 และพบว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 190 วินาที

เมื่อพิจารณาที่ทางออกของ MAIN-CAT ในช่วงที่ไม่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลัง PRE-CAT (แสดงไว้ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาทีในภาพที่ 59B) เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT ต่อมาเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นถึง 507°C, 592°C, และ 631°C ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 59B) ซึ่งมีอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูง กว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT มากกว่า Mode 4 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาพบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 300 วินาที ซึ่งใช้เวลานานกว่า Mode 4 และเมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่เวลา 300 วินาที) พบว่าอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ Mode 5 เนื่องจากในขณะ ที่หยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น อุณหภูมิหลัง PRE-CAT ลดลงทำให้ CH4 และ THC ที่ออกจาก PRE-CAT มีปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกัน MAIN-CAT ยังคงมีอุณหภูมิสูง อยู่ส่งผลให้อุณหภูมิหลัง MAIN-CAT สูงขึ้นช่วงเวลาหนึ่ง

ประเด็นต่อมาเมื่อพิจารณาค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT โดยการฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีค่า 4.28 kJ/°C, 4.10 kJ/°C และ 5.00 kJ/°C ตามลำคับ (แสดงไว้ในภาพที่ 60) ซึ่งมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ กว่า Mode 4 แสดงว่า Mode 8 ใช้พลังงานจำเพาะในการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่า Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 มีอุณหภูมิในช่วงที่เพิ่มขึ้นหลัง PRE-CAT สูงกว่า Mode 4



ภาพที่ 59 อุณหภูมิหลัง PRE-CAT (59A) และอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT (59B) ที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 8







ภาพที่ 60 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ PRE-CAT ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time ของ Mode 8

เมื่อพิจารณาปริมาณ CH4 และ THC ที่ทางออกของ PRE-CAT และ MAIN-CAT พบว่าเมื่อ ถึดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ส่งผลให้ PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถลดปริมาณ CH4 และ THC ได้มากขึ้นตามลำดับเช่นเดียวกับ Mode 4 (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 16) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5% duration time ของ Mode 8 สามารถลดปริมาณ CH4 และ THC ได้มากกว่า ของ Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 มีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT เพิ่มขึ้นมากกว่า Mode 4 รวมทั้ง MAIN-CAT ได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก PRE-CAT ที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ MAIN-CAT สามารถลด CH4 และ THC ได้มากขึ้นเช่นกัน (แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 16)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> และ THC โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอ เสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> 88.44%, 100% และ 100% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 61A) และมีประสิทธิภาพของการลด THC 80.77%, 90.10% และ 90.48% ตามลำดับ (แสดงไว้ในภาพที่ 61B) ถึงแม้ว่า Mode 8 มี อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์เท่ากับ Mode 4 แต่ที่ 5% duration time ของ Mode 8 มี ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่าของ Mode 4 เนื่องจาก Mode 8 มีปริมาณ CO, CH<sub>4</sub>, และ THC ในไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Mode 4 ส่งผลให้อุณหภูมิใน PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงกว่า Mode 4 ดังนั้นเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ที่ 5%, 10%, และ 15% duration time) ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 rpm และอุณหภูมิ ไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 230°C พบว่าที่ Lambda 1.3 มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า Lambda 2.1 เนื่องจากที่ Lambda 1.3 มีปริมาณ CO, THC, และ CH4 มากกว่า Lambda 2.1 ส่งผลให้ที่ Lambda 1.3 มีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงกว่า Lambda 2.1 นอกจากนี้เมื่อหยุดฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยาพบว่าที่ Lambda 1.3 สามารถรักษาอุณหภูมิหลัง MAIN-CAT ได้นานกว่า Lambda 2.1

Mode	Duration Time	Energy Ratio	Fuel Energy	Emissions Measurement	CH <sub>4</sub>	тнс
	(%)	(%)	(kW)		(ppm)	(ppmC)
8	0	71	0	After PRE-CAT	5781	9198
				After MAIN-CAT	5423	8574
	5	65.42	3.23	After PRE-CAT	2593	4144
				After MAIN-CAT	675	1944
	10	61.03	3.98	After PRE-CAT	45	1286
				After MAIN-CAT	0	1001
	15	58.77	5.47	After PRE-CAT	0	963
			4.	After MAIN-CAT	0	915

