



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการปรับปรุงการกระจายตัวการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ
ดีเซลออกซิเดชันแคตตาไลสต์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A Computational Fluid Dynamics Study on Improving Raw Fuel Injection Distributions
in front of Diesel Oxidation Catalysts

นามผู้วิจัย นายวัชรินทร์ จันทรสวรรณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทิจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการปรับปรุงการกระจายตัวการฉีดน้ำมันน้ำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบดีเซล
ออกซิเดชันแคตตาไลสต์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A Computational Fluid Dynamics Study on Improving Raw Fuel Injection Distributions
in front of Diesel Oxidation Catalysts

โดย

นายวัชรินทร์ จันทรสวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัชรินทร์ จันทสุวรรณ 2556: การศึกษาการปรับปรุงการกระจายตัวการฉีดน้ำมันหน้า
เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบดีเซลออกซิเดชันแคตตาลิสต์ด้วยพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D. 88 หน้า

ในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซไอเสียในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา
ของเครื่องยนต์ดีเซลสมัยใหม่ให้ดียิ่งขึ้นนั้น เทคนิคการฉีด Raw-Fuel (การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่
ด้านหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่อง
ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้
สามารถลดปริมาณก๊าซไอเสียในช่วงที่มีอุณหภูมิไอเสียต่ำได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การกระจายตัว
ของน้ำมันเชื้อเพลิงควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่ามีความสม่ำเสมอของ
อุณหภูมิภายใน หากเกิดมีจุดร้อนภายในเนื่องจากการไหลที่ไม่สม่ำเสมอหรือมีอุณหภูมิภายในที่
สูงเกินจุดหลอมเหลวของ substrate ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่การเสื่อมสภาพของ
เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การนำโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาใช้เพื่อ
การศึกษาความเป็นไปได้ของการปรับปรุงการกระจายการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้วิธีแผ่น
ควบคุมการไหล แผ่นควบคุมการไหลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง
และผสมให้เข้ากันอย่างดียิ่งก่อนที่จะเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ในการออกแบบต้อง
คำนึงถึงความดันกลับ การกระจายอุณหภูมิและประสิทธิภาพการลดปริมาณไอเสียภายใน ซึ่งผลของ
แบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงจะป้องกันไม่ให้
อุณหภูมิสูงสุด และยังช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณไอเสีย นอกจากนี้ยังใช้
โปรแกรมการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยตามสถานะเงื่อนไขต่างๆ อีกทั้ง
ยังกำหนดและระบุค่าเหมาะสมภายใต้สถานะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับระบบได้ โดยผลที่ได้พบว่า
ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของ O_2 สูงกว่า $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 11% โดยปริมาตร และอัตราการไหลต่ำกว่า
 75 kg/h จะทำให้ลด HC ได้ไม่ต่ำกว่า 50%

Wacharin Chantarasuwan 2013: A Computational Fluid Dynamics Study on Improving Raw Fuel Injection Distributions in front of Diesel Oxidation Catalysts. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Ekathai Wirojsakunchai, Ph.D. 88 pages.

To increase conversion efficiency of exhaust gas in advanced catalytic converters of modern diesel engines, the raw fuel injection technique (injecting diesel fuel in front of the catalyst). For more increase the chemical reaction inside the catalytic converter catalyst. Occur raising rapidly exhaust temperature cause a reduce exhaust gas at low temperature. It is found that the flow distribution of the fuel droplets must be uniformly distributed to ensure the uniformity of internal temperatures of the catalyst. If there occurs a hot spot inside due to uneven flow and the internal temperature exceed the melting point of the substrate, this may cause the substrate cracking which leads to the failure of the device.

The current study is aimed to apply a CFD program to study the possibility of improvement of flow distribution of the fuel droplets by using baffle method. The baffles help enhance the dispersion of fuel droplets to ensure uniform mixing well before entering the catalytic converter. The design took into account of the back pressure. The temperature distribution and the conversion efficiency exhaust gas within the catalytic converter. The result of simulation shows that the uniform distribution of fuel droplets by baffles help minimize the temperature distribution and also increase its conversion efficiency. Furthermore, DOE program is employed to study the influence of important factors under various exhaust conditions. In addition, appropriate DOC operating conditions can be well defined and identified appropriate under the conditions required for the system. The results found that temperature and O_2 concentration higher than $260^\circ C$, 11% by volume and flow rate less than 75 kg/h HC will decrease at least 50%

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

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

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

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ANSYS)

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

ขอขอบคุณ ทีมนักวิจัย นิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากห้องปฏิบัติการการเผาไหม้เชิง ประยุกต์ (ACL Lab) อันได้แก่ คุณชนันชัย เตพิมลรัตน์ คุณกิตติศักดิ์ คำสินลา คุณณภูมิ ไวก ะพันธ์ คุณวรเทพ วชิรพันธุ์ และคุณอนิรุทธิ์ น้อยเพ็ง สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และแก้ไขปัญหา ห้องทดสอบ คุณกิตติพงษ์ เขาวาจา คุณบัณฑิต จิรนนทศักดิ์ คุณนิติรงค์ พงษ์พานิช และคุณกาญจ นะ ชาวบ้านเกาะ สำหรับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมตัวแปรในการทดสอบเครื่องยนต์ ทีมงาน วิศวกรจากบริษัท AVL AST. สำหรับคำปรึกษาเรื่องการใช้งานอุปกรณ์ และทีมช่างเทคนิคบริษัท ปตท. สำหรับความช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และซ่อมบำรุงอุปกรณ์วิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

วัชรินทร์ จันทรสวรรณ

พฤษภาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก การเขียนสมการ Langmuir Hinshelwood Lumped	
ให้อยู่ในรูปภาษาคอมพิวเตอร์ C++	73
ภาคผนวก ข ภาพตัดขวางภายใน substrate	79
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบ	8
2	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Active Systems	13
3	แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Passive Systems	15
4	แสดงสารประกอบก๊าซไอเสียที่ใช้ในทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม	29
5	สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ศึกษา	30
6	แสดงสารประกอบก๊าซไอเสียที่ใช้ในแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์	31
7	รายละเอียดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ OEM PRE-CAT	31
8	แสดงค่าความสัมพันธ์ความต้านทานการไหลของอากาศที่ Cell Density ต่างๆ	33
9	เงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์	34
10	เงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์	35
11	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม	39
12	ตารางการดำเนินงาน	40

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	11
2	แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซลของระบบ Raw-Fuel Injection	15
3	แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซล เครื่องทำความร้อนและเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	16
4	เปรียบเทียบ CH ₄ ที่ภาระการทำงานเบาและปานกลาง	17
5	ผลกระทบของปริมาณการฉีดน้ำมันกับการลดลงของก๊าซมีเทนที่ภาระการทำงานเบา	17
6	ผลกระทบของปริมาณการฉีดน้ำมันกับการลดลงของก๊าซมีเทนที่ภาระการทำงานเบา	18
7	การกระจายตัวของ Soot กับอุณหภูมิ (ซ้าย) ก่อนปรับปรุง และ (ขวา) หลังปรับปรุง	20
8	การกระจายตัวของ Soot ที่ 30 cycle (ซ้าย) ก่อนติดตั้ง Diffuser และ (ขวา) หลังติดตั้ง Diffuser	21
9	รูปแบบของ Centered Flow กับ Inverted Flow	22
10	แสดง Dispersion Device ที่ติดตั้งบริเวณ Inlet Cone และ ผลของ Back Pressure ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้ง	22
11	ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	23
12	แสดงหน้าตาโปรแกรม AVL-BOOST	24
13	แสดงหน้าตาโปรแกรม FLUENT	25
14	แสดงหน้าตาโปรแกรม GAMBIT	26
15	แสดงหน้าตาโปรแกรม MINITAB	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	แสดงเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	28
17	แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	28
18	แสดงการเปรียบเทียบ Light-off Temperature ของ CO จาก CFD กับการทดลอง	29
19	แสดงการเปรียบเทียบ Light-off Temperature ของ C ₃ H ₈ จาก CFD กับการทดลอง	29
20	แสดงการติดตั้งระบบ Raw-Fuel Injection เข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	30
21	(ก) เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษา (ข) แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย	32
22	แสดงการเลือกจำนวน Mesh ที่เหมาะสมต่องานวิจัย	32
23	แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์	34
24	แสดงหลักการทำงานของปฏิกิริยาพื้นผิว	35
25	(ก) ปรับปรุงด้วยการติดผ่านควบคุมการไหลที่บริเวณท่อจำนวน 5 แผ่น (ข) ปรับปรุงด้วยการเพิ่มความยาวท่อก่อนเข้าสู่ substrate 30 cm.	38
26	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี OEM (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	42
27	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี Baffles (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	42
28	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี Pipe Extension (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	43
29	อุณหภูมิที่หน้าตัดทางออก substrate โดยใช้ Volumetric Reaction	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	อุณหภูมิที่หน้าตัดทางออก substrate โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped	44
31	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี OEM (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	45
32	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี Baffles (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	46
33	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี Pipe Extension (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	46
34	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิทางออก substrate	47
35	ประสิทธิภาพการลดปริมาณ CO โดยใช้ Volumetric Reaction และ LH-Lumped	48
36	ประสิทธิภาพการลดปริมาณ C ₃ H ₈ โดยใช้ Volumetric Reaction และ LH-Lumped	48
37	การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี OEM (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	49
38	การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี Baffles (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	50
39	การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี Pipe Extension (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped	50
40	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวน้ำมันทางเข้า substrate	51
41	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ	52
42	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี Baffles ที่ระยะต่างๆ	52
43	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี Pipe Extension ที่ระยะต่างๆ	53
44	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C ₃ H ₈ กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ	54
45	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C ₃ H ₈ กรณี Baffles ที่ระยะต่างๆ	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 กรณี Pipe Extension ที่ระยะต่างๆ	55
47	ค่าอุณหภูมิทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิไอเสียต่างๆ (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir-Hinshelwood Lumped	55
48	ค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณ CO และ C_3H_8 ที่อุณหภูมิไอเสียต่างๆ (ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir-Hinshelwood Lumped	56
49	ความดันตกคร่อมที่ทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (ก) OEM (ข) Baffles (ค) Pipe Extension	57
50	การหมุนวนของก๊าซไอเสียที่หน้า substrate (ก) OEM (ข) Pipe Extension	57
51	ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร	59
52	ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร	59
53	ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร	60
54	ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร	61
55	ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร	61
56	ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร	62
57	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร	62
58	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร	63
59	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การเขียนสมการ Langmuir Hinshelwood Lumped ให้อยู่ในรูป ภาษาคอมพิวเตอร์ C++	78
ข1	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมหลังการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction	80
ข2	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมหลังการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped	81
ข3	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C ₃ H ₈ ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction	82
ข4	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C ₃ H ₈ ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped	83
ข5	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction	84
ข6	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped	85
ข7	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมก่อนการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction	86
ข8	ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมก่อนการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	Permeability; ค่าการยอมให้ซึมผ่าน
λ	=	Lambda; อัตราส่วนสมมูลระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง
ΔP	=	Pressure Drop; ความดันตกคร่อม (Pa)
ρ	=	Density; ความหนาแน่น (kg/m^3)
μ	=	Viscosity; ความหนืด
%	=	เปอร์เซ็นต์, ร้อยละ
%vol.	=	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
A	=	Frequency Factor; แฟกเตอร์ความถี่
A/F	=	อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง
bar	=	หน่วยวัดความดัน ($100,000 \text{ N/m}^2$)
$^{\circ}\text{C}$	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
cc	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
CH_4	=	ก๊าซมีเทน (ppm)
CI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
CNG	=	ก๊าซธรรมชาติสามารถอัดตัวได้
CO	=	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Vol%)
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Vol%)
CPSI	=	Cell Per Square Inch
D	=	Dimension; มิติ
DDF	=	Diesel Dual Fuel engines; เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
DOC	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
DPF	=	Diesel Particulate Filters; เครื่องกรองเขม่าอนุภาค
Ea	=	Activation Energy; พลังงานก่อกัมมันต์
ECU	=	อุปกรณ์ Electronic Control Unit

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

EGR	=	ระบบ Exhaust Gas Recirculation คือ การนำเอาก๊าซไอเสียหลังจากกระบวนการเผาไหม้กลับมาเผาไหม้ใหม่เพื่อลดการชิงจุดระเบิด (Knock) และ ลด NO_x
EHC	=	Electrically Heater Catalyst; เครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า
FLT	=	วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้น
g/ft^3	=	หน่วยวัดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี (กรัมต่อลูกบาศก์ฟุต)
H_2	=	ก๊าซไฮโดรเจน (ppm)
H	=	อะตอมของไฮโดรเจน
HC	=	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
H_2O	=	น้ำ
K	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
k(T)	=	Rate Constant; ค่าคงที่อัตรา
kg/h	=	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
L	=	ลิตร
LH	=	Langmuir-Hinshelwood
LPG	=	Liquid Petroleum Gas; ก๊าซหุงต้ม
LT	=	Light-off Temperature
mm.	=	มิลลิเมตร
MW	=	Molecular Weight, น้ำหนักของอะตอม
N	=	อะตอมของไนโตรเจน
NO	=	ไนตริกออกไซด์ (ppm)
NO_x	=	ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)
NO_2	=	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)
NVO	=	ระบบ Negative Valve Overlap
O	=	อะตอมของออกซิเจน
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน (%)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

OEM	=	Original Equipment Manufacturer
Pa	=	Pascal; หน่วยวัดความดัน
Pd	=	สารพาราดีม
PGM	=	Precious Group Metal
PM	=	มลพิษอนุภาค
Pt	=	สารแพลตตินัม
ppm	=	Part Per Million, อัตราหนึ่งในล้านส่วน
ppmC	=	อัตราหนึ่งในล้านส่วนของคาร์บอน 1 อะตอม
PRE-CAT	=	เครื่องฟอกไอเสียตัวแรกสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ
R	=	Universal Gas Constant; ค่าคงที่ของแก๊ส
rpm	=	รอบต่อนาที
S	=	ซัลเฟอร์
s	=	หน่วยวัดเวลา (วินาที)
SD	=	Standard Deviation; ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
SO ₃	=	ซัลเฟต
SOF	=	Soluble Organic Fraction
t	=	Time; เวลา
TDC	=	Top Dead Center; ศูนย์ตายบน
Temp.	=	Temperature; อุณหภูมิ
THC	=	ผลรวมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
UDF	=	User Define Function
v	=	Velocity; ความเร็ว (m/s)

การศึกษาการปรับปรุงการกระจายตัวการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่ง ปฏิกิริยาแบบดีเซลออกซิเดชันแคตตาไลสต์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A Computational Fluid Dynamics Study on Improving Raw Fuel Injection Distributions in front of Diesel Oxidation Catalysts

คำนำ

สืบเนื่องจากการที่ราคาน้ำมันในตลาดโลกเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผู้ใช้รถส่วนมากหันไปใช้เชื้อเพลิงทางเลือกเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะเป็นก๊าซโซฮอลล์ ไบโอดีเซล ก๊าซธรรมชาติ (Compress Natural Gas, CNG) ก๊าซหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas, LPG) อย่างไรก็ตามการนำเชื้อเพลิงทางเลือกเหล่านี้มาใช้จะต้องคำนึงถึงสมรรถนะด้านต่างๆของรถยนต์กล่าวคือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันต่ำ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูง และมลพิษที่ออกจากเครื่องยนต์ผ่านตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด

ทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกที่น่าสนใจนั้นคือการใช้ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากราคาก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยในขณะนี้มีราคาถูก เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel Dual Fuel, DDF) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติ ซึ่งข้อดีของเครื่องยนต์ชนิดนี้คือ ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลมาเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมน้อยมาก มีก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) กับเขม่า (Soot) ต่ำ แต่ข้อเสียของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมคือมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (THC) และ ก๊าซมีเทน (CH_4) มาก (Karim *et al.*, 1993; Wannatong *et al.* 2007, 2009) ซึ่งก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจะออกจากเครื่องยนต์และผ่านเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Converter) เพื่อทำให้มีปริมาณที่น้อยลง

อย่างไรก็ตามในบางสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์มีอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ต่ำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ Diesel Oxidation Catalyst (DOC) ไม่สามารถที่จะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิจุดติดไฟ (Light-off temperature, LT) ของก๊าซมีเทนได้เราจึงต้องหาวิธีที่จะเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีที่เราสนใจก็คือการใช้ Raw-Fuel Injection ในการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธี Raw-Fuel Injection จะถูกติดตั้ง

ระหว่างเทอร์โบชาร์จกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นระบบที่ฉีดน้ำมันดีเซลไปคลุกเคล้ากับก๊าซไอเสียที่ออกจากเทอร์โบชาร์จ เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ในที่นี้คือน้ำมันดีเซล) ที่ได้ก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) (Wirojsakunchai *et al.*, 2009; Noipeng *et al.*, 2011)

อย่างไรก็ตามปัญหาหนึ่งที่สำคัญในการใช้ Raw-Fuel Injection คือ ปริมาณน้ำมันที่มากเกินไปจนความจำเป็นเนื่องการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ความร้อนที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาเคมีเป็นสาเหตุในการเพิ่มอุณหภูมิก๊าซไอเสียอย่างรวดเร็ว ซึ่งในกรณีทำให้ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Stress) เพิ่มขึ้นอย่างมาก จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถทำให้ substrate เสียหายจากการหลอมเหลว (Melting) หรือ แตกร้าว (Cracking) (Grobler and Fuls, 2005; Zhan *et al.*, 2006)

แนวทางการปรับปรุงการกระจายตัวของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาพบได้มากในงานวิจัยของเครื่องกรองเขม่าอนุภาค (Diesel Particulate Filter, DPF) เมื่อ Soot ถูกดักจับอย่างไม่สม่ำเสมอภายใน substrate ทำให้เกิดการ Uncontrolled Regeneration ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายใน DPF (Lee and Rutland, 2012) นอกจากนี้หลายงานวิจัยได้มุ่งเน้นที่การปรับปรุงการไหลหน้า substrate อีกด้วย (Girard *et al.*, 2006; Hilden and Crelline, 2006; Zhan *et al.*, 2006).