ตารางที่ 16 ปริมาณ CH4 และ THC ที่ 5%, 10% และ 15% duration time ของ Mode 8





ภาพที่ 61 ประสิทธิภาพของการลด CH4 (61A) และ THC (61B) ของระบบฟอกไอเสียที่ 5%, 10%,

และ 15% duration time ของ Mode 8



### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการฉีดน้ำมันให้เป็นละอองฝอยของวิธีการฉีดน้ำมันหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาและปัจจัยที่มีผลต่อการลด CH<sub>4</sub> จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ได้ทดลองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1900 และ 2400 rpm, Lambda ในช่วง 1.3 ถึง 2.1, และ อุณหภูมิของไอเสียในช่วง 170 ถึง 290°C ในช่วงภาระปานกลาง (IMEP 2 ถึง 5 bar) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

 กุณลักษณะการฉีดน้ำมันให้เป็นละอองฝอยของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอก ไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า

1.1 อุปกรณ์ของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถติดตั้ง กับเกรื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้ และเมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผล ให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สามารถเพิ่มขึ้นได้

1.2 สภาวะการฉีดที่แรงดัน 5 bar, ความถี่ 50 Hz, และอุณหภูมิ 40°C เป็นสภาวะที่
 5%, 10%, และ 15% duration time สามารถฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยได้

 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลด CH<sub>4</sub> ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระปานกลาง โดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยาพบว่า

2.1 PRE-CAT ที่เป็น OD มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า OEM เนื่องจาก PRE-CAT ที่เป็น OD มีสารพาเลเดียมปริมาณมาก ทำให้ในช่วงที่ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ PRE-CAT ที่เป็น OD สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงกว่า OEM

2.2 MAIN-CAT ที่เป็น JM สามารถลดปริมาณ CH4 ได้ และเมื่อใช้ร่วมกับ PRE-CAT ที่เป็น OD ทำให้มีประสิทธิภาพของการลด CH4 สูงและนานขึ้น 2.3 อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 200°C สูงเพียงพอที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ และการเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิง เร่งปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ของ PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงขึ้น

2.4 ไม่เพียงแต่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์เท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> แต่ปริมาณ CO, THC, และ CH<sub>4</sub> ที่ออกจากเครื่องยนต์ส่งผลกระทบ ต่อประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> ด้วยเหมือนกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิไอเสียค่อนข้างต่ำ (แต่มี อุณหภูมิไอเสียสูงกว่า 200°C) แต่มีปริมาณ CO, THC, และ CH<sub>4</sub> มากส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 170°C เป็นอุณหภูมิที่เครื่องฟอกไอเสีย เชิงเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถึงแม้ว่ามีปริมาณ CO, THC, และ CH<sub>4</sub> ที่ออกจาก เครื่องยนต์มากก็ตาม

2.5 สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ Lambda 1.7 และอุณหภูมิไอเสียออกจาก เครื่องยนต์ 230°C ถึงแม้ว่าที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1900 และ 2400 rpm แต่ประสิทธิภาพ ของการลด CH₄ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในเครื่องฟอก ไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา และปริมาณ CO, THC, และ CH₄ ที่ออกจากเครื่องยนต์ใกล้เคียงกัน

2.6 เมื่อฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเท่ากันพบว่า Lambda ที่เข้าใกล้สภาวะเผาไหม้พอดี (λ=1) มีประสิทธิภาพของการลด CH<sub>4</sub> สูงกว่า Lambda ที่มี สภาวะเผาไหม้บาง (λ=2) เนื่องจาก Lambda ที่สภาวะเผาไหม้พอดีมีปริมาณ CO, THC, และ CH<sub>4</sub> ที่ออกจากเครื่องยนต์มากกว่า Lambda ที่มีสภาวะเผาไหม้บาง ส่งผลให้ Lambda ที่สภาวะเผาไหม้ พอดีมีอุณหภูมิหลัง PRE-CAT และ MAIN-CAT สูงกว่า Lambda ที่มีสภาวะเผาไหม้บาง

#### ข้อเสนอแนะ

 การควบคุมปริมาณการฉีด Raw fuel ของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองถูกกำหนดโดย Duration time ซึ่งเป็นเวลาของการยก Needle valve ในหัวฉีดนั้น พบว่าไม่สามารถควบคุมปริมาณ การฉีด Raw fuel ได้แม่นยำเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ดังนั้นควรนำหัวฉีด ที่สามารถควบคุมปริมาณการฉีด Raw fuel ได้โดยตรงเพื่อควบคุมปริมาณการฉีด Raw fuel ให้ได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการลด CH<sub>4</sub> มากยิ่งขึ้น 2. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลด CH<sub>4</sub> โดยใช้การฉีดน้ำมัน หน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เกิดจากหลายปัจจัยที่เกิดขึ้นพร้อมกันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา การนำ Design of experiments (DOE) มาวิเคราะห์ทำให้สามารถหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น



### เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Ada, A., G.H., H.A. Soliman, O.A. Badr and M.F. Abd Rabbo. 2000. Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine. Energy Conversion & Management 41: 559-572.
- AhlstroÈm-Silversand, A.F. and C. U. Odenbrand. 1999. Modelling catalytic combustion of carbon monoxide and hydrocarbons over catalytically active wire meshes. Chemical Engineering Journal 73: 205-216.
- Amatayakul, W. and O. Ramnas. 2001. Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars. Journal of Cleaner Production 9: 395–403.
- 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 International 2009-01-1855.
- Aroonsrisopon, T., V. Sohm, P. Werner, D.E. Foster, T. Morikawa and M. Iida. 2002.
   An investigation into the effect of fuel composition on HCCI combustion characteristics.
   SAE Technical Paper 2002-01-2830.
- 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 International 2007-21-1125.
- Avila., P, M. Montes and E.E. Miro'. 2005. Monolithic reactors for environmental applications: a review on preparation technologies. Chemical Engineering Journal 109: 11–36.
- AVL. 2005. Smoke value measurement with the filter-paper-method Application notes. AVL List GmbH, Graz. (Unpublished manuscript).

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาสัยเทษกรราสกร์

- Balakotaiah, V. and D. H. West. 2002. Shape normalization and analysis of the mass transfer controlled regime in catalytic monoliths. **Chemical Engineering Science** 57: 1269 1286.
- Bartholomew, C.H. 2001. Mechanisms of catalyst deactivation. Applied Catalysis A: General 212: 17-60.
- Bhattacharya, M., M. P. Harold and V. Balakotaiah. 2004. Shape normalization for catalytic monoliths. **Chemical Engineering Science** 59: 3737 3766.
- 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.
- 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 International 2007-24-0085.
- Chatlatanagulchai, W., T. Aroonsrisopon and K. Wannatong. 2009. Robust Common-Rail Pressure Control for a Diesel-Dual-Fuel Engine Using QFT-Based Controller. SAE International 2009-01-1799.
- Chen, L., X. Zhang, L. Huang and L. Lei. 2009. Partial oxidation of methane with air for methanol production in a post-plasma catalytic system. Chemical Engineering and Processing 48: 1333–1340.
- Chiew, L., P. Kroner and M. Ranalli. 2005. Diesel Vaporizer: An Innovative Technology for Reducing Complexity and Costs Associated with DPF Regeneration. SAE International 2007-24- 0671.
- Ciambelli, V., V. Palma and P. Russo. 2003. Microwave Induced Catalytic Combustion Of Soot. **SEA\_NA 2003-01-48**.

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

- Cinti, D., M. Angelone, U. Masi and C. Cremisini. 2002. Platinum levels in natural and urban soils from Rome and Latium (Italy): significance for pollution by automobile catalytic converter. The Science of the Total Environment 293: 47–57.
- Costa, P. D., R. Marques and S.D. Costa. 2008. Plasma catalytic oxidation of methane on alumina-supported noble metal catalysts. Applied Catalysis B: Environmental 84: 214–222.
- Dahl, D., M. Andersson, A. Berntsson and I. Denbratt. 2009. Reducing Pressure Fluctuation at High Loads by Means of Charge Stratification in HCCI Combustion with Negative Valve Overlap. SAE International 2009-01-1785.
- Dec, J.E., W. Hwang and M. Sjoberg. 2006. An Investigation of Thermal Stratification in HCCI Engines Using Chemiluminescence Imaging. **SAE Technical Paper 2006-01-1518**.
- Deconninck, B. 2005. A New Methodology for On-Line Lubricant Consumption Measurement. SAE Technical Paper 2005-01-1125.
- Dent, J.C. 1971. Basic for the comparison of various Experimental Methods for the studying Spray Penetration. SAE paper 710571.
- Dominguez, A., B. Fidalgo, Y. Fernndez, J.J. Pis, J.A. Menndez. 2007. Microwave-assisted catalytic decomposition of methane over activated carbon forCO2-free hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 32: 4792 – 4799.
- Eastwood, P. 2008. **Particulate Emissions from Vehicles.** John Wiley & Son Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex P019 8SQ, England.
- Escandon, L., S. Ordonez, A. Vega, F.V. Diez. 2005. Oxidation of methane over palladium catalysts: effect of the support. **Chemosphere** 58: 9–17.