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการไหลของละอองฝอยของน้ำมันดีเซลที่ฉีดด้วยวิธี Raw-Fuel Injection เพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของน้ำมันดีเซลให้มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาและศึกษาถึงผลกระทบของการกระจายตัวดังกล่าวต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการกระจายตัวของน้ำมันแบบวิธี Raw Fuel Injection ที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของน้ำมันให้สม่ำเสมอก่อนเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆที่จะส่งผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาหลังการปรับปรุงการกระจายตัวโดยใช้การออกแบบการทดลอง

ขอบเขตงานวิจัย

1. กำหนดให้น้ำมันดีเซลเป็นตัวแทนของไฮโดรคาร์บอน (ในที่นี้คือ C_3H_8) ซึ่งจะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซไอเสียในเครื่องฟอกไอเสีย
2. งานวิจัยนี้ไม่รวมผลกระทบของเขม่าไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมต่อการทำงานของเครื่องฟอกไอเสีย
3. ศึกษาผลกระทบของ Raw Fuel Injection ต่อก๊าซไอเสียที่ได้จากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเฉพาะช่วงภาระปานกลาง
4. กำหนดให้การไหลทางเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบเอกรูป

การตรวจเอกสาร

1. มลพิษหลักในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในทั้งเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ต่างเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญในเมืองและมีส่วนทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน เกิดฝนกรด หมอกปนควัน กลิ่น รวมทั้งปัญหาระบบทางเดินหายใจและสุขภาพของมนุษย์ โดยในตอนนี้จะอธิบายถึงลักษณะเฉพาะของมลพิษที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการการเผาไหม้ ซึ่งการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-Fuel Ratio, A/F) เป็นหลัก โดยเกิดขึ้นเมื่อสารผสมหนา (Fuel Rich) ทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้คาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และเกิดขึ้นในแก๊สที่เผาไหม้แล้วซึ่งมีอุณหภูมิสูงแม้ว่าจะเป็นการเผาไหม้สารผสมที่บาง (Lean Burn) ก็ตาม โดยเกิดขึ้นจากการแตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก หลังจากนั้นในจังหวะลูกสูบขยายตัวกระบวนการออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะหยุดเมื่ออุณหภูมิของแก๊สที่เผาไหม้แล้วต่ำลง โดยปกติแล้วกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้นจะใช้สารผสมบางจึงทำให้ปัญหาการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นไม่ใช่ปัญหาหลักในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้นจะเกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ (การเผาไหม้เกิดขึ้นบริเวณที่เป็นสารผสมหนา)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) เป็นมลพิษที่เกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เกิดการเผาไหม้หรือเผาไหม้บางส่วน โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะของแข็งจะเป็นส่วนประกอบของมลพิษอนุภาค (Particulates Matter, PM) การเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้นจะแตกต่างกับการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ โดยในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟนั้นการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นจากสารผสมบางส่วนไหลเข้าไปในช่องระหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบ และผนังกระบอกสูบ ในจังหวะการอัดก๊าซที่อยู่ในช่องนี้ส่วนใหญ่จะไม่ถูกเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เนื่องจากทางเข้าของช่องเหล่านี้แคบเกินกว่าที่เปลวไฟจะเข้าไปได้ โดยก๊าซที่อยู่ในช่องจะไหลออกจากช่องในช่วงหลังของกระบวนการขยายตัวและในช่วง

กระบวนการคาย (องค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซนี้จะเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ยังไม่เผาไหม้) การเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ และจะไม่ขึ้นกับ A/F ซึ่งการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากสองสาเหตุหลัก ได้แก่ สาเหตุแรกสารผสมบางเกินไปที่จะเกิดการเผาไหม้ เนื่องจากลักษณะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้น เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่เข้าใกล้ศูนย์กลางบัพ ซึ่งส่งผลให้การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่สม่ำเสมอ ทำให้ภายในห้องเผาไหม้บางส่วนมีสารผสมหนา และบางส่วนมีสารผสมบาง ซึ่งการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีสารผสมหนา แล้วบางส่วนที่เป็นสารผสมบางนั้นอาจถูกเจือจางด้วยอากาศ จนทำให้สารผสมบางเกินไปเปลวไฟที่แพร่ขยายมาถึงไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Flame Quenching) จึงส่งผลให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขึ้น สาเหตุที่สองเกิดจากระบบการฉีดเชื้อเพลิง ที่จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงสิ้นสุดลงอาจมีเชื้อเพลิงบางส่วนเข้าไปในรูของหัวฉีดซึ่งส่งผลให้การระเหยตัวของเชื้อเพลิงช้าลง และประสิทธิภาพในการผสมกับอากาศลดลง

ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ประกอบไปด้วยไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) โดยการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยที่อุณหภูมิสูงอัตราการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ก็จะสูงขึ้น โดยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 K ขึ้นไป โดยปฏิกิริยาในการเกิดไนตริกออกไซด์นั้นถูกอธิบายโดย Extension Zeldovich Mechanism (Turn, 2006) ดังแสดงในสมการที่ (1), (2) และ (3)



โดยในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือไนตริกออกไซด์ โดยการก่อตัวของไนตริกออกไซด์ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะเกิดจากไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) ทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิมากกว่า 1,800 K โดยในช่วงสภาวะคงที่ (Steady State) การเกิดไนตริกออกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การลดการเกิดไนตริกออกไซด์สามารถทำได้ 2 วิธีคือลดบริเวณที่มีสารผสมบางในกระบวนการเผาไหม้และลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ของสารผสมบาง

มลพิษอนุภาค (Particulates Matter, PM) เป็นมลพิษหลักที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยมลพิษอนุภาคประกอบด้วยเขม่า (Soot), Soluble Organic Fraction (SOF), สารซัลเฟต (SO₃) และขี้เถ้า (Ash) โดยในส่วนนี้จะมุ่งเน้นอธิบายเขม่าเป็นหลักเนื่องจากส่วนประกอบหลักของมลพิษอนุภาคที่ออกมาจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

Soot Particles เกิดขึ้นจากอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวขึ้นเป็นกลุ่มหรือเป็นห่วงโซ่ เขม่าจะก่อตัวขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โดยเป็นการจับตัวกันระหว่าง อะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซแล้วกลั่นตัวอยู่ในสถานะของแข็ง โดยกระบวนการในการจับตัวกันนั้นจะเกิดขึ้นที่สถานะที่มีออกซิเจนต่ำบริเวณแกนของสเปร์ย์ ซึ่งปฏิกิริยาของการเกิดเขม่า เรียกว่า Pyrolysis Reaction



ซึ่งปัจจัยในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาคือ ส่วนผสมหนาและอุณหภูมิสูง โดยการเกิดเขมานั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามการออกแบบเครื่องยนต์และค่าที่ในปฏิบัติการ

ก๊าซมีเทน (CH₄) เป็นก๊าซที่มีอยู่ในก๊าซธรรมชาติซึ่งมีความเสถียรภาพสูง การเกิดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีลักษณะคล้ายคลึงกับการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟเกิด โดยเกิดจากการนำก๊าซมีเทนในสถานะก๊าซผสมเข้าไปแบบ Premixed Charge ก๊าซมีเทนบางส่วนไหลเข้าไปในช่องระหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบ และผนังกระบอกสูบ ในจังหวะการอัดก๊าซที่อยู่ในช่องนี้ส่วนใหญ่จะไม่ถูกเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เนื่องจากทางเข้าของชอกเหล่านี้แคบเกินกว่าที่เปลวไฟจะเข้าไปได้ โดยก๊าซที่อยู่ในชอกจะไหลออกจากชอกในช่วงหลังของกระบวนการขยายตัวและในช่วงกระบวนการคาย หากก๊าซมีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้จะเปลี่ยนแปลงเป็น ไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ (H₂O) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 K ดังสมการที่ (5), (6), (7) และ (8)



2. การลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ

มลพิษหลักในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมี 5 ชนิดคือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์, เขม่า, และก๊าซมีเทน ซึ่งการลดมลพิษของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยวิธีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ (In-Cylinder Combustion Method) เป็นการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางเคมีในกระบอกสูบในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ซึ่งมีวิธีที่น่าสนใจอยู่ 3 วิธีคือ Exhaust Gas Recirculation (EGR), Negative Valve Overlap (NVO) หรืออีกชื่อคือ Internal Exhaust Gas Recirculation (IEGR) และ Injection Strategies

วิธี EGR เป็นการนำก๊าซไอเสียที่ผ่านการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้วนกลับมาใช้ใหม่โดยมีท่อ EGR ดึงก๊าซไอเสียที่ทางออกห้องเผาไหม้มาปล่อยที่ท่อร่วมไอดี (Kim and Lee, 2006) วิธี IEGR จะคล้ายกับ EGR คือนำก๊าซไอเสียมาใช้เหมือนกัน แต่ควบคุมการปิดวาล์วไอดีก่อนถึงศูนย์ตายบน (Top Dead Center, TDC) เพื่อกักเก็บก๊าซไอเสียเพื่อนำมาใช้ในวัฏจักรถัดไป (Shi *et al.*, 2006) และวิธี Injection Strategies เป็นการฉีดน้ำมันหลายครั้งในห้องเผาไหม้โดยใช้ ECU ในการควบคุมการฉีด (Aroonsrisopon *et al.*, 2009) ซึ่งข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแสดงดังตารางที่ 1 (ณฐมี, 2554)

ตารางที่ 1 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยการเผาไหม้ในกระบอกสูบ

วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Exhaust Gas Recirculation (EGR)	- ลด NO_x - ไม่ส่งผลต่ออัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน - ลดการชิงการจุดระเบิด (Knock) - ส่งผลต่อความดันและอัตราการสูญเสียความร้อนในกระบอกสูบน้อย	- ปริมาณ Soot เพิ่มขึ้น - เมื่อใช้ไปนานๆประสิทธิภาพของ EGR จะลดลงเนื่องจากมี Soot มาสะสมที่บริเวณท่อ EGR
Negative Valve Overlap (NVO) or Internal EGR (IEGR)	- ลด HC, CO และ Soot เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	- ที่ภาระสูง NO_x เพิ่มขึ้นมาก - เกิด Knock ที่ High load - เกิด Pumping loss ทำให้ Thermal efficiency ลดลง ส่งผลให้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น
Injection Strategies	- สามารถปรับเปลี่ยนองศาการฉีดน้ำมันและรูปแบบการฉีดน้ำมันให้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานของเครื่องยนต์ได้ ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพในการควบคุมการเผาไหม้และการลดมลพิษได้ดี	- การควบคุมจังหวะการฉีดน้ำมันให้เหมาะสมกับกระบวนการเผาไหม้มีความซับซ้อน

ที่มา: ญญมี (2554)

3. การลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการเผาไหม้ด้วยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากการใช้การลดมลพิษภายในกระบอกสูบแล้วยังมีมลพิษออกมาที่สูงเพื่อที่จะลดปริมาณมลพิษให้เหลือน้อยลงยิ่งขึ้น เราจำเป็นต้องใช้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีหลากหลายชนิดซึ่งแล้วแต่การนำไปใช้งานว่าต้องการใช้ลดมลพิษตัวไหน ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ชนิด Diesel oxidation catalyst (DOC) เพราะถูกออกแบบมาเพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แล้วคายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, น้ำและความร้อนออกมาดังสมการที่ (9) และ (10)

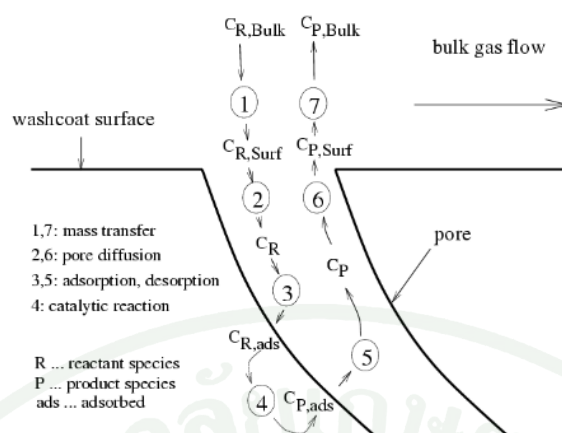


โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีดังนี้ (Turns, 2000)

1. ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้นจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากจำนวนอนุภาคของสารตั้งต้นมีการชนกันมากขึ้น
2. อุณหภูมิ สารตั้งต้นอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานสูงขึ้นและเคลื่อนที่เร็วขึ้นทำให้ชนกันมากขึ้น
3. พื้นที่ผิวสัมผัส โมเลกุลของสารตั้งต้นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากมีการสัมผัสกันมากขึ้น
4. ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารเคมีที่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปลดพลังงานการกระตุ้นปฏิกิริยา
5. ชนิดของสารตั้งต้นขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวและโครงสร้างของโมเลกุลและพบว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภท Alkanes มีความเสถียรมากที่สุด

การเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาของสารที่มีเนื้อต่างชนิดกัน (Heterogeneous) แสดงไว้ดังภาพที่ 1 (Hayes et al., 1997) ซึ่งได้มีการอธิบายไว้ดังนี้ (Froment and Bischoff, 1990)

1. Mass Transfer สารตั้งต้นที่ไหลเข้ามาจะมีการทำปฏิกิริยากันเองใน Bulk gas จนถึงพื้นผิวของสารเคลือบ Substrate (Washcoat)
2. Pore Diffusion สารตั้งต้นจะแพร่ไปที่รูพรุนของพื้นผิว (สารเร่งปฏิกิริยาเคมีส่วนมากอยู่ที่รูพรุนของพื้นผิว)
3. Adsorption เกิดการดูดซับสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว
4. Catalytic Reaction เกิดการทำปฏิกิริยาของสาร โดยขึ้นอยู่กับ Rate limiting step ของแต่ละสารที่ทำปฏิกิริยากัน
5. Desorption เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วสารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมา
6. Pore Diffusion สารผลิตภัณฑ์จะแพร่ออกมาที่พื้นผิวของสารเคลือบ Substrate
7. Mass Transfer สารผลิตภัณฑ์ไหลออกไปใน Bulk gas



ภาพที่ 1 ภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารทั่วไปในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Hayes *et al.* (1997)

จากงานวิจัยต่างๆพบว่าชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาหรืออัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาภายใน DOC มีส่วนในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของสารเร่งปฏิกิริยาก็พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน (Nakane 2005; Lapisardi *et al.*, 2006)

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

ในช่วงรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ซึ่งมีอุณหภูมิไอเสียค่อนข้างต่ำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถดมลพิษบางชนิดได้เช่น CH_4 ที่ต้องการอุณหภูมิที่เกินกว่า $400^\circ C$ (Moallemi *et al.*, 1999) จึงต้องหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา นั่นคือ Fast Light-off Temperature (FLT) เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้สามารถเข้าสู่จุดอุณหภูมิการทำงานได้เร็วขึ้น

Light-off Temperature (LT) คือ อุณหภูมิที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถลดปริมาณมลพิษไอเสียได้ 50% เช่น ใน Three-Way Catalyst จุด Light-off Temperature อยู่ที่ประมาณ $250^\circ C$ ส่วน DPF จุด Light-off Temperature อยู่ที่ประมาณ $350^\circ C$ (Wirojsokunchai *et al.*, 2009) ทั้งนี้ Light-off Temperature ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งปัจจัยที่เกิดจากคุณลักษณะของไอเสียหรือ

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

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

วิธี EHC เป็นการติดตั้งเครื่องทำความร้อนทางไฟฟ้า (Electrical heater) ด้านหน้าก่อนเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อยกอุณหภูมิก๊าซไอเสียให้สูงขึ้น (Locker *et al.*, 2004) วิธี Fuel Burner เป็นการติดตั้ง Fuel Burner ที่ด้านหน้าก่อนเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Wirojsakunchai *et al.*, 2007) วิธี Microwave เป็นการโดยติดตั้งอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟในระบบไอเสีย ซึ่งคลื่นไมโครเวฟจะกระจายอยู่ในแผ่นกรอง (Filter) เพื่อกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซไอเสียทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Garner *et al.*, 1989) ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแสดงดังตารางที่ 2 (ณภูมิ, 2554)

ระบบที่สอง Passive Systems เป็นการออกแบบระบบการทำงานของไอเสียที่สามารถใช้ร่วมกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึง Light-off Temperature อย่างรวดเร็ว โดยใช้วิธี Reverse flow, Post fuel Injection, และ Raw fuel Injection

วิธี Reverse Flow เป็นการดึงก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้ไหลวนในเครื่องฟอกไอเสียเพื่อยกอุณหภูมิก๊าซไอเสียให้สูงขึ้นและรักษาอุณหภูมิไว้ (Liu *et al.*, 2001) วิธี Post-Fuel Injection หรือวิธีการฉีดน้ำมันหลังการฉีดน้ำมันหลักในช่วงวาล์วไอเสียเปิดในห้องเผาไหม้ เพื่อเพิ่มปริมาณ HC ในการทำปฏิกิริยาทางเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Zheng, 2006) วิธี Raw-Fuel Injection เป็นวิธีที่คล้ายกับ Post-Fuel Injection คือ ฉีดน้ำมันเพื่อเพิ่มปริมาณ HC ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ตำแหน่งการฉีดจะแตกต่างกันคือ มีการติดตั้งหัวฉีดน้ำมันที่ด้านหน้าก่อนเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Chiew *et al.*, 2005) ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแสดงดังตารางที่ 3 (ณภูมิ, 2554)