#### 111

## ลิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษกรศาสกร์

- Flachsbart, P.G. n.d. Human exposure to carbon monoxide from mobile sources. Chemosphere: Global Change Science 1: 301-329.
- Froment, G.F. and K.B. Bischoff. 1990. Chemical Reactor Analysis and Design. John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney.

Garin, F. 2004. Environmental catalysis. Catalytic Today 89: 255-68.

Garner, C.P. and J.C. Dent. 1989. Microwave Assisted Regeneration of Diesel Particulate Trap. SAE Technical Paper 890174.

Gélin, P., L. Urfels, M. Primet and E. Tena. 2003. Complete oxidation of methane at low temperature over Pt and Pd catalysts for the abatement of lean-burn natural gas fuelled vehicles emissions: influence of water and sulphur containing compounds.
Catalysis Today 83: 45-57.

- Gélin, P. and M. Primet. 2002. Complete oxidation of methane at low temperature over noble metal catalysts: a review. Applied Catalysis B 39: 1–37.
- Giani, L., G. Groppi and E. Tronconi. 2005. Mass-transfer characterization of metallic foams as supports for structured catalysts. Industrial & Engineering Chemistry Research 44: 4993–5002.
- Golben, P.M., D. Dacosta and G. Sandrock. 1997. Hydride-based cold-start heater for automotive catalyst. Journal of Alloys and Compounds 253-254: 686-688.

Goldstein, M. 2008. Carbon monoxide poisoning. CLINICAL 592: 785-790.

Graham, L.A., G. Rideout, D. Rosenblatt and J. Hendren. 2008. Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. Atmospheric Environment 42: 4665–4681.

#### 112

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

- Hayes, R.E. and S. Kolackowski. 1997. Introduction to Catalytic Combustion. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Heck, R.M., S. Gulati and R.J. Farrauto. 2001. The application of monoliths for gas phase catalytic reactions. Chemical Engineering Journal 82: 149–156.
- Heck, R.M., S. Gulati and R.J. Farrauto. 2002. Catalytic Air Pollution Control Commercial Technology. 20nd ed. Wiley Inter Science, New York.
- Heck., R.M. and R.J. Farrauto. 2001. Automobile exhaust catalysts. Applied Catalysis A: General 221: 443–57.
- Heeb, N.V., A.-M. Forss, C. Bach, S. Reimann, A. Herzog and H. W. JaKckle. 2000.
  A comparison of benzene, toluene and C2-benzenes mixing ratios in automotive exhaust and in the suburban atmosphere during the introduction of catalytic converter technology to the Swiss Car Fleet. Atmospheric Environment 34: 3103-3116.
- Helden, D.L. and C.C. Crelline. 2006. Diesel Exhaust After treatment Device Regeneration System. U.S. Patent.
- Heywood, J.B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamental. 2nd ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Hoang, D. L., S. H. Chan and O. L. Ding. 2005. Kinetic modeling of partial oxidation of methane in an oxygen permeable membrane reactor. Chemical Engineering Research and Design 83: 177–186.
- Huttunen, J.T., J. Alm, A. Liikanen, S. Juutinen, T. Larmola, T. Hammar, J. Silvola and
  P. J. Martikainen. 2003. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal
  lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions.
  Chemosphere 52: 609–621.

#### 113

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษยรศาสยร์

- 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.
- Kikuchi, R., S. Maeda, K. Sasaki, S. Wennerström, Y. Ozawa and K. Eguchi. 2003. Catalytic activity of oxide-supported Pd catalysts on a honeycomb for low-temperature methane oxidation. Applied Catalysis A: General 239: 169–179.
- Korakianitis, T., A.M. Namasivayam and R.J.Crookes. 2010. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. Progress in Energy and Combustion Science 85: 1-24.
- Lapisardi G., L. Urfels, P. Ge'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.
- Lee, D.H. 2009. Active Regenerative DPF Using a Plasma Assisted Burner. SAE International 2009-01-1926.
- Lewis, G.P. and L. Coughlin. 1973. LUNG "SOOT" ACCUMULATION IN MAN. Atmospheric Environment Pergamum Press 7: 1249-1255.
- 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.

### ลิขสิทบิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรร่าส่กร

- Liu, C., R. Mallinson and L. Lobban. 1999. Comparative investigations on plasma catalytic methane conversion to higher hydrocarbons over zeolites. Applied Catalysis A: General 178: 17-27.
- Liu, S. 2003. Development of compressed natural gas/diesel dual-fuel turbocharged compression ignition engine. Journal of Automobile Engineering 217: 839-845.
- Liu, W. and S. Roy. 2004. Effect of channel shape on gas/liquid catalytic reaction performance in structured catalyst/reactor. Chemical Engineering Science 59: 4927 – 4939.
- Locker, R.J., S.B. Constanc, M. Shinjin, F. Peter and C.G. Angus. 2004. Diesel Particulate Filter Operational Characterization. **SAE International 2004-01-0958.**
- Ludecke, O. and D. Dimick. 1983. Diesel Exhaust Particulate Control System Development. SAE Technical Paper 830085.
- Martin, A. 1984. Estimed washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogen dioxide and ozone. Atmospheric Environment 18: 1955-1961.
- Mei, H., L. Chengyue, J. Shengfu and L. Hui. 2007. Modeling of a metal monolith catalytic reactor for methane steam reforming–combustion coupling. Chemical Engineering Science 62: 4294 – 4303.
- Mouza, A.A., C.A. Peolides and S.V. Paras. 1995. Utilization of used auto-catalytic converters in small countries: the Greek paradigm. Resources, Conservation and Recycling 15: 95-110.
- Nakane, T., M. Ikeda, M. Hori, O. Bailey and L. Mussmann. 2005. Investigation of the Aging Behavior of Oxidation Catalysts Developed for Active DPF Regeneration Systems. SAE International 2005-01-1759.

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

- Nijhuis, T.A., A.E.W. Beers, T. Vergunst, I. Hoek, F. Kapteijn and J.A. Moulijn. 2001. Preparation of monolithic catalysts. **Catalysis Revolution** 43: 345–80.
- Niura Y., K. Ohkubo and K. Yagi. 1986. Study on Catalytic Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter. **SAE Technical Paper 860290.**
- Nwafor, O.M.I. 2007. Effect of advanced injection timing on emission characteristics of diesel engine running on natural gas. **Renewable Energy** 32: 2361-2368.
- Onishi, S., S.H. Jo, K. Shoda, P.D. Jo and S. Kata. 1979. Active Thermo-Atmosphere Combustion Process for Internal Combustion Engines. **SAE Technical paper 790501.**
- Papagiannakis, R.G., C.D. Rakopoulos, D.T. Hountalas and D.C. Rakopoulos. 2004. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions. Energy Conversion and Management 45: 2971–2987.
- Palma, V., P. Russo, G. Matarazzo and P. Ciambelli. 2007. Microwave improvement of catalyst performance in soot oxidation without additives. Applied Catalysis B: Environmental 70: 254–260.
- Patcas, F.C., G.I. Garrido and B. Kraushaar-Czarnetzki. 2007. COoxidation over structured carriers: Acomparison of ceramic foams, honeycombs and beads. Chemical Engineering Science 62: 3984 – 3990.
- Persson, K., A. Ersson, S. Colussi, A. Trovarelli and S.G. Jaras. 2006. Catalytic combustion of methane over bimetallic Pd–Pt catalysts: The influence of support materials.
  Applied catalysis B 66: 175-185.