ตารางที่ 2 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Active Systems

วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Electrically Heated Catalyst (EHC)	- ราคาอุปกรณ์ไม่สูงมากวิธีการไม่ซับซ้อน - สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้รวดเร็วตั้งแต่การะทำงานของเครื่องยนต์ต่ำ - อุปกรณ์มีอายุการใช้งานยาวนาน - ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย - สามารถนำไปใช้งานได้จริง	- มีปัญหาเรื่องการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของรถยนต์ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งานของ EHC ต้องเปลี่ยนไปใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุไฟฟ้ามากกว่าหรือใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการจ่ายไฟที่เพียงพอให้กับฮีตเตอร์
Fuel Burner	- สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วเกือบทุกภาระและรอบการทำงานของเครื่องยนต์	- การออกแบบระบบค่อนข้างยากและมีความซับซ้อน - ระบบต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเยอะ - การควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟในช่วงภาระการทำงานต่างๆของเครื่องยนต์ทำได้ยาก
Microwave	- สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว	- ราคาสูง - มีปัญหาด้านการนำไปใช้จริง - อุปกรณ์มีปัญหาด้านความทนความอายุการใช้งานน้อย

ที่มา: ฅญมี (2554)

ตารางที่ 3 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของวิธีการลดมลพิษด้วยเทคนิค Passive Systems

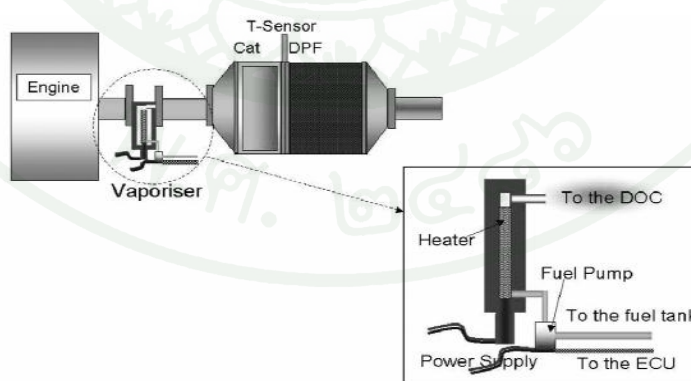
วิธี	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Reverse Flow	- สามารถรักษาอุณหภูมิในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ดี	- มีการทำงานที่ซับซ้อนยากต่อการควบคุม - อุปกรณ์มีอายุการใช้งานสั้น
Post Fuel Injection	- เป็นการให้ความร้อนโดยใช้ประโยชน์จากระบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ทำให้ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม	- ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น - มีน้ำมันเชื้อเพลิงหลุดมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นทำให้เป็นอันตรายต่อน้ำมันหล่อลื่นและเครื่องยนต์
Raw-Fuel Injection	- วิธีการไม่ซับซ้อน - มีราคาถูก - ใช้พลังงานน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ	- ไม่สามารถใช้เพิ่มอุณหภูมิในช่วงภาระเครื่องยนต์ต่ำ (Low Load) ได้เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ไม่สูงมากพอที่จะทำให้ น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไประเหยตัวแล้วทำปฏิกิริยา - อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์มากขึ้น

ที่มา: ฅณูมี (2554)

5. การนำ Raw Fuel Injection มาใช้ลดมลพิษไอเสีย

จากการศึกษาจะพบว่าการใช้ Raw-Fuel Injection เป็นวิธีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไอเสียอย่างรวดเร็วที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูกกว่าวิธีอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การเพิ่มอุณหภูมิแบบอื่นพบว่าวิธีนี้ใช้พลังงานน้อยกว่า แต่ข้อเสียที่พบก็คือ ไม่สามารถใช้งานที่สถานะต่ำได้ เพราะน้ำมันที่ฉีดออกมาไม่สามารถระเหยได้เนื่องจากมีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ต่ำ

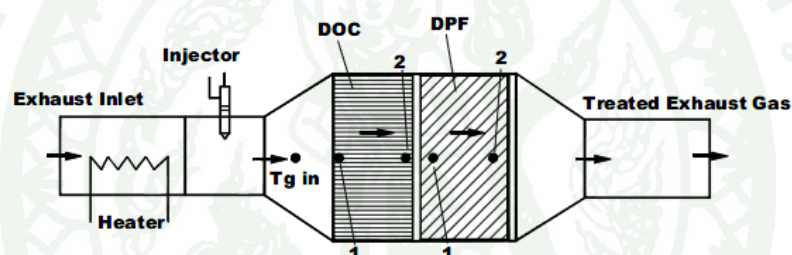
Chiew *et al.* (2005) กล่าวว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่ทางเข้า Diesel Particulate Filter (DPF) โดยใช้วิธี Raw fuel injection เป็นวิธีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไอเสียที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูกกว่าวิธีอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การเพิ่มอุณหภูมิแบบอื่นพบว่าวิธีนี้ใช้พลังงานน้อยกว่า ซึ่งได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ DOC โดยใช้หัวฉีดแบบ Vaporizer แสดงดังภาพที่ 2 กับเครื่องยนต์ขนาด 1.9 ลิตร ที่ความเร็วรอบเครื่อง 1200 rpm พบว่าเมื่อฉีดน้ำมันดีเซล 8 ml/min สามารถเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียจาก 230°C ถึง 530°C แต่ที่อุณหภูมิของไอเสีย 165°C ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิที่ทางออก DOC สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินกว่า 600°C ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ได้ทดลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้วิธี Raw Fuel Injection เปรียบเทียบกับวิธี Post Fuel Injection ซึ่งใช้เครื่องยนต์ขนาด 2 ลิตร โดยเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียจาก 300°C ถึง 700°C และให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1200 rpm และ 2000 rpm สลับไปมาตลอดเวลา พบว่าวิธี Raw Fuel Injection สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้เร็วกว่า และใช้ปริมาณน้ำมันน้อยกว่า Post Fuel Injection ถึง 50%



ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซลของระบบ Raw-Fuel Injection

ที่มา: Chiew *et al.* (2005)

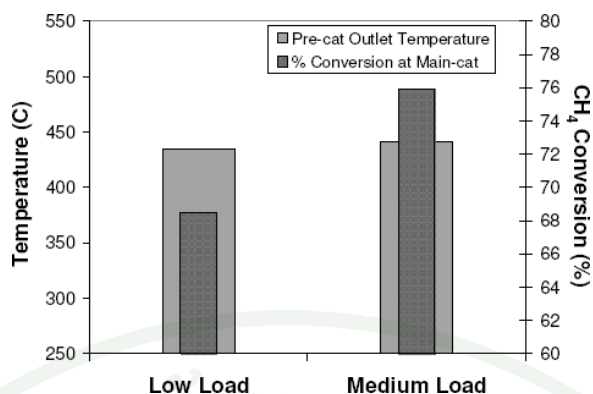
Asad *et al.* (2007) ได้ศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ขนาดเครื่องยนต์ 6 สูบ กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC และ DPF ด้วยวิธี Raw Fuel Injection โดยติดตั้งหัวฉีดน้ำมันของเครื่องยนต์ SI ที่บริเวณท่อไอเสียก่อนถึง DOC 300 มิลลิเมตร และฉีดที่ความดัน 200 kPa (2 Bar) และยังติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าในท่อไอเสียก่อนถึงหัวฉีดน้ำมัน เพื่อให้ความร้อนกับไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์และช่วยในการระเหยของน้ำมันดีเซลกับไอเสีย ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าการเพิ่มปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลส่งผลเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษา ผลกระทบของความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อสังเกตที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1800 RPM สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้มากกว่าที่ความเร็วของเครื่องยนต์ 1400 RPM เนื่องจากที่อัตราการไหลสูง ทำให้อัตราการพาความร้อนระหว่างสารในไอเสียและสารเร่งปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อหยุดฉีดน้ำมันดีเซลพบว่าอุณหภูมิของ DOC ที่ 1800 RPM ลดลงเร็วกว่าที่ 1400 RPM เนื่องจากการสูญเสียความร้อนจากการพาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 แสดงตำแหน่งหัวฉีดน้ำมันดีเซล เครื่องทำความร้อนและเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Asad *et al.* (2007)

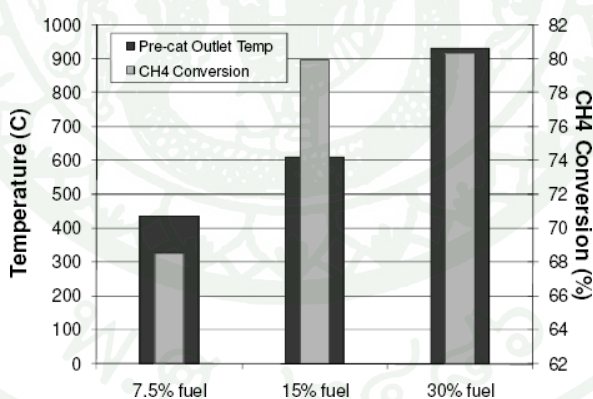
Wirojsokunchai *et al.* (2009) ได้ทำการจำลองการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC ร่วมกับระบบ Raw-Fuel Injection ด้วยโปรแกรม GT-Power เพื่อที่จะทำการลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม โดยทำการทดสอบเครื่องยนต์ 2 กรณี คือ กรณี A ภาระการทำงานเบา (Low Load) ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 240 °C และกรณี B ภาระการทำงานปานกลาง (Medium Load) มีความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย 253 °C โดยมีปริมาณการฉีดน้ำมันของระบบ Raw-Fuel Injection อยู่ที่ร้อยละ 7.5 ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด พบว่าที่ภาระการทำงานเบา และภาระการทำงานปานกลาง สามารถยกอุณหภูมิได้ประมาณ 440 °C และสามารถช่วยลดปริมาณของก๊าซมีเทนได้เกินกว่าร้อยละ 70 ดังที่แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบ CH₄ ที่ภาระการทำงานเบาและปานกลาง

ที่มา: Wirojsokunchai *et al.* (2009)

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณการฉีดน้ำมันของระบบ Raw-Fuel Injection ที่ร้อยละ 7.5, 15 และ 30 ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด พบว่าการฉีดทั้ง 3 แบบ สามารถเพิ่มอุณหภูมิก๊าซไอเสียได้แต่การลดปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ซึ่งการลดปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 80 ดังภาพที่ 5

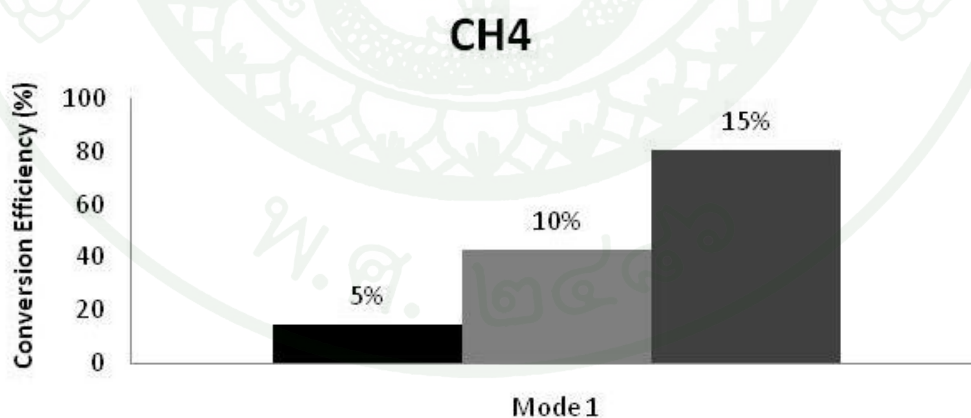


ภาพที่ 5 ผลกระทบของปริมาณการฉีดน้ำมันกับการลดลงของก๊าซมีเทนที่ภาระการทำงานเบา

ที่มา: Wirojsokunchai *et al.* (2009)

Noipheng *et al.* (2011) ได้ศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ DDF กับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC โดยนำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อลดปริมาณ CH₄ ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ด้วยวิธี Raw Fuel Injection โดยติดตั้งหัวฉีดน้ำมัน

ของเครื่องยนต์รถมอเตอร์ไซด์ ที่บริเวณท่อไอเสียหลังทางออกเทอร์โบชาร์จเจอร์ โดยทดสอบ ปริมาณการฉีดน้ำมันที่ 5%, 10% และ 15% duration time และฉีดที่ความดัน 5 Bar ที่ความเร็วรอบ เครื่อง 2400 rpm ที่สภาวะปานกลาง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิมีดังต่อไปนี้ ในช่วงที่ ฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 5%, 10%, และ 15% duration time พบว่ามี ประสิทธิภาพของการลด CH_4 เพิ่มขึ้นเป็น 14.60%, 42.68% และ 80.45% ดังภาพที่ 6 นอกจากนี้ ชนิดของสาร Catalyst ที่อยู่ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ยังมีสารพาเลเดียมมาก (Palladium, Pd) จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาก อีกทั้งอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 200°C สูงเพียงพอ ที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีและสามารถลดปริมาณ CH_4 ได้ ไม่ เพียงแต่อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์เท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 แต่ปริมาณ CO, THC, และ CH_4 ที่ออกจากเครื่องยนต์ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการลด CH_4 ด้วยเหมือนกัน กล่าวคืออุณหภูมิไอเสียค่อนข้างต่ำ (แต่มีอุณหภูมิไอเสียสูงกว่า 200°C) จะมี ปริมาณ CO, THC, และ CH_4 ออกจากเครื่องยนต์เป็นปริมาณมากส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เพิ่มขึ้นภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าอุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์ที่ 170°C เป็นอุณหภูมิที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถึงแม้ว่ามีปริมาณ CO, THC, และ CH_4 ที่ออกจากเครื่องยนต์มาก ก็ตาม นอกจากนี้ค่า Lambda ของก๊าซไอเสีย ถ้าอยู่ช่วงสภาวะเผาไหม้พอดี ($\lambda=1$) จะมี ประสิทธิภาพของการลด CH_4 สูงกว่า Lambda ที่มีสภาวะเผาไหม้บาง ($\lambda>1$)



ภาพที่ 6 ผลกระทบของปริมาณการฉีดน้ำมันกับการลดลงของก๊าซมีเทนที่ภาระการทำงานเบา

ที่มา: Noipheng *et al.* (2011)

5. การเสื่อมสภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีอยู่ด้วยกัน 4 ประการคือ

1. ความเสียหายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงเกินไป (Overheating) มักเกิดขึ้นจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ เมื่อผ่านเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไปทำปฏิกิริยาสารเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเผาไหม้ หากมีปริมาณที่มากก็จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการหลอมละลาย (Melt) ของเซรามิก (ประมาณ $1,200 - 1,500^{\circ}\text{C}$)
2. ความเสียหายอันเนื่องมาจากการอุดตัน เกิดขึ้นจากส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเข้าไปอุดตันหรือเคลือบผิวใน substrate ส่งผลทำให้ความสามารถในการลดก๊าซไอเสียลดลง (Stein, 1996; Tan *et al.*, 2004)
3. ความเสียหายอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Shock) เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเช่น ขับรถผ่านแอ่งน้ำ เมื่อเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีความร้อนสูงผ่านน้ำที่มีความเย็นทำให้วัสดุที่หุ้ม substrate เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูง – ต่ำ เป็นเวลานานของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์อันเนื่องมาจากสภาพการขับขีรถยนต์ หรือเกิดจาก THC ที่ไม่ถูกเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ เมื่อเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกร้าว (Crack) ภายใน substrate (Nagel *et al.*, 2000)
4. ความเสียหายอันเนื่องมาจากการกระทบกระเทือนจากภายนอก เกิดการชน การกระแทกกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดการแตกหักขึ้นภายในได้

การฉีดด้วย Raw-Fuel มีปัญหาบางประการเช่น ไม่สามารถใช้งานได้ที่รอบเดินเบาเนื่องจากอุณหภูมิเชื้อที่ต่ำเกินไป ทำให้น้ำมันที่ฉีดไม่ระเหย (Chiew *et al.*, 2005; น้อยเพ็ง, 2554) หรือ เกิดการแตกร้าว หรือ เกิดการหลอมละลายภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

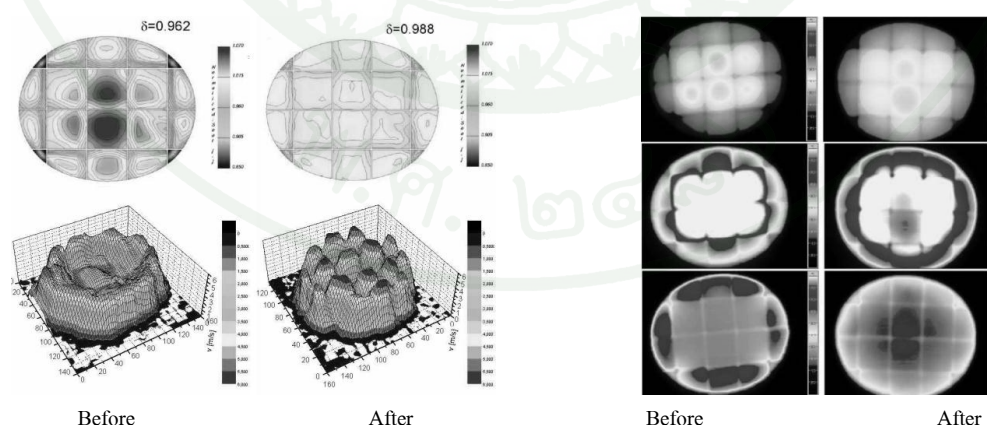
การแตกร้าวภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยปัญหาที่เกิดขึ้นมักเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำมัน น้ำมันที่ถูกฉีดจะสะสมที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามากเกินไป เมื่อเกิดการออกซิเดชันของ HC ซึ่งทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึง

เกิดการแตกต่างของอุณหภูมิ จนนำไปสู่การแตกตัวของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นนี้มีความคล้ายคลึงกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับ DPF ซึ่งในส่วนของ DPF จะเกิดขึ้นจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเขม่า เมื่อทำการ Regeneration อาจทำให้เขม่าที่สะสมเกิดจุดร้อน (Hot Spot) (Raggie *et al.*, 2006; Koltsakis *et al.*, 2007; Ricoult, 2005)

6. วิธีการปรับปรุงกระจายตัวของน้ำมัน

ในการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของละอองน้ำมัน ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการกระจายตัวของ Soot ที่ใช้กับ DPF มาใช้เพราะว่าใน DPF จะใช้เทคนิคนี้เพื่อป้องกันการสะสมของ Soot เพราะเมื่อเกิดกระบวนการ Regeneration Soot ที่สะสมภายใน DPF จะถูกเผาไหม้ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายใน DPF สูงขึ้น ถ้าบริเวณนั้นมี Soot สะสมอยู่มาก อุณหภูมิก็จะยิ่งสูงมากขึ้นตามไปด้วยจนเป็นเหตุให้เกิดการจุดติดไฟของ Soot ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายภายใน DPF จึงได้นำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบ Raw-Fuel Injection เพื่อให้ละอองน้ำมันกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น

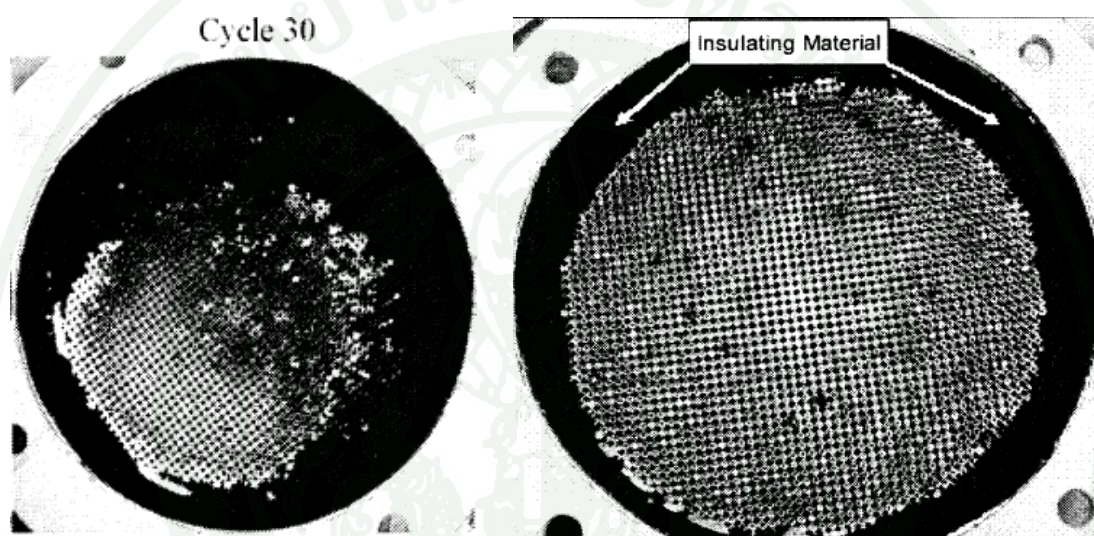
Ranalli *et al.* (2004) ได้ทำการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ Soot ภายใน DPF โดยทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิก่อนที่จะปรับปรุง Down Pipe และ Inlet Cone กับอุณหภูมิหลังปรับปรุงแล้วพบว่าเมื่อทำการปรับปรุง Down Pipe และ Inlet Cone ให้สามารถการกระจายตัวของ Soot สม่ำเสมอกันก่อนที่จะเข้าสู่ DPF พบว่าจะช่วยทำให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอยิ่งขึ้น และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ Soot ยังลดลงอีกด้วยดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การกระจายตัวของ Soot กับอุณหภูมิ (ซ้าย) ก่อนปรับปรุง และ (ขวา) หลังปรับปรุง

ที่มา: Ranalli *et al.* (2004)

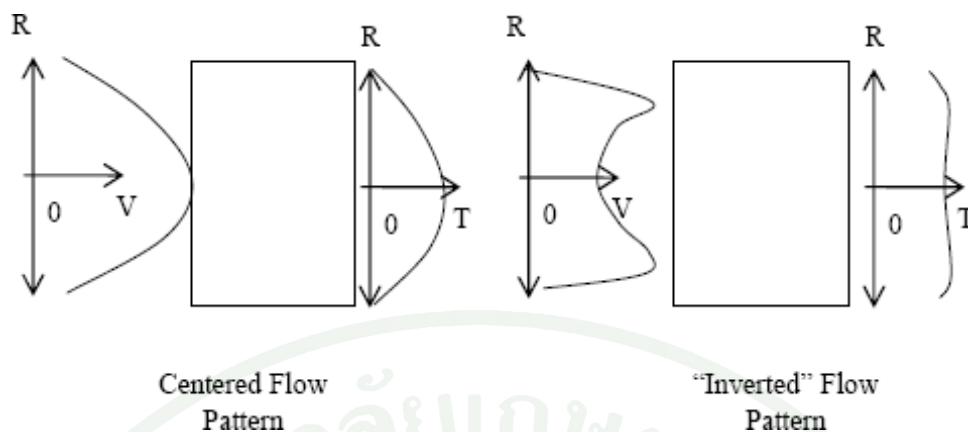
Reggie *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองเพื่อที่จะปรับปรุงการกระจายตัวของ Soot ก่อนเข้าสู่ DPF เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากเกิดจุดร้อนภายใน DPF โดยทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ภาระการทำงานปานกลาง ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 650 °C และทำการเปรียบเทียบ DPF ที่ใช้ Diffuser กับ DPF ที่ไม่ใช้ โดยทำการติดตั้ง Diffuser ที่บริเวณ Inlet Cone และทำการ Regeneration DPF 30 cycle พบว่าเมื่อผ่านการ Regeneration ไปถึง 30 cycle DPF ที่ไม่ได้ติดตั้ง Diffuser จะมี Soot สะสมอยู่ทั่วหน้าตัด (ส่วนที่มีสีดำในภาพ) แต่เมื่อใช้ Diffuser จะทำให้การกระจายตัวของ Soot ดีขึ้นจนแทบจะไม่มี Soot สะสมอยู่เลยดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การกระจายตัวของ Soot ที่ 30 cycle (ซ้าย) ก่อนติดตั้ง Diffuser และ (ขวา) หลังติดตั้ง Diffuser

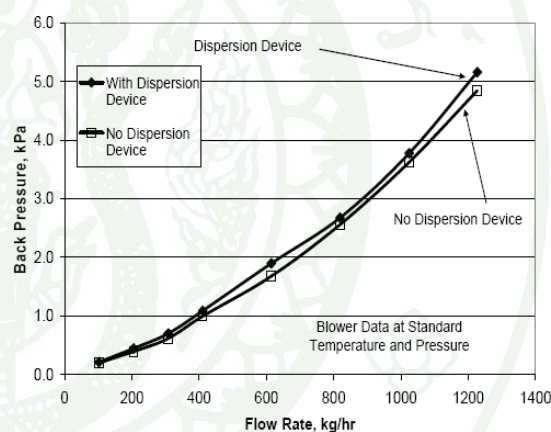
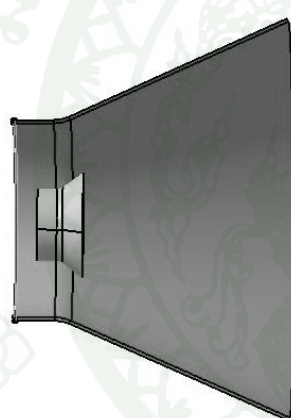
ที่มา: Reggie *et al.* (2006)

Girard *et al.* (2006) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับลักษณะของการไหลที่เข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาว่า การไหลไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเป็น Centered Flow เสมอไปเนื่องจาก Centered Flow จะส่งผลให้แกนกลางของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีอุณหภูมิสูงมากเกินไป และได้ทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการไหลแบบ Centered Flow กับ Inverted Flow ดังภาพที่ 9 โดยติดตั้ง Dispersion Device ที่บริเวณ Inlet Cone ซึ่ง Inverted Flow มีหน้าที่ในการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของ Back Pressure ก่อนติดตั้งกับหลังติดตั้ง พบว่า Back Pressure เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 รูปแบบของ Centered Flow กับ Inverted Flow

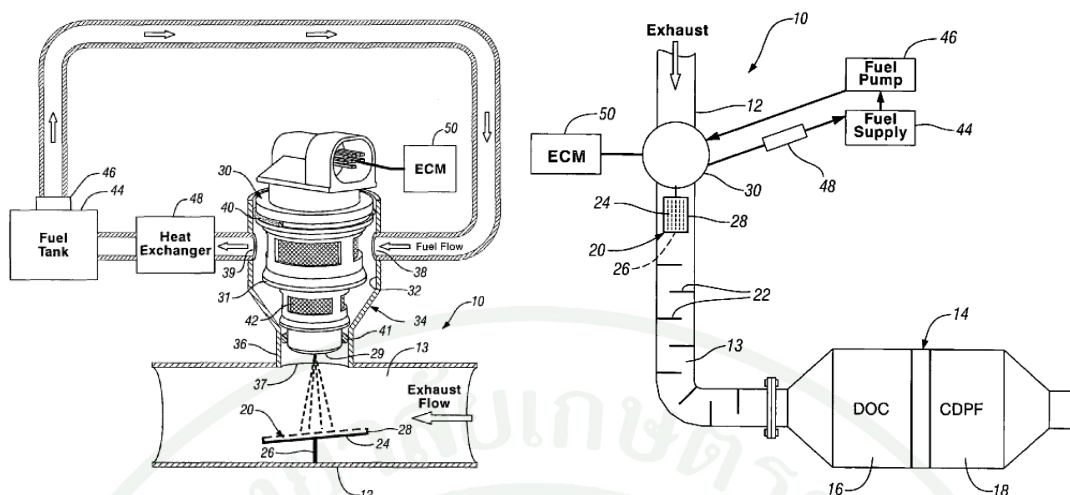
ที่มา: Girard *et al.* (2006)



ภาพที่ 10 แสดง Dispersion Device ที่ติดตั้งบริเวณ Inlet Cone และ ผลของ Back Pressure ก่อนติดตั้งและหลังติดตั้ง

ที่มา: Girard *et al.* (2006)

Hilden *et al.* (2006) ได้ติดตั้งแผ่นความร้อนในท่อไอเสีย บริเวณที่น้ำมันดีเซลถูกฉีดออกมาในระบบ Raw-Fuel Injection เพื่อช่วยให้น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดจากหัวฉีดความดันต่ำในระบบ Raw-Fuel Injection ระเหยได้ดีขึ้น สามารถใช้ร่วมกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC และ DPF นอกจากนี้ยังติดตั้งแผ่นความร้อนเพิ่มก่อนถึงเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา สามารถเพิ่มการคลุกเคล้าและการแตกเป็นละอองน้ำมันดีเซลก่อนเข้า DOC มากขึ้นดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Hilden *et al.* (2006)

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดย Raw Fuel Injection พบว่าปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ปริมาณการฉีดน้ำมัน, คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของไอเสีย, อุณหภูมิไอเสียออกจากเครื่องยนต์, ความเข้มข้นขององค์ประกอบของก๊าซไอเสีย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจเอกสารมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เพื่อศึกษาปัจจัยที่ช่วยลดการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

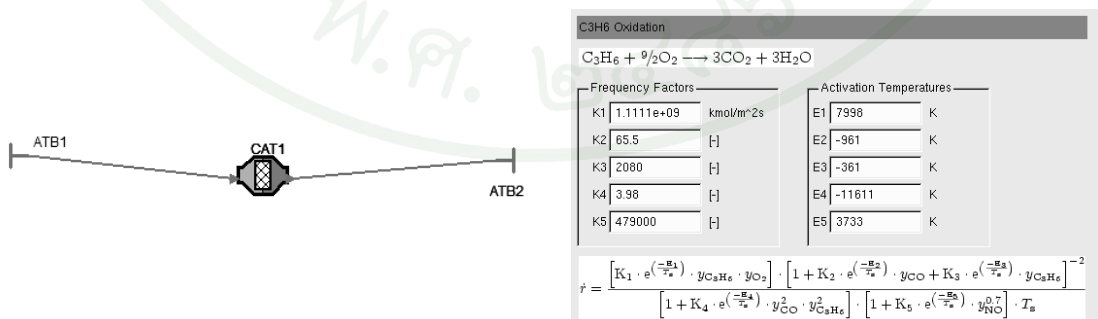
อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการไหลของละอองน้ำมันที่ฉีดภายในท่อไอเสีย โดยแบบจำลองของท่อไอเสีย ถูกสร้างขึ้นโดยใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) โดยนำข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดแบบเชิงทัศนศาสตร์ (3D Optical Measurement) ส่งผ่านข้อมูลแบบจุดที่ได้ไปยังโปรแกรม CATIA เพื่อสร้างพื้นผิวแบบรูปทรงอิสระ (Free-form Surface) ของชิ้นงาน และทำการส่งแบบจำลองไปยังโปรแกรม GAMBIT เพื่อทำการสร้างกริดในแบบจำลองและทำการแก้ปัญหของการไหลโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการวิเคราะห์

อุปกรณ์

1. โปรแกรม AVL-BOOST

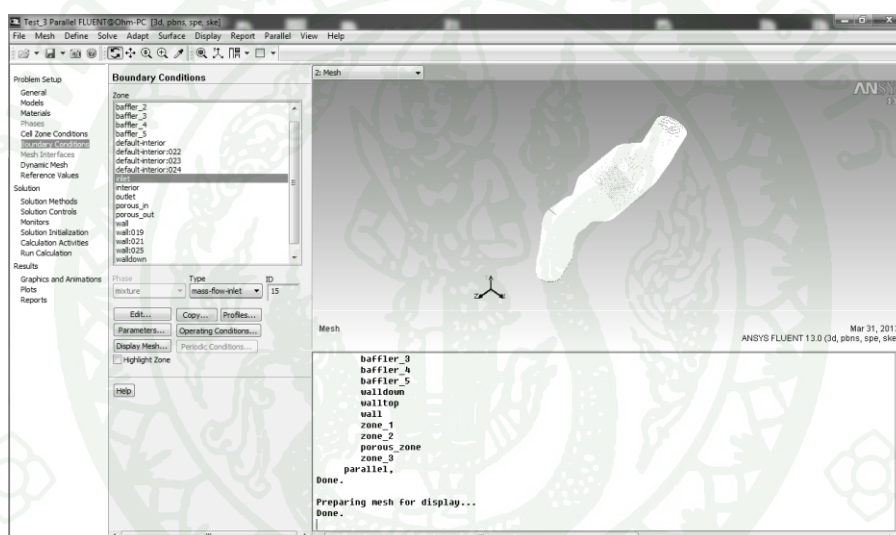
โปรแกรม AVL-BOOST เป็นการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์แบบ 1 มิติ โดยการสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องยนต์เป็นแผนผัง วิธีการในการสร้างแบบจำลองใช้วิธีการเลือกส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์มาเชื่อมต่อกัน ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ได้ทั้งระบบ รวมไปถึงระบบฟอกไอเสีย (Aftertreatment System) ซึ่งมีให้เลือกใช้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งสมการที่ใช้ในคำนวณมีลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับงานที่มีความซับซ้อน ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะเป็นค่าเฉลี่ยของหน้าตัดที่ต้องการทราบค่าไม่ว่าจะเป็นปริมาณก๊าซไอเสีย, อุณหภูมิ หรือความดัน แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงหน้าต่างโปรแกรม AVL-BOOST

2. โปรแกรม FLUENT

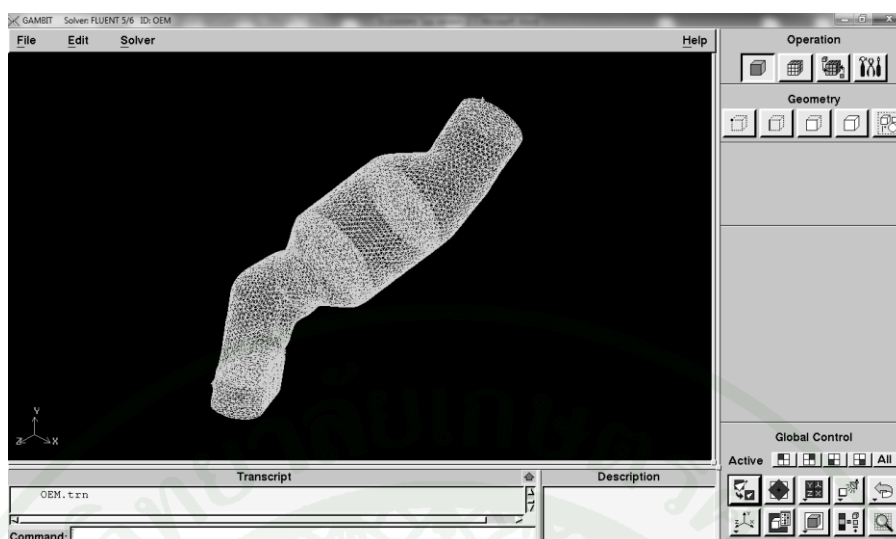
โปรแกรม FLUENT เป็นแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถใช้ได้ทั้งแบบจำลอง 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่งใช้วิธีการการคำนวณแบบ Finite Volume Method โดยโปรแกรม FLUENT สามารถนำมาใช้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้หลายรูปแบบ รวมไปถึงระบบฟอกไอเสียของรถยนต์ด้วย สำหรับระบบฟอกไอเสียสมการการคำนวณจะใช้หลักการ Arrhenius ในคำนวณ นอกจากนี้ยังสามารถให้ผู้ใช้แก้ไขสมการการคำนวณได้เอง โดยการเขียนภาษาคอมพิวเตอร์เช่น C, C++ หรือ FORTRAN ลงไปแทนที่สมการที่ใช้คำนวณเดิม ผ่าน User Defined Function (UDF) แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงหน้าต่างโปรแกรม FLUENT

3. โปรแกรม GAMBIT

โปรแกรม GAMBIT เป็นโปรแกรมเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยนำแบบจำลอง 2 มิติหรือ 3 มิติ เข้าสู่กระบวนการสร้างกริด (Grid Generation) ให้กลายเป็นโครงสร้างตาข่ายโดยลักษณะ Grid ที่สร้างขึ้นจะเป็น Grid แบบ hexahedral cell โดยจำนวนของ Grid สำหรับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา มีจำนวนประมาณ 800,000 cells แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงหน้าต่างโปรแกรม GAMBIT

4. โปรแกรม MINITAB

โปรแกรม MINITAB เป็นโปรแกรมออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ช่วยกำหนดขอบเขตของปัญหา กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญต่อปัญหาที่สนใจ ประหยัดเวลาที่ใช้ในการทดลอง สามารถหาความสัมพันธ์และจุดที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละชนิดได้อีกด้วย แสดงดังภาพที่ 15

ในการออกแบบการทดลองมีหลักการอยู่ 2 หลักการคือ การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) และการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง เนื่องจากการทดลองแบบแฟกทอเรียล อาจไม่เหมาะกับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยเป็นจำนวนมากเพราะใช้เวลานาน

สำหรับการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ทฤษฎีคือ การทดลองแบบ Box – Behnken และการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยที่การทดลองแบบ Box – Behnken จะคิดเฉพาะในช่วงที่กำหนดเท่านั้น ส่วนการออกแบบส่วนประสมกลาง จะมีการคิดนอกช่วงที่กำหนดด้วยจึงทำให้ใช้เวลานานกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การทดลองแบบ Box – Behnken

Worksheet1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	StdOrder	RunOrder	PType	Blocks	Temp (C)	Flow (kg/h)	O2 (%Vol)	%CO	%C3H8	Exhaust Temp (C)									
1	14	1	0	1	200	96	11	49.39	0.87	209.00									
2	4	2	2	1	230	130	11	57.98	1.38	243.00									
3	5	3	2	1	170	96	9	25.45	0.49	172.00									
4	13	4	0	1	200	96	11	49.39	0.87	209.00									
5	6	5	2	1	230	96	9	61.72	1.45	244.00									
6	7	6	2	1	170	96	13	35.30	0.65	175.00									
7	15	7	0	1	200	96	11	49.39	0.87	209.00									
8	3	8	2	1	170	130	11	23.54	0.60	173.00									
9	1	9	2	1	170	62	11	42.98	0.52	175.00									
10	10	10	2	1	200	130	9	32.98	0.64	205.00									
11	12	11	2	1	200	130	13	44.95	0.82	208.00									
12	8	12	2	1	230	96	13	77.02	2.10	215.00									
13	9	13	2	1	230	63	11	86.41	2.76	258.00									

Session

Estimated Regression Coefficients for NC388

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.84304	0.08142	10.353	0.000
Temp (C)	0.67998	0.04906	13.857	0.000
Flow (kg/h)	-0.25561	0.04986	-5.124	0.004
O2 (%Vol.)	0.13939	0.04986	2.801	0.024
Temp (C)*Temp (C)	0.35254	0.07339	4.774	0.005
Flow (kg/h)*Flow (kg/h)	0.09807	0.07339	1.336	0.256
O2 (%Vol.)*O2 (%Vol.)	-0.04912	0.07339	-0.669	0.533
Temp (C)*Flow (kg/h)	-0.36464	0.07051	-5.171	0.004
Temp (C)*O2 (%Vol.)	0.12142	0.07051	1.722	0.146
Flow (kg/h)*O2 (%Vol.)	-0.02145	0.07051	-0.303	0.753

S = 0.141029 R-Sq = 1.59114
R-Sq (adj) = 71.62% R-Sq (adj) = 35.03%

Analysis of Variance for NC388

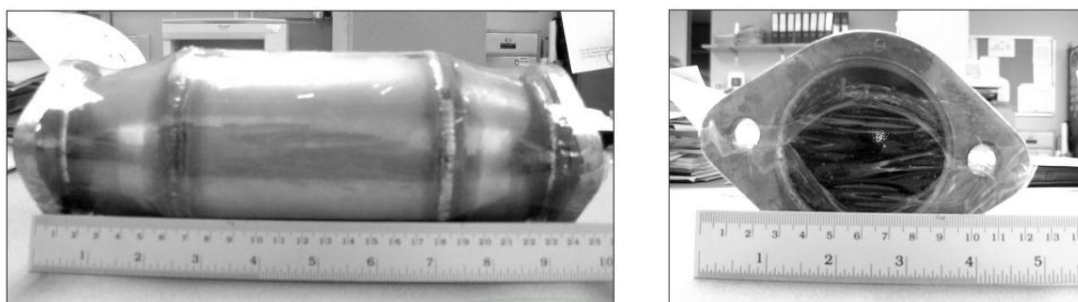
ภาพที่ 15 แสดงหน้าต่างโปรแกรม MINITAB

วิธีการ

1. ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับขั้นตอนการศึกษาจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ โปรแกรม FLUENT และ UDF สมการเคมีที่ใช้กำจัดก๊าซไอเสียในโปรแกรม AVL-BOOST จะถูกนำมาเขียนเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ในรูปแบบ C++ แล้วถึงนำมาใช้ร่วมกับ UDF ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการตั้งค่าโปรแกรมและข้อมูลคำสั่งสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

1.1 ทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เบื้องต้นตามลักษณะของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่ 16 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ substrate เป็น 90 mm. และมีความยาวของ substrate เป็น 90 mm. ซึ่งจะได้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 16 แสดงเครื่องฟอกไฮโดรเจนแรงดันสูงปฏิกิริยาที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

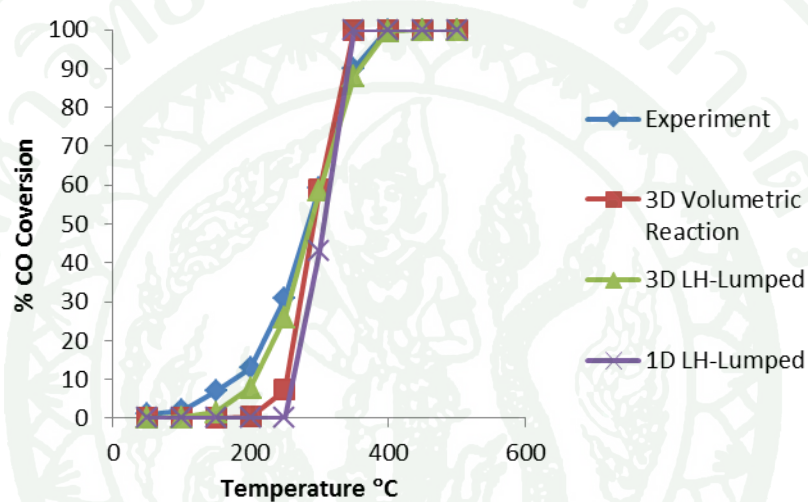


ภาพที่ 17 แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องฟอกไฮโดรเจนแรงดันสูงปฏิกิริยา

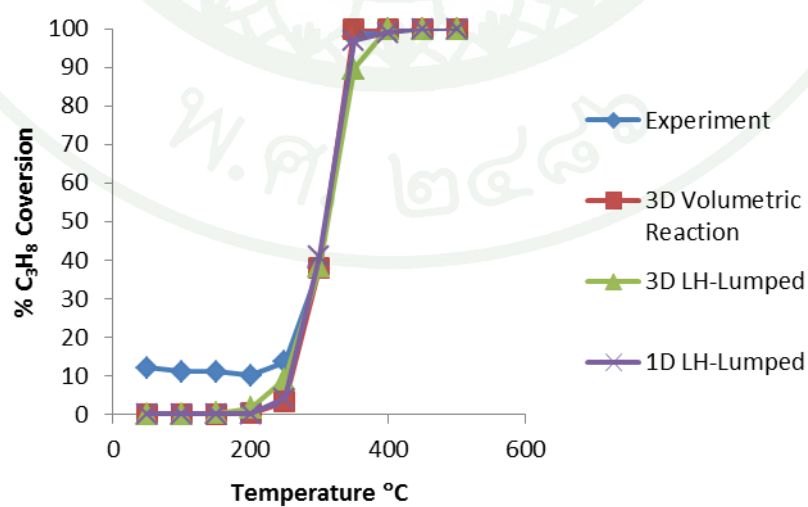
1.2 นำค่า Light-off Temperature ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผล Light-off Temperature ที่ได้จาก 3-D Volumetric Reaction, 3-D Langmuir-Hinshelwood Lumped (LH-Lumped) และ 1-D LH-Lumped เพื่อดูความแม่นยำของโปรแกรม โดยมีอัตราการไหลเชิงมวล 12 kg/h และสภาวะที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทดลอง ดังนั้นโปรแกรม CFD ที่ใช้มีความเชื่อถือได้ดังภาพที่ 18 และ 19

ตารางที่ 4 แสดงสารประกอบก๊าซไอเสียที่ใช้ในทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม

Species	Concentration
O ₂ (% Vol.)	21
CO (ppm)	1,000
C ₃ H ₈ (ppm)	1,000
N ₂ (ppm)	Balance

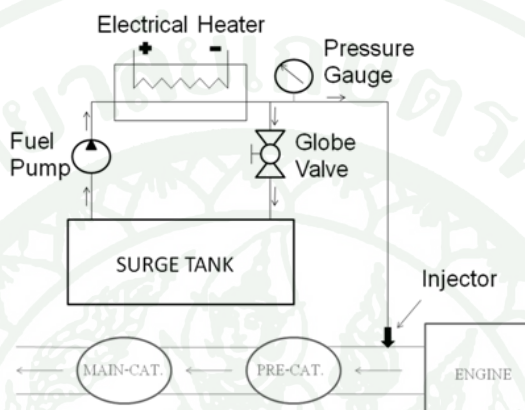


ภาพที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบ Light-off Temperature ของ CO จาก CFD กับการทดลอง



ภาพที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบ Light-off Temperature ของ C₃H₈ จาก CFD กับการทดลอง

1.3 เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบ Raw-Fuel Injection จึงถูกศึกษาเพื่อหาวิธีกระจายตัวของน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมที่ฉีดด้วยระบบ Raw-Fuel การติดตั้งการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 20 คู่มือละเอียดการติดตั้งการทดลองเพิ่มเติมที่ (น้อยเพ็ง, 2010) สำหรับรายละเอียดต่างๆของเครื่องยนต์และสภาวะที่ใช้ในการศึกษา เช่น ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ไหลสู่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ปริมาณสารประกอบไอเสีย อุณหภูมิ เป็นต้น ดังที่แสดงไว้ตารางที่ 5 – 7



ภาพที่ 20 แสดงการติดตั้งระบบ Raw-Fuel Injection เข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ที่มา: Noipeng *et al.* (2010)

ตารางที่ 5 สภาวะการทำงานแบบคงที่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ศึกษา

Test Condition	
Engine Speed (rpm)	2400
Lambda	1.7
Temperature Exhaust (°C)	290
Mass Flow Rate (kg/h)	103.87

ตารางที่ 6 แสดงสารประกอบก๊าซไอเสียที่ใช้ในแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

Species	Concentration
O ₂ (% Vol.)	10.72
CO ₂ (ppm)	0.01
CO (ppm)	1,980
H ₂ O (ppm)	0.01
C ₃ H ₆ (ppm)	0.01
C ₃ H ₈ (ppm)	5,000
NO (ppm)	0.01
N ₂ (ppm)	Balance

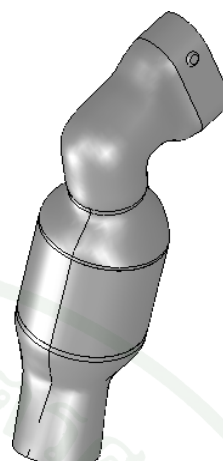
ตารางที่ 7 รายละเอียดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ OEM PRE-CAT

Properties Designation	DOC
	PRE-CAT
Cell Density (CPSI)	400
Cell shape	square
wall thickness (mm)	0.12
wall thickness (mil)	4.7
Length (mm)	150
Diameter (mm)	129
Substrate Volume (liter)	1.96
Pt:Pd	1:0
PGM Loading (g/ft ³)	14

1.4 สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่จะศึกษาด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Computer Aided Reverse Engineering, CARE) ดังภาพที่ 21



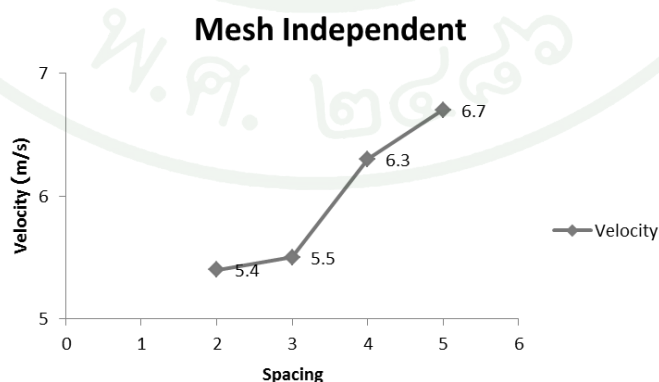
ก



ข

ภาพที่ 21 (ก) เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษา (ข) แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย

1.5 นำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ และทำการกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตให้กับโดเมนที่จะทำการศึกษาของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้โปรแกรม GAMBIT รูปแบบการแบ่งโดเมนเป็นแบบ Hexahedral and Tetrahedral Mesh แล้วจึงส่งต่อไปที่โปรแกรม FLUENT เพื่อทำการวิเคราะห์ Mesh Independent พบว่าที่ Spacing = 3 จำนวนชิ้นส่วนประกอบ (Mesh) ประมาณ 800,000 ชิ้น มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงการเลือกจำนวน Mesh ที่เหมาะสมต่องานวิจัย

1.6 การตั้งค่าแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์เครื่องฟอกโอเลียงเร่งปฏิกิริยา กำหนดการไหลแบบปั่นป่วนโดยการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบสถานะคงตัว (Steady flow) ไม่มีการอัดตัว (Incompressible flow) สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของก๊าซโอเลียงจะใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$

ในส่วนของ Substrate กำหนดให้เป็นการสร้าง substrate เป็นแบบเสมือน เนื่องจากการสร้าง substrate จริงนั้น ต้องใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์มาก จึงต้องทำการสร้าง substrate เป็นแบบเสมือน โดยใช้หลักการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) ดังสมการที่ 11

$$\Delta P = \frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} K \rho v^2 \quad (11)$$

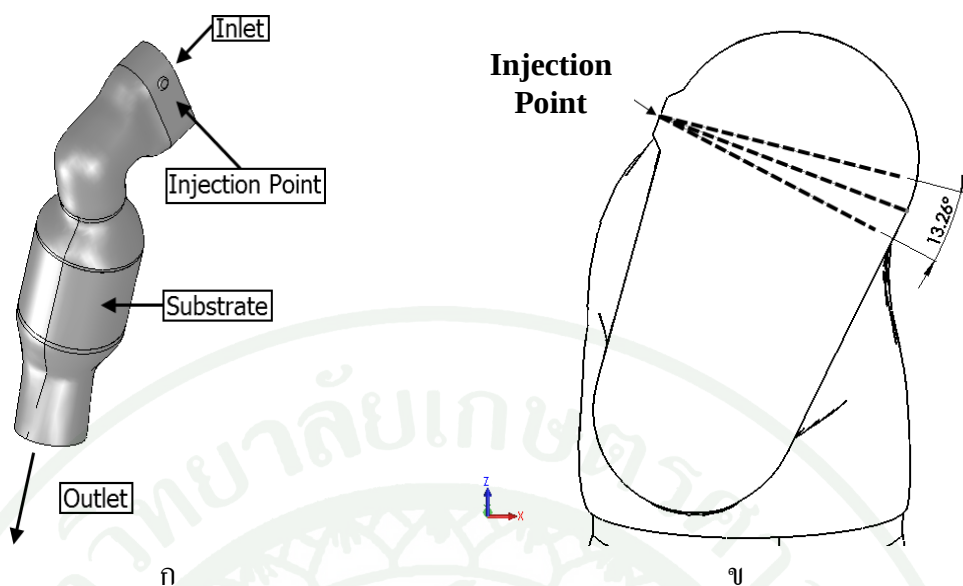
α คือ ค่าการยอมให้ซึมผ่าน (Permeability) μ คือค่าความหนืด (Viscosity) K คือค่าความสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของอากาศ ρ คือ ค่าความหนาแน่น (Density) โดยค่า K หาได้จาก fit curve ระหว่าง ΔP กับ v^2 จากวิจัยงานของ (Ming *et al.*, 2004) ได้แสดงค่า $1/\alpha$ และ K ที่ Cell Density ต่างๆดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ความต้านทานการไหลของอากาศที่ Cell Density ต่างๆ

Cell Density (cps)	200	300	400
$1/\alpha \text{ (m}^{-2}\text{)}$	1.25E+07	1.78E+07	2.74E+07
$K \text{ (m}^{-1}\text{)}$	8.48	8.66	8.91

ที่มา: Ming *et al.* (2004)

การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงไว้ในภาพที่ 23 และตารางที่ 9



ภาพที่ 23 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 9 เงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

Boundary	Settings
Inlet	Mass Flow Rate (kg/s)
Outlet	Pressure outlet (Pa)
Substrate	Setting as porous zone
Other	Wall

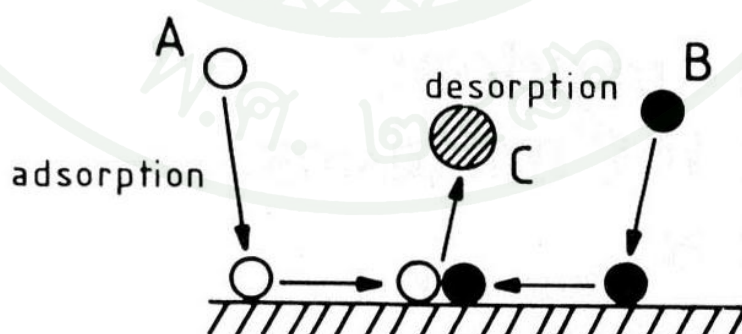
1.7 ทำการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของน้ำมันดีเซลที่ฉีดด้วยระบบ Raw-Fuel และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา การตั้งค่าระบบ Raw-Fuel Injection แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เงื่อนไขขอบเขตของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

Boundary	Settings
Injection Type	Solid-Cone
Particle Type	Droplet
Material	Diesel Liquid
Breakup Model	TAB
Injection Amount (kg/s)	0.00015 (10% of Fuel Injection)
Temperature (°C)	40
Injection Angle (Degree)	13.26

1.8 ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลจากแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ Volumetric Reaction และ UDF โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้วิเคราะห์เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบ DOC ในการศึกษานี้มีอยู่ 2 แบบคือ Volumetric Reaction และ UDF

การเกิดกระบวนการกำจัดก๊าซไอเสียภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาซึ่ง Langmuir-Hinshelwood อธิบายว่าก๊าซทุกตัวจะถูกดูดซับลงสู่พื้นผิว กล่าวคือเมื่อก๊าซไอเสียถูกดูดซับไปที่พื้นผิวของ substrate ก๊าซไอเสีย (สาร A และ B) จะทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนพื้นผิวแล้วปล่อยก๊าซที่ผ่านการทำปฏิกิริยากันจนเกิดสารใหม่ (สาร C) ออกมาซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ดังภาพที่ 24 และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 12 – 14



ภาพที่ 24 แสดงหลักการทำงานของปฏิกิริยาพื้นผิว

ที่มา: http://moodle.ncku.edu.tw/file.php/49092/1_Charaterization_of_catalysts.pdf



ในการนำสมการ Surface Reaction มาใช้โดยตรงกับโปรแกรม CFD อาจไม่เหมาะสมเท่าที่ควรยกตัวอย่างเช่น การทำปฏิกิริยาของ CH_4 กับ O_2 มีทั้งหมด 38 สมการ ซึ่งมีตัวแปรค่าถึง 76 ค่าด้วยกัน (Deutschmann, 2001) ทำให้ใช้เวลาในการทำงานเป็นอย่างมากอีกทั้งต้องใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์สูงมาก ผู้วิจัยจึงได้หาวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้นั่นคือ Volumetric Reaction และ Langmuir-Hinshelwood Lumped (LH-Lumped)

Volumetric Reaction เป็น Global Reaction ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างง่ายที่สามารถให้อยู่ในรูปอย่างง่ายมี 2 ปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 15 และ 16



ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (สมการที่ 17) สามารถใช้สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equatuion) ดังสมการที่ 18 ซึ่งถูกนำไปเป็นกระบวนการวิเคราะห์หลักที่พบในโปรแกรม FLUENT

$$r = k(T) [A]^m [B]^n \quad (17)$$

$$k(T) = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (18)$$

r : อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\text{kmol/m}^3\text{-sec}$)

$[A]$: ความเข้มข้นสาร A (mol/m^3)

$[B]$: ความเข้มข้นสาร B (mol/m^3)

m, n : เลขอันดับปฏิกิริยาของสาร A และ B ตามลำดับ (-)

$k(T)$: ค่าคงที่อัตรา (-)

- A : แฟกเตอร์ความถี่ ($\text{mol/m}^3\text{-sec}$)
 Ea : พลังงานก่อกัมมันต์ (J/kmol)
 R : ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/Kmol-K)
 T : อุณหภูมิ (K)

Langmuir-Hinshelwood Lumped เป็นการทำให้ Langmuir-Hinshelwood อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยยุบ adsorption, desorption และ pore diffusion phenomena รวมเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่พบได้มากในหลายๆงานวิจัย (Voltz *et al*, 1973; Koltsakis *et al*, 1997) นอกจากนี้ยังถูกนำไปเป็นกระบวนการวิเคราะห์หลักในโปรแกรม AVL-BOOST ด้วยแสดงดังสมการที่ 19 และ 20

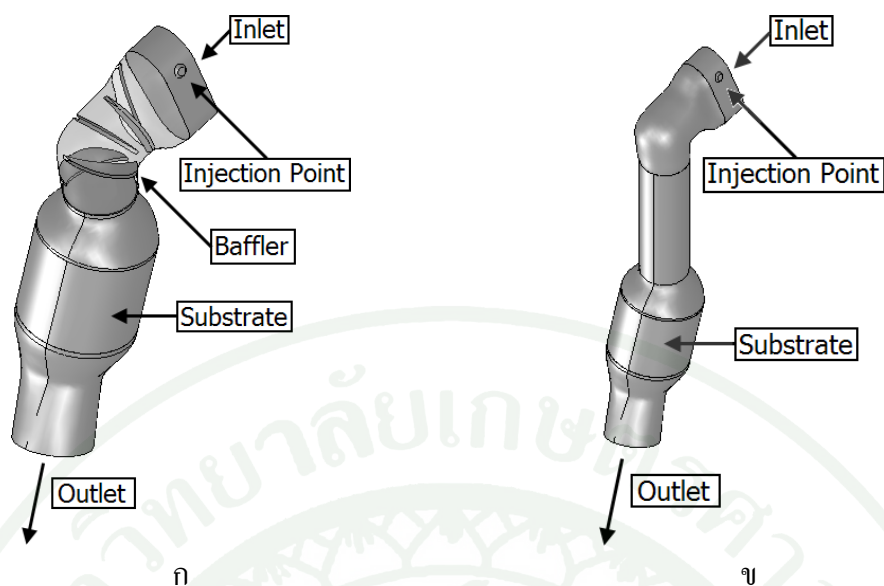
ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาในโปรแกรม FLUENT เป็นหลักจึงต้องใช้ UDF ในการที่จะเขียน Langmuir-Hinshelwood Lumped แทนที่ปฏิกิริยาเคมีเดิม โดยภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้คือ C++

$$r_{co} = \frac{\left[K_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{T}} \cdot y_{co} \cdot y_{o_2} \right] \left[1 + K_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{T}} \cdot y_{co} + K_3 \cdot e^{\frac{-E_3}{T}} \cdot y_{c_3h_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 \cdot e^{\frac{-E_4}{T}} \cdot y^2_{co} \cdot y^2_{c_3h_6} \right] \cdot \left[1 + K_5 \cdot e^{\frac{-E_5}{T}} \cdot y^{0.7}_{no} \right] \cdot T_s} \quad (19)$$

$$r_{c_3h_6} = \frac{\left[K_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{T}} \cdot y_{c_3h_6} \cdot y_{o_2} \right] \left[1 + K_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{T}} \cdot y_{co} + K_3 \cdot e^{\frac{-E_3}{T}} \cdot y_{c_3h_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 \cdot e^{\frac{-E_4}{T}} \cdot y^2_{co} \cdot y^2_{c_3h_6} \right] \cdot \left[1 + K_5 \cdot e^{\frac{-E_5}{T}} \cdot y^{0.7}_{no} \right] \cdot T_s} \quad (20)$$

- r : อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\text{kmol/m}^3\text{-sec}$)
 y_k : เศษส่วนโมลของสาร k ในรูปของก๊าซ (-)
 T_s : อุณหภูมิพื้นผิว (K)
 E_1-E_5 : พลังงานก่อกัมมันต์ (K)
 K_1-K_5 : แฟกเตอร์ความถี่ (-)

1.9 ปรับปรุงการกระจายตัวของน้ำมันดีเซลที่ฉีดด้วย Raw-Fuel โดยปรับเปลี่ยนลักษณะการไหลของก๊าซไอเสียดังภาพที่ 25 เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของน้ำมันดีเซลและอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งบริเวณด้านหน้าและภายใน substrate



ภาพที่ 25 (ก) ปรับปรุงด้วยการติดผ่านควมคุมการไหลที่บริเวณห้องจำนวน 5 แผ่น (ข) ปรับปรุงด้วยการเพิ่มความยาวท่อก่อนเข้าสู่ substrate 30 cm.

ในการเปรียบเทียบการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของน้ำมันดีเซลและอนุหภูมิ ว่าแตกต่างจากเดิมเพียงใด เราเทียบโดยใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)} \quad (21)$$

SD : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X_i : ค่าของข้อมูลตัวที่ i

$\bar{x}$: ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

N : จำนวนข้อมูล

1.10 เลือกการปรับปรุงเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของอนุหภูมิที่ดีที่สุด เพื่อนำมาหาจุดที่เริ่มทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ฉีดด้วยวิธี Raw Fuel โดยนำข้อมูลของการทดลองของ (น้อยเพิ่ม, 2010) มาใช้ในการออกแบบการทดลอง และนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB ใช้การออกแบบการทดลองด้วยทฤษฎี Box-Behnken 3 ปัจจัย กำหนดให้ปริมาณ CO และ C_3H_8 คงที่ที่ 1,980 ppm และ 5,000 ppm ตามลำดับ มีช่วงข้อมูลที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

รายการ	ช่วงข้อมูลที่ใช้ทดสอบ
อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}\text{C}$)	260 – 290
อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)	62 – 96
ปริมาณ O_2 (%Vol)	9 – 11

1.11 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์

1.12 จัดทำรูปเล่ม

ตารางที่ 12 ตารางการดำเนินงาน

ชื่อโครงการ : A Computational Fluid Dynamics Study on Improving Raw Fuel Injection Distributions in front of Diesel Oxidation Catalysts.												
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D.						ผู้จัดทำ : วัชรินทร์ จันทรสวรรณ						
: ผศ.ดร. ธเนศ อรุณศิริโสภณ, Ph.D.												
สถานที่ดำเนินงาน : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ						เริ่มโครงการ : 1 เมษายน 2555						
สถาบันวิจัยเทคโนโลยี ปตท.						สิ้นสุดโครงการ : 31 มีนาคม 2556						
รายละเอียด	2555						2556					
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาข้อมูล และตรวจสอบ เอกสาร												
2.ทดลองการ ใช้โปรแกรม												
3.ทำการจำลอง และเก็บข้อมูล												
4.วิเคราะห์ ข้อมูล												
5.จัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์												

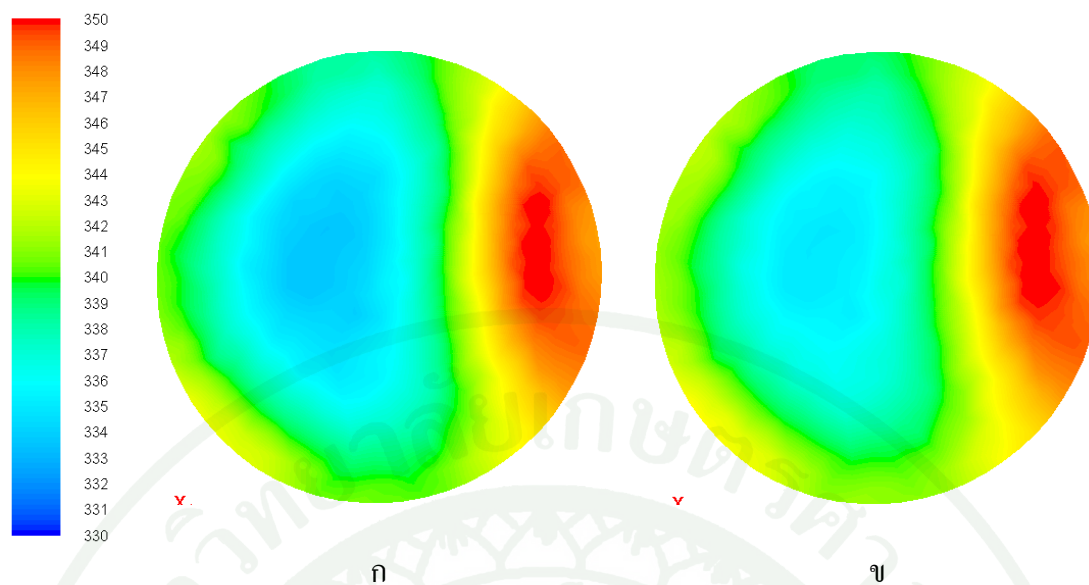
ผลและวิจารณ์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวน้ำมันด้านหน้า substrate โดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Raw-fuel Injection Technique) ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ได้กำหนดมีการเปรียบเทียบปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Volumetric Reaction กับ Langmuir Hinshelwood Lumped โดยนำไปใช้กับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์อีก 3 รูปแบบคือ แบบดั้งเดิม (OEM), ติดแผ่นควบคุมการไหล 5 แผ่น (Baffles) และ เพิ่มความยาวท่อ 30 cm. (Pipe Extension) ซึ่งส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันใน substrate ก่อนฉีดน้ำมัน ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันใน substrate หลังฉีดน้ำมัน ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาผลการกระจายตัวของน้ำมันด้านหน้า substrate ส่วนที่ 4 เป็นการศึกษาผลของ Volumetric Reaction กับ LH-Lumped ส่วนที่ 5 เป็นการศึกษาผลของความดันตกคร่อม ส่วนที่ 6 เป็นการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

1. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ทางออก substrate ก่อนฉีดน้ำมัน

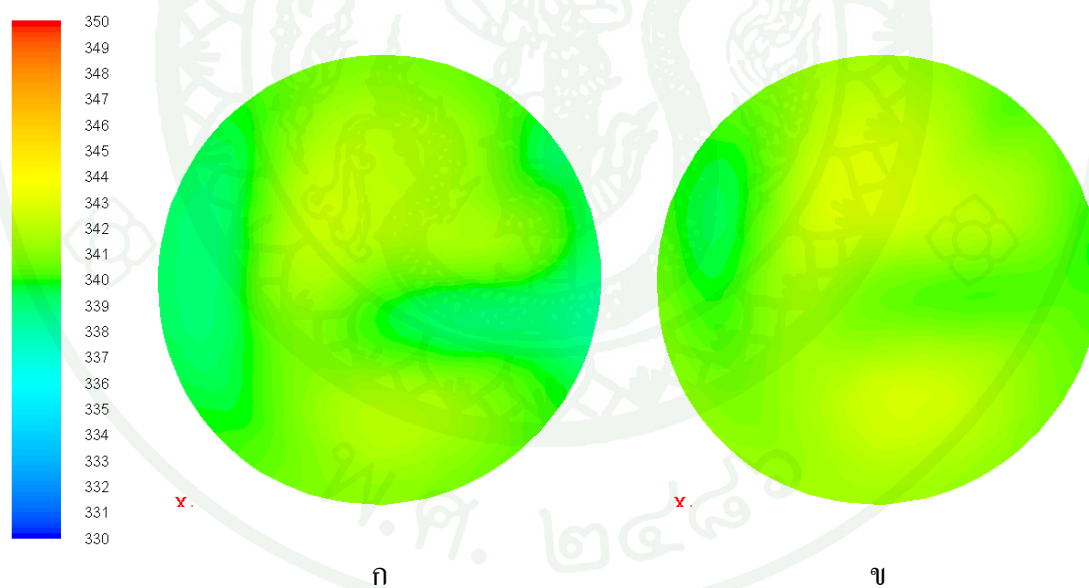
เมื่อพิจารณาการกระจายตัวอนุภาคน้ำมันที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped พบว่ามีอนุภาคน้ำมันใกล้เคียงกันในทุกกรณีดังภาพที่ 26 – 28 โดยจุดที่มีอนุภาคน้ำมันสูงเกิดจากการกระจายตัวการไหล (Flow Distribution) ของหน้าตัดที่ไม่เท่ากัน บริเวณที่มีอัตราการไหลของหน้าตัดที่ต่ำ ก๊าซไอเสียจะมีเวลาอยู่ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้นาน ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดอนุภาคน้ำมันสูงที่บริเวณนี้

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวอนุภาคน้ำมันที่ทางออก substrate กรณี OEM พบว่า บริเวณที่มีอนุภาคน้ำมันสูงเกิดขึ้นจากการหมุนวน (Vortex) ของก๊าซไอเสียที่ด้านหน้าก่อนเข้า substrate (บริเวณ Inlet Cone) จึงทำให้ก๊าซไอเสียไหลผ่านได้ช้าจึงเป็นผลทำให้บริเวณนี้มีอนุภาคน้ำมันสูงกว่าจุดอื่นๆ ดังภาพที่ 26 และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี OEM กับกรณี Pipe Extension (ภาพที่ 28) จะเห็นได้ว่าบริเวณที่มีอนุภาคน้ำมันสูงได้หายไปเป็นเพราะเมื่อเพิ่มระยะทางการไหล โดยช่วยลดการหมุนวนที่ด้านหน้าก่อนเข้า substrate ทำให้ก๊าซไอเสียไหลได้เป็นระเบียบยิ่งขึ้น จึงทำให้อนุภาคน้ำมันลดลง และเมื่อพิจารณากรณี Baffles พบว่ามีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งที่หน้าตัดดังภาพที่ 27



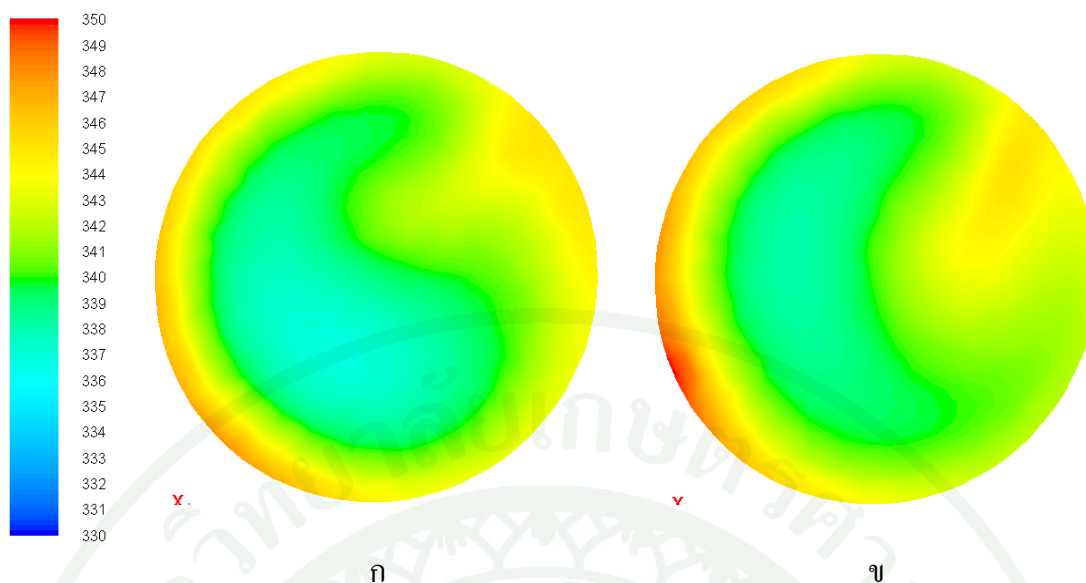
ภาพที่ 26 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี OEM

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped



ภาพที่ 27 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี Bafflers

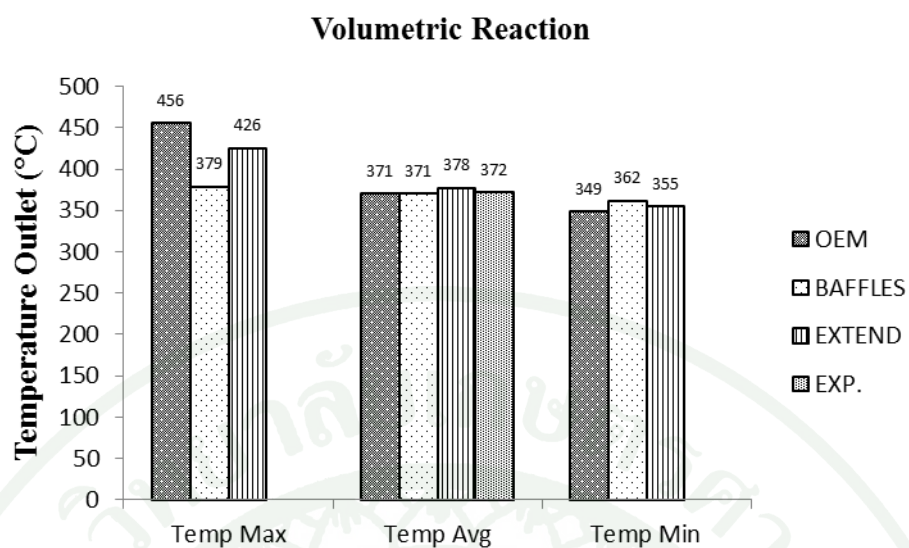
(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped



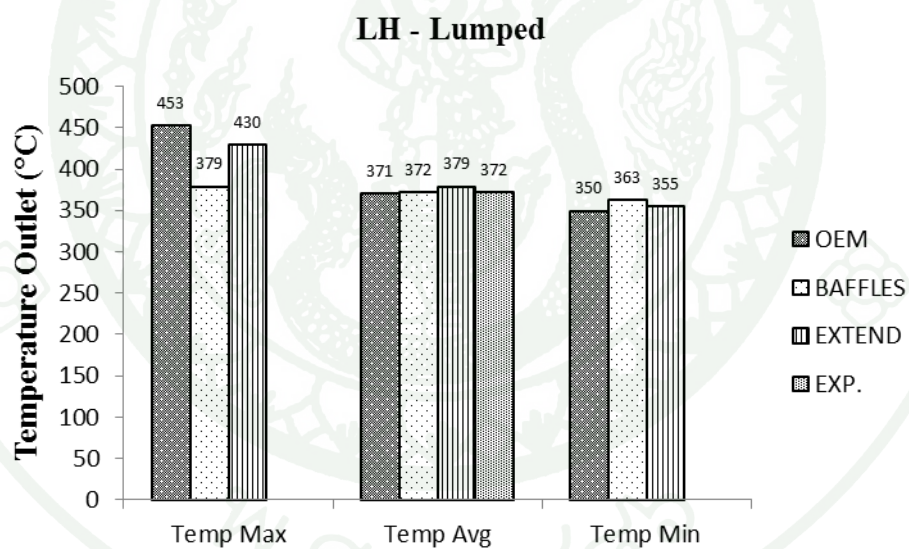
ภาพที่ 28 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate ก่อนการฉีดน้ำมันกรณี Pipe Extension
(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped

2. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมัน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยที่หน้าตัดทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกันในทุกกรณีดังภาพที่ 29 และ 30 แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นพบว่า กรณี OEM มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 455 °C และเมื่อทำการปรับปรุงการกระจายตัวอุณหภูมิด้วย Baffles และ Pipe Extension อุณหภูมิสูงสุดลดลงเหลือ 379 °C และ 426 °C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้ Baffles ช่วยลดโอกาสเกิดการแตกร้าหรือหลอมละลายใน substrate อันเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปได้ดีที่สุด



ภาพที่ 29 อุณหภูมิที่หน้าตัดทางออก substrate โดยใช้ Volumetric Reaction

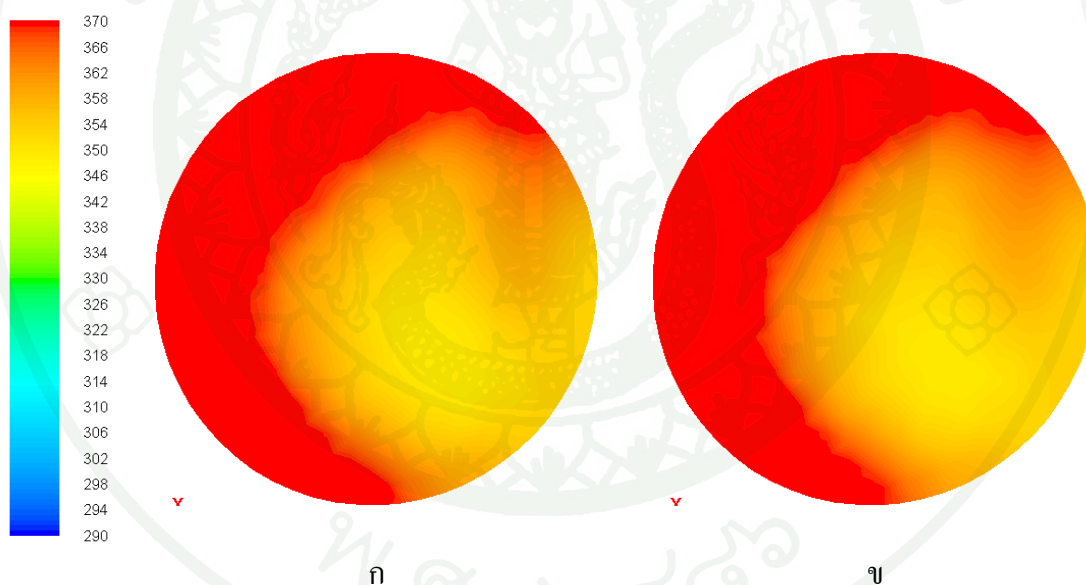


ภาพที่ 30 อุณหภูมิที่หน้าตัดทางออก substrate โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงแรงปฏิกิริยา ระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกันในทุกกรณีดังภาพที่ 31 – 33

เมื่อพิจารณากรณี OEM และ Pipe Extension พบว่า มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่ที่บริเวณขอบเป็นผลมาจากการกระจายตัวของน้ำมันที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนจึงทำให้บริเวณที่มีน้ำมันสะสมมากที่สุด จะเกิดอุณหภูมิสูงที่สุดด้วยแสดงดังภาพที่ 31 และ 33

เมื่อพิจารณากรณี Baffles พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั้งทางออก substrate เนื่องจากน้ำมันที่ฉีดออกมาได้มีการคลุกเคล้ากับก๊าซไอเสียทำให้น้ำมันมีการกระจายตัวสม่ำเสมอก่อนที่จะเข้าสู่รังแสดงดังภาพที่ 32

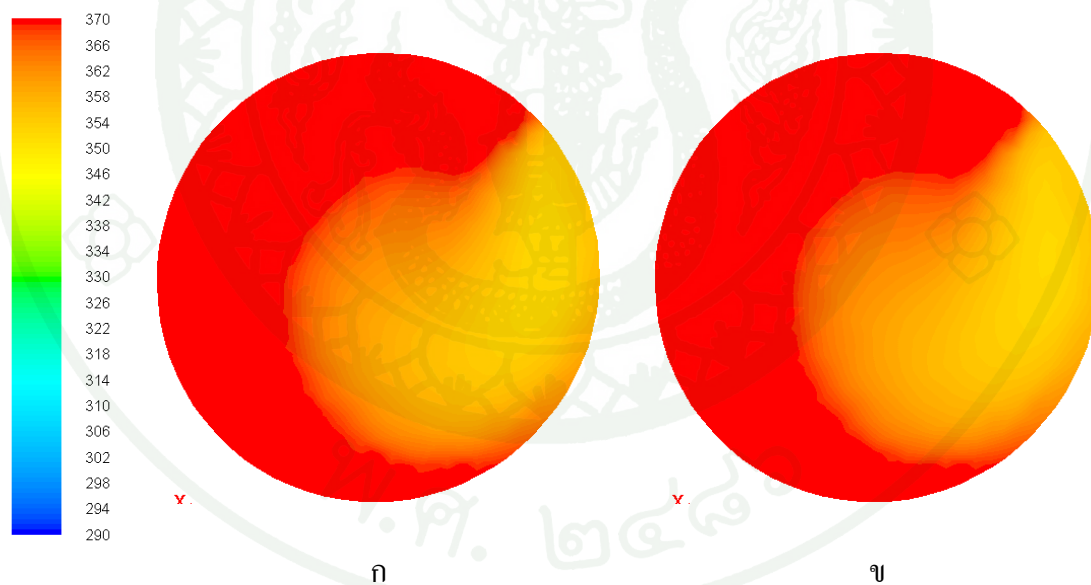


ภาพที่ 31 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี OEM

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped

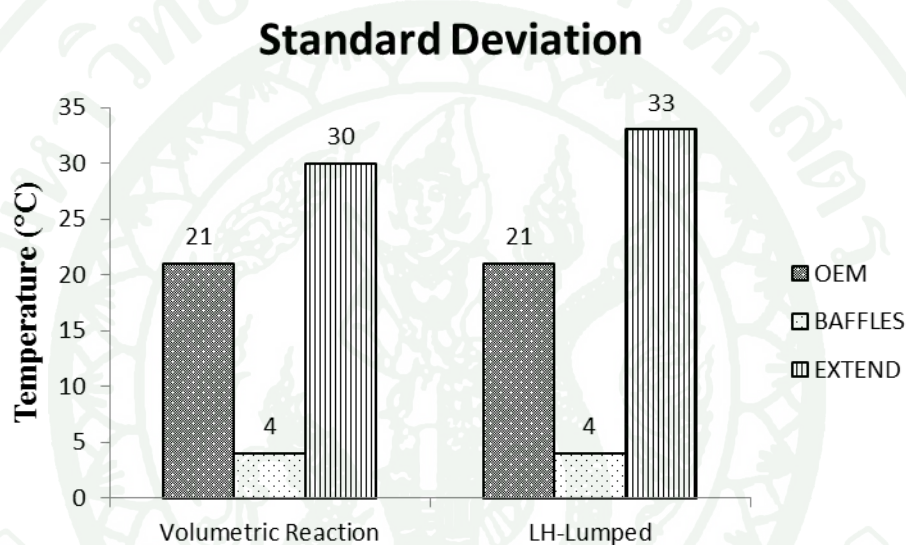


ภาพที่ 32 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการติดตั้ง Baffles
(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped



ภาพที่ 33 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก substrate หลังการติดตั้ง Pipe Extension
(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped

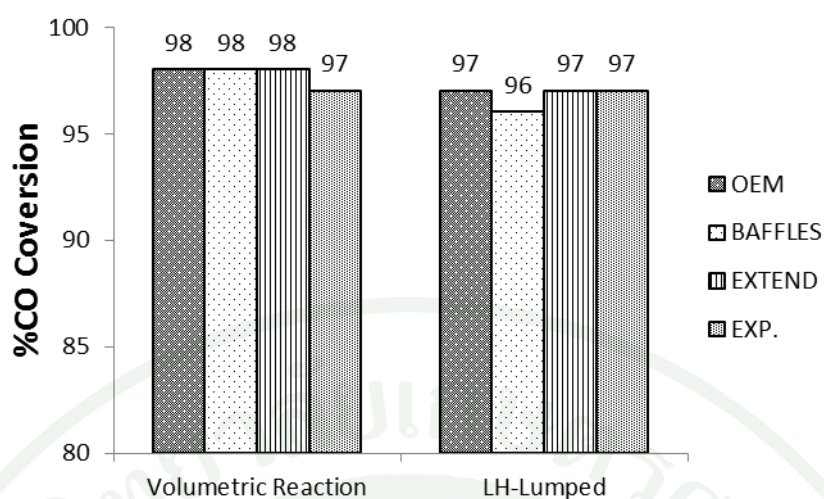
เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิทางออก substrate เพื่อการกระจายตัวของ อุณหภูมิ โดยมีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยากรณี OEM, Baffles, Pipe Extension พบว่ากรณี Volumetric Reaction มีค่าเป็น 21 และ 4 และ 30 ตามลำดับ และกรณี LH-Lumped มีค่าเป็น 21 และ 4 และ 33 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 34 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก จะเห็นได้ว่ากรณี Baffles ดีที่สุดเนื่องจากมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด โดยการที่มีค่า S.D. น้อยบ่งชี้ได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับเฉลี่ย ซึ่งหมายถึงการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น นอกจากนี้การที่กรณี Pipe Extension มีค่า S.D. สูงสุดอาจจะเสี่ยงต่อการแตกร้าวมากที่สุด



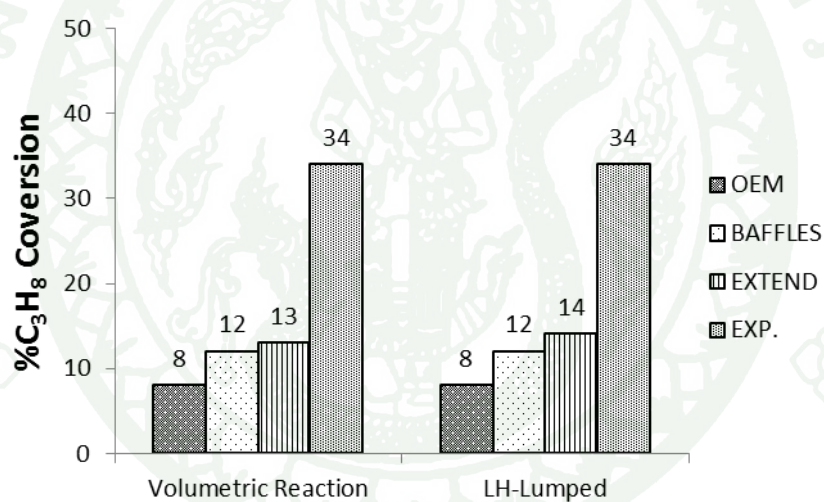
ภาพที่ 34 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิทางออก substrate

3. พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการกระจายตัวของน้ำมันที่ฉีดด้วยระบบ Raw-Fuel หน้า substrate

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดปริมาณ CO และ HC ระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันสามารถลดปริมาณ CO ได้ประมาณ 98 % และลดปริมาณ HC ได้ประมาณ 12 % ดังแสดงในภาพที่ 35 และ 36 และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดปริมาณ HC ของแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์กับการทดลองแตกต่างกันเนื่องจากในงานวิจัยนี้เราสนใจการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อป้องกันการเกิดความเสี่ยงที่เกิดขึ้นกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงพยายามปรับจูนค่าอุณหภูมิให้ให้เท่ากับการทดลองเป็นหลัก แล้วปล่อยให้ค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซไอเสียขึ้นลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง



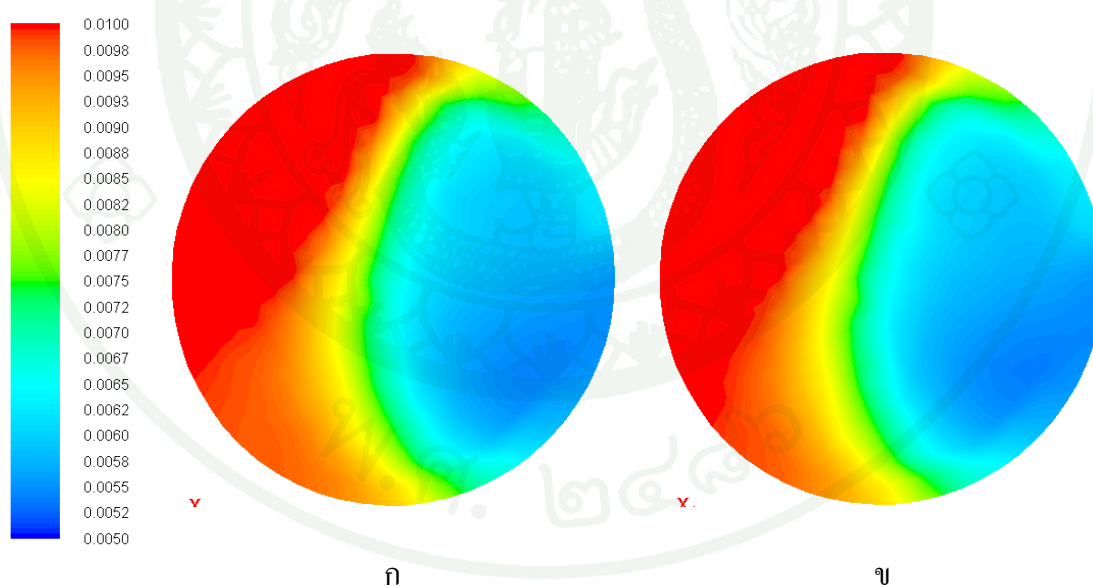
ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพการลดปริมาณ CO โดยใช้ Volumetric Reaction และ LH-Lumped



ภาพที่ 36 ประสิทธิภาพการลดปริมาณ C₃H₈ โดยใช้ Volumetric Reaction และ LH-Lumped

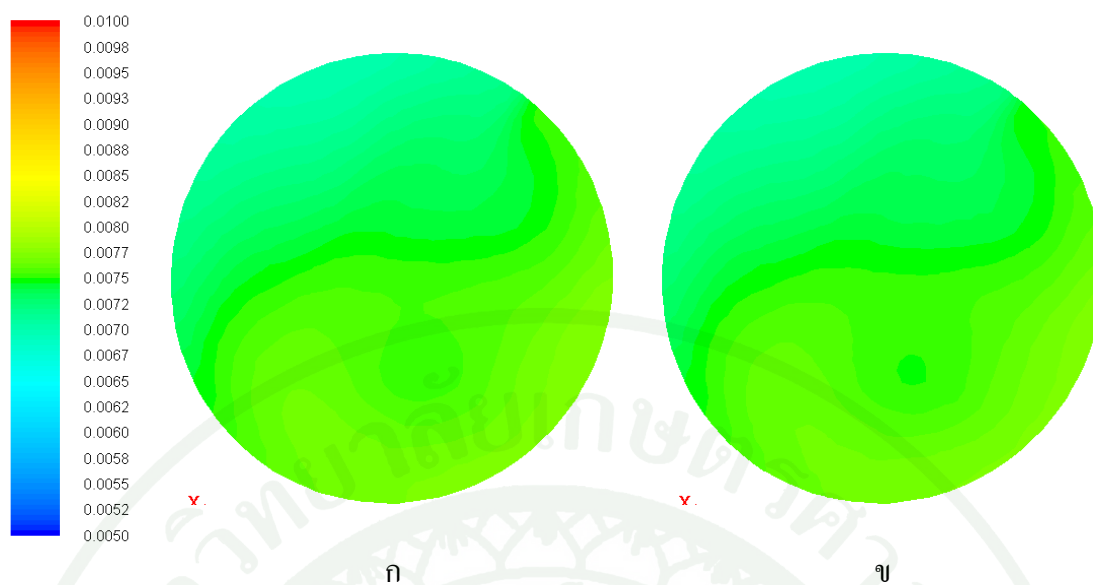
เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของน้ำมันที่หน้าตัดก่อนเข้า substrate หลังการฉีดน้ำมันหน้าเครื่อง ฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped พบว่ามีการกระจายตัวใกล้เคียงกันในทุกกรณีดังภาพที่ 37 – 39 พบว่า การกระจายตัวของน้ำมันของ Volumetric Reaction และ LH-Lumped มีลักษณะใกล้เคียงกันทุกกรณี

เมื่อพิจารณากรณี OEM และ Pipe Extension พบว่า มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน บริเวณที่มีน้ำมันสะสมจะอยู่ที่บริเวณขอบเป็นผลมาจากไม่มีการคลุกเคล้าภายหลังจากการฉีดน้ำมัน เมื่อไม่มีการคลุกเคล้าทำให้น้ำมันที่ฉีดไหลไปตามการไหลของก๊าซไอเสียถึงแม้ว่าจะเพิ่มระยะทางในการคลุกเคล้าดังในกรณี Pipe Extension แต่ก็ไม่เพียงพอที่จะทำให้การกระจายตัวของน้ำมันคลุกเคล้ากันได้อย่างดีก่อนเข้า substrate เหมือนกับกรณี Baffles จึงก่อให้เกิดการสะสมที่บริเวณดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 37 และ 39 ซึ่งในการที่จะเพิ่มการกระจายที่สม่ำเสมออาจต้องใช้ระยะทางที่มากกว่านี้ แต่เมื่อพิจารณากรณี Baffles พบว่า การกระจายตัวของน้ำมันสม่ำเสมอเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการติดตั้ง Baffles จะทำให้เกิดการหมุนวนจึงทำให้น้ำมันและก๊าซไอเสียคลุกเคล้ากันได้เป็นอย่างดีแสดงดังในภาพที่ 38



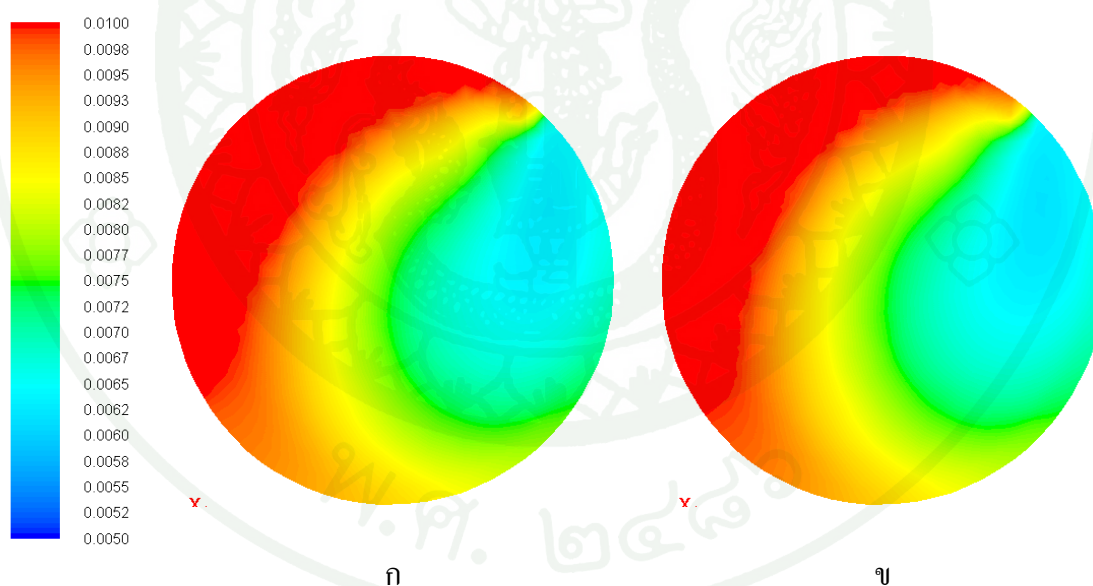
ภาพที่ 37 การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการฉีดน้ำมันกรณี OEM

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped



ภาพที่ 38 การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการติดตั้งน้ำมันกรณี Baffles

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped

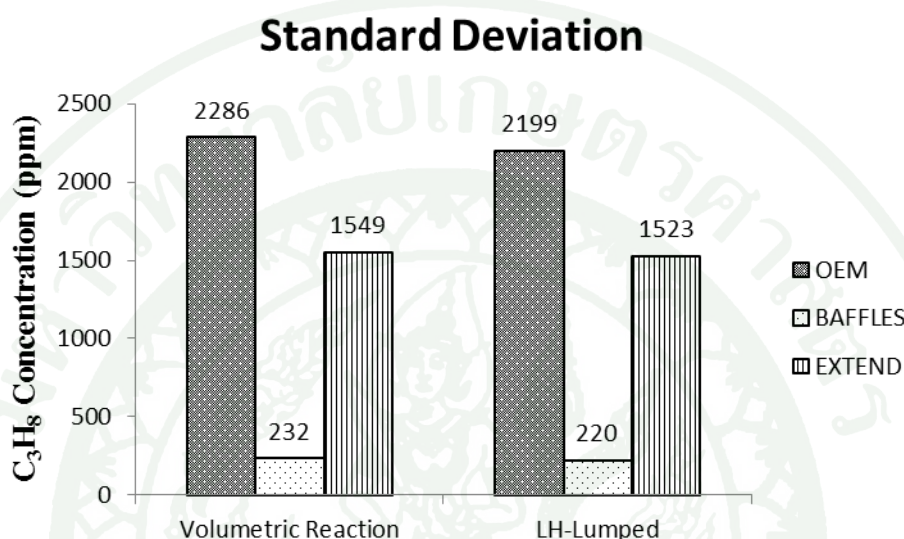


ภาพที่ 39 การกระจายตัวของน้ำมันที่ทางเข้า substrate หลังการติดตั้งน้ำมันกรณี Pipe Extension

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir Hinshelwood Lumped

เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวน้ำมันทางเข้า substrate โดยการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยากรณี OEM, Baffles, Pipe Extension พบว่ากรณี Volumetric Reaction มีค่าเป็น 2,286 และ 232 และ 1,549 ตามลำดับ และกรณี LH-Lumped มีค่า

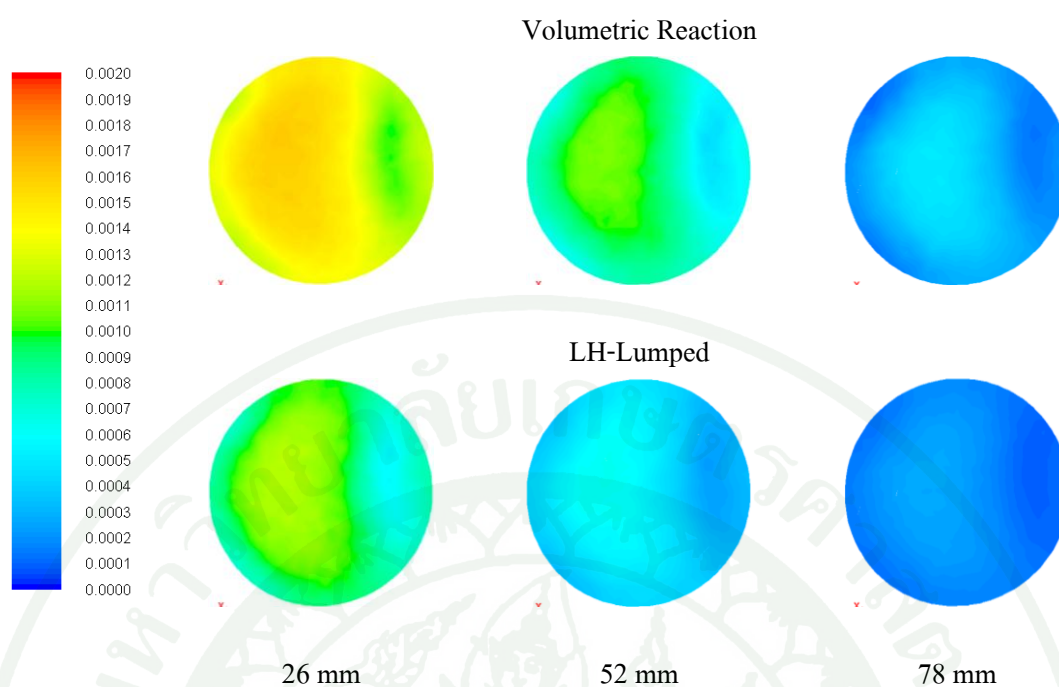
เป็น 2,119 และ 220 และ 1,523 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 40 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่ากรณี Baffles ดีที่สุดเนื่องจากมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด การที่มีค่า S.D. น้อยบ่งชี้ได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย ซึ่งหมายถึงการกระจายตัวของน้ำมันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ดังนั้นการติด Baffles อาจเป็นหนทางที่ดีที่สุดในการทำให้น้ำมันกระจายตัวได้เป็นอย่างดี



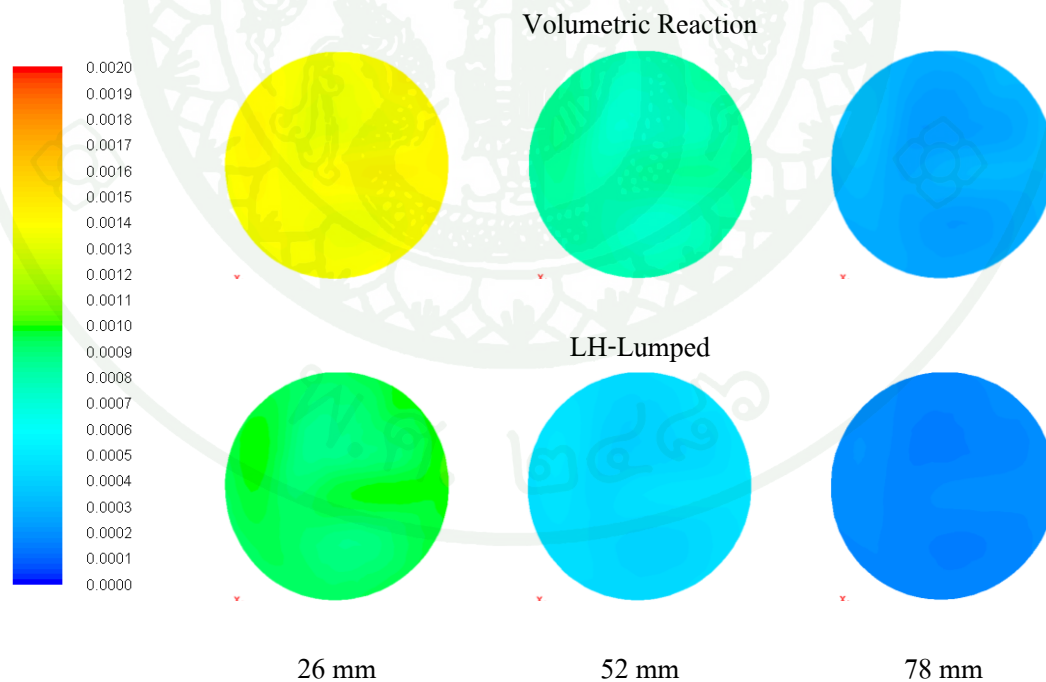
ภาพที่ 40 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวน้ำมันทางเข้า substrate

4. พิจารณาเปรียบเทียบผลของ Volumetric Reaction กับ LH-Lumped

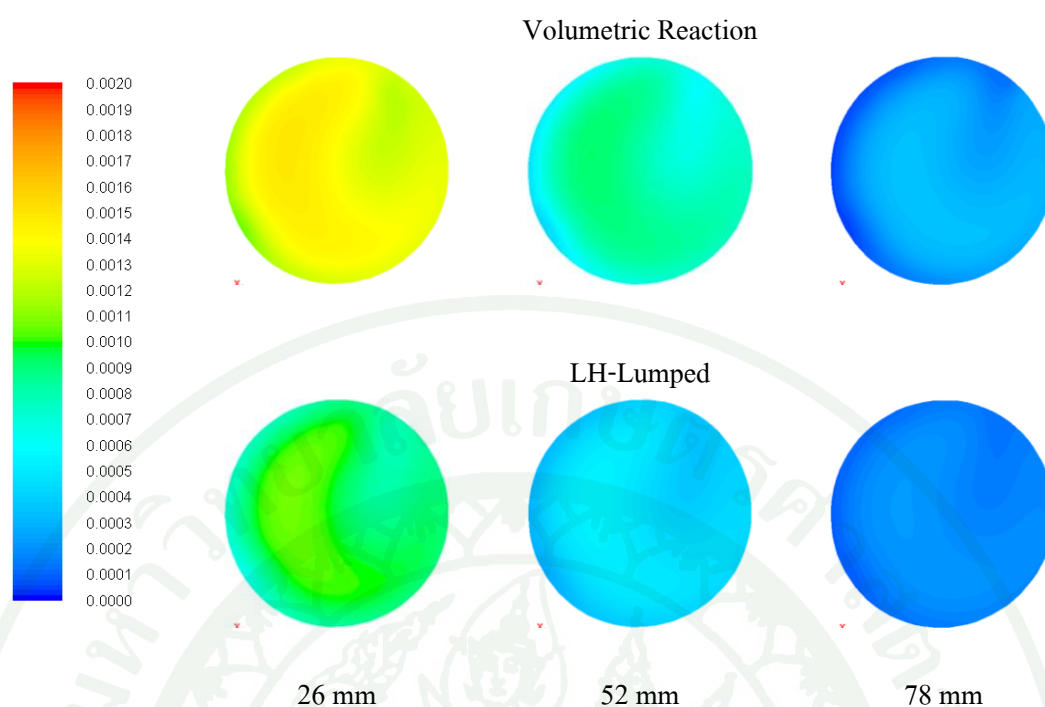
เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางการกระจายตัวของ CO ภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped ที่ระยะ 26 mm, 52 mm, และ 78 mm. (นับจากทางเข้า substrate) พบว่ามีการกระจายตัวค่อนข้างแตกต่างกันในทุกกรณีดังภาพที่ 41 – 43 โดยผลของ LH-Lumped จะมีความแม่นยำมากกว่า (จากการเทียบผลระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped ดังภาพที่ 18 และ 19) เพราะการที่มีตัวแปรที่มากขึ้น ส่งผลทำให้การคำนวณทำให้เข้าถึงช่วงข้อมูลได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 41 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ