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษยรศาสยร์

- Pfalzgraf, B., M. Rieger and G. Ottowitz. 1996. Close coupled catalytic converters for compliance with LEV/ULEV and EG III legislation – influence of support material, cell density and mass on emission results. SAE paper 960261.
- Prockop, L.D. and R.I. Chichkova 2007. Carbon monoxide intoxication: An updated review. Journal of the Neurological Sciences 262: 122–130.
- Reader, G.T., S. Banerjee, M. Wang and M. Zheng. 2006. Energy Efficiency Analysis of Activeflow Operations in Diesel Engine Aftertreatment. **SAE International 2006-01-3286**.
- 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.
- Santos., H. and M. Costa. 2008. Evaluation of the conversion efficiency of ceramic and metallic three way catalytic converters. **Energy Conversion and Management** 49: 291–300.
- Soto K.F., K.M. Garza, Y. Shi and L.E. Murr. 2008. Direct contact cytotoxicity assays for filtercollected, carbonaceous (soot) nanoparticulate material and observations of lung cell response. Atmospheric Environment 42: 1970–1982.
- Sreethawong, T., P. Thakonpatthanakun and S. Chavadej. 2007. Partial oxidation of methane with air for synthesis gas production in a multistage gliding arc discharge system.
  International Journal of Hydrogen Energy 32: 1067 1079.
- Stanmore, B.P., J.F. Brilhac, P. Gilot. 2001. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models. Carbon 39: 2247–2268.
- Stein, H.J. 1996. Diesel oxidation catalysts for commercial vehicle engines: strategies on their application for controlling particulate emissions. Applied Catalysis B: Environmental 10: 69-82.

#### 117

## ลิขสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเกษยรศาสยร์

- Stanmore, B.R., J.F. Brilhac and P. Gilot. 2001. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models. Carbon 39: 2247–2268.
- Sun, H., Y. Zhang, X. Quan, S. Chen, Z. Qu and Y. Zhou. 2008. Wire-mesh honeycomb catalyst for selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> under lean-burn conditions. Catalysis Today 139: 130–134.
- Takiguchi., M. 2005. Effects of Post Injection on Piston Lubrication in a Common Rail Small Bore Diesel Engine. SAE Technical Paper 2005-01-2166.
- Tao, F., D.E. Foster and R.D. Reitz. 2007. Characterization of soot particle distribution in conventional, non-premixed DI diesel flame using a multi-step phenomenological soot model. Proceedings of the Combustion Institute 31: 2991–2998.

Turns, S.R. 2000. An Introduction to Combustion. 2 ed. Mc-Graw-Hill, Singapore.

- Wade, W.R., J.E. White and J.J. Florek. n.d. Design Particulate Trap Regeneration Techniques. SAE Technical Paper 810118.
- Wade, W.R., J.E. White, J.J. Florek and H.A. Cikanek. 1983. Thermal and Catalytic Regeneration of Diesel Particulate Trap. SAE Technical Paper 830083.
- Webb, C.C., P.A. Weber and M. Thornton. 2004. Achieving Tier 2 Bin 5 Emission Levels with a Medium Duty Diesel Pick-Up and a NOX Adsorber, Diesel Particulate Filter Emissions System—Exhaust Gas Temperature Management. SAE International 2004-01-0585.
- Wuebbles, D.J. and K. Hayhoe. 2002. Atmospheric methane and global change. Earth-Science Reviews 57: 177–210.

# ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรศาสกร์

- Wannatong., K., N. Akarapanyavit, S. Siengsanorh, T. Aroonsrisopon and S. Chanchaona. 2009. New Diesel Dual Fuel Concepts: Part Load Improvement. SAE International 2009-01-1797.
- Williams., J.L. 2001. Monolith structures, materials, properties and uses. **Catalysis Today** 69: 3–9.
- Wirojsakunchai, E., C. Kolodziej, R. Yapaulo, D.E. Foster and N. Schmidt. 2007. Effects of DPF Washcoat Variations on DPF Active Regeneration Characteristics.
   SAE International 2007-24-0092.
- Wirojsakunchai, E. 2009. Final Report Development of the after treatment system for DDF vehicle.
- Wirojsakunchai, E., T. Aroonsrisopon, K. Wannatong and N. Akarapanjavit. 2009. A Simulation Study of an Aftertreatment System Level Model for Diesel Dual Fuel (DDF) Engine Emission Control. SAE International 2009-01-1966.
- Yamamoto, H. and H. Uchida. 1998. Oxidation of methane over Pt and Pd supported on alumina in lean-burn natural-gas engine exhaust. **Catalysis Today** 45: 147-151.
- Yang, K.S., J.S. Choi and J.S. Chung. 2004. Evaluation of wire-mesh honeycomb containing porous Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer for catalytic combustion of ethyl acetate in air. Catalysis Today 97: 159–165.
- Yang, K.S., G. Mul, J.S. Choi, J.A. Moulijn and J.S. Chung. 2006. Development of TiO2/Ti wire-mesh honeycomb for catalytic combustion of ethyl acetate in air.
  Applied Catalysis A: General 313: 86–93.

# ลิขสิทปี้ มหาวิทยาลัยเทษยรศาสยร์

- Yang, K.S., Z. Jiang and and J.S. Chung. 2003. Electrophoretically Al-coated wire mesh and its application for catalytic oxidation of 1,2-dichlorobenzene. Surface and Coatings Technology 168: 103–110.
- Yang, S., A. Maroto, M. Benito, I. Rodriguez and A. Guerrero. 2000. Methane combustion over supported Pd catalyst: reactivity and active phase. Applied Catalysis B 28: 223–233.
- Yarwood, G., J. Grant, B. Koo and A.M. Dunker. 2008. Modeling weekday to weekend changes in emissions and ozone in the Los Angeles basin for 1997 and 2010. Atmospheric Environment 42: 3765–3779.
- Zelenka P., C. Telford, D. Pye and N. Birkby. 2002. Development of a Full-Flow Burner DPF System for Heavy Duty Diesel Engines. **SAE Technical Paper 2002-01-2787**.
- Zhang, B.N. and N.T. K. Oanh. 2002. Photochemical smog pollution in the Bangkok Metropolitan Region of Thailand in relation to O3 precursor concentrations and meteorological conditions. Atmospheric Environment 36: 4211–4222.
- Zhang, Z.H., C.S. Cheung, T.L. Chan and C.D. Yao. 2009. Emission reduction from diesel engine using fumigation methanol and diesel oxidation catalyst. Science of the Total Environment 407: 4497–4505.
- Zhang, Z.H., C.S. Cheung, T.L. Chan and C.D. Yao. 2010. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel/methanol compound combustion engine with and without diesel oxidation catalyst. Science of the Total Environment 408: 865–872.
- Zheng, M., U. Asad, G.T. Reader and D.S.K. Ting. 2006. A Preliminary Thermal Response Analysis of exhaust Pipe Plenums for Diesel After treatment Improvement. SAE International 2006-01-3310.

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาสัยเทษกรราสกร์







วงจรควบคุม Raw Fuel Injection ของโปรแกรม LapVIEW<sup>TM</sup> 8.5

ภาพผนวกที่ 1 แสดงวงจรควบคุมระบบฉีด Raw Fuel ของโปรแกรม LapVIEW<sup>™</sup> 8.5



ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)



### วงจรควบคุมทางไฟฟ้าของระบบฉีด Raw fuel

ภาพผนวกที่ 2 แสดงวงจรควบคุมทางไฟฟ้าของระบบฉีด Raw fuel



### เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC ของ OD และ JM

ภาพผนวกที่ 3 ภาพถ่ายเครื่องฟอกไอเสีย PRE-CAT ของ OD



ภาพผนวกที่ 4 ภาพถ่ายเครื่องฟอกไอเสีย MAIN-CAT ของ JM



#### DYNOEXACT APA TOP ACCURACY AC DYNAMOMETERS



ภาพผนวกที่ 5 ภาพถ่าย AC Dynamometer

#### ที่มา: AVL (2005)

#### **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

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรร่าสกร์
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)

### **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)

## สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

### AVL FUEL BALANCE & FUEL TEMPERATURE CONTROL



ภาพผนวกที่ 6 ภาพถ่าย AVL Fuel balance & Fuel temperature control

ที่มา: AVL (2005)

สิบสิทปิ์ มหาวิทยาลัยเทษยรศาสยร์

## ตารางผนวกที่ 1 รายละเอียดของเครื่อง 733S และ 753C

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
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**
N G	* 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

# สิบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทษกรราสกร์

## ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Interfaces AVL 733S:	RS232 (AK compliant) or 733/730 protocol		
	Analog 0 10 V (optional)		
	Digital I/0 (optional)		
Interfaces AVL 753C:	2x RS232 (AK compliant)		
	Analog 0 10 V (optional)		
	Digital I/0 (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		



Property	Test Method	Specific Value	Result
Appearance	Visual	Pass	Pass
Ash, Mass%	ASTM D482-03	0.01 max.	< 0.01
Carbon Residue on 10%,	A STM D 4520 07	0.05	< 0.05
Distillation	ASTM D4530-07	0.05 max.	< 0.05
Residue, Micro Method, % (m/m)			
Calculated Cetane Index or	ASTM D976-04b or	47 min.	56.5
Cetane Number	ASTM D613-01		
Color, ASTM	ASTM D1500-04a	2.0 max.	L0.5
Corrosion	ASTM D130-04		
Corrosion, Copper Strip 3 hr. at 50		1 max.	1a
°C, number			
Density at 15 °C, g/mL	ASTM D4052-96	0.81-0.87	0.8325
	(Reapproved 2002)		
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	ASTM D445-06 or	1.8 - 4.1	
(mm2/s)			

ตารางผนวกที่ 2 รายละเอียดคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทคสอบ

### ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Property	Test Method	Specific Value	Result
Viscosity, Kinematic at 40 °C, cSt	NIR	1.8 - 4.3	3.4018
(mm2/s)			
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 (2010)

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลการทำงานของเครื่องยนต์ Mode 1 ถึง 8

	SOI Spli	Split	EGR	Throttle	Air	Fuel Gas	
Mode						Balance	Consump
	(CA)	(%)	(%)	(%)	(kg/hr)	(kg/hr)	(kg/hr)
1	45/0	0	93	24.5	68.42	0.78	2.55
2	60/8	0.6	80	32.0	100.00	1.19	3.72
3	45/0	0	95	32.0	68.40	0.68	2.47
4	35/0	0	96	24.5	65.09	0.62	2.14
5	45/0	0	95	24.5	45.42	0.45	1.62
6	35/0	0	96	24.5	35.50	0.68	2.00
7	45/0	0	50	24.5	91.09	1.09	2.69
8	25/0	0	95	24.5	37.62	0.62	1.77

จาก	ຈາກ ຄຶ້ง	
	หัวฉีด	15
	หน้า pre-cat	190
	หน้า main-cat	885
	TI	15
	P1	15
	E1	15
เทอร์ โบชาร์จ	T2	660
	P2	660
	E2	660
	Т3	1,305
	P3	1,305
	E3	1,305
	S1	1,955
	S2	2,155

ตารางผนวกที่ 4 แสดงระยะตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์



### HORIBA MEXA 7100 DEGR



ภาพผนวกที่ 7 ภาพถ่าย HORIBA MEXA 7100 DEGR

พี่มา: Horiba (2010)



## ตารางผนวกที่ 5 ข้อมูลของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดไอเสียของ HORIBA MEXA 7100 DEGR

Measurement	СО		С	CO <sub>2</sub>		NO/NOx	
Components	min (ppm)	max (%vol.)	min (ppm)	max (%vol.)	min (ppm)	max (ppm)	
Range	0-100	0-12	0-5000	0-20	0-10	0-10000	
Principle	Ν	JDIR	NI	NDIR		CLD	
Sample Line	One line fo	or raw exhaust gas	s without dilu	ation (direct me	easurement l	ine)	
Sample Gas Flow	Approxima	ation 15 L/min	XXX		2		
Response Time of Analyzers T10-90	less t	han 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)		
Measurment	U)	THC O <sub>2</sub>		0 <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>	
Components	min (ppmC)	max (ppmC)	min (%vol.)	max (%vol.)	min (ppmC)	max (ppmC)	
Range	0-10	0-50000	0-5	0-25	0-10	0-50000	
Principle	$\mathbf{H}_{\mathbf{x}}$	FID MPD		FID			
Sample Line One line for raw exhaust gas without dilution (direct measurement line)							
Sample Gas Flow	Approxima	ation 15 L/min					
Response Time of Analyzers T10-90	les	s than 0.4 s	less than 0.75 s		less than 0.4 s		
Noise	with	in +1.0% FS	within +1.0% FS for zero		ero with	hin +1.0% FS	

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล วัน เดือน ปี ที่เกิด สถานที่เกิด ประวัติการศึกษา อนิรุทธ์ น้อยเพิ่ง 2 กรกฎาคม 2525 เขตบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพ ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) พ.ศ. 2543 บริษัท NICE APPREAL COMPANY LIMITED พ.ศ. 2548-2550

ประวัติการทำงาน



136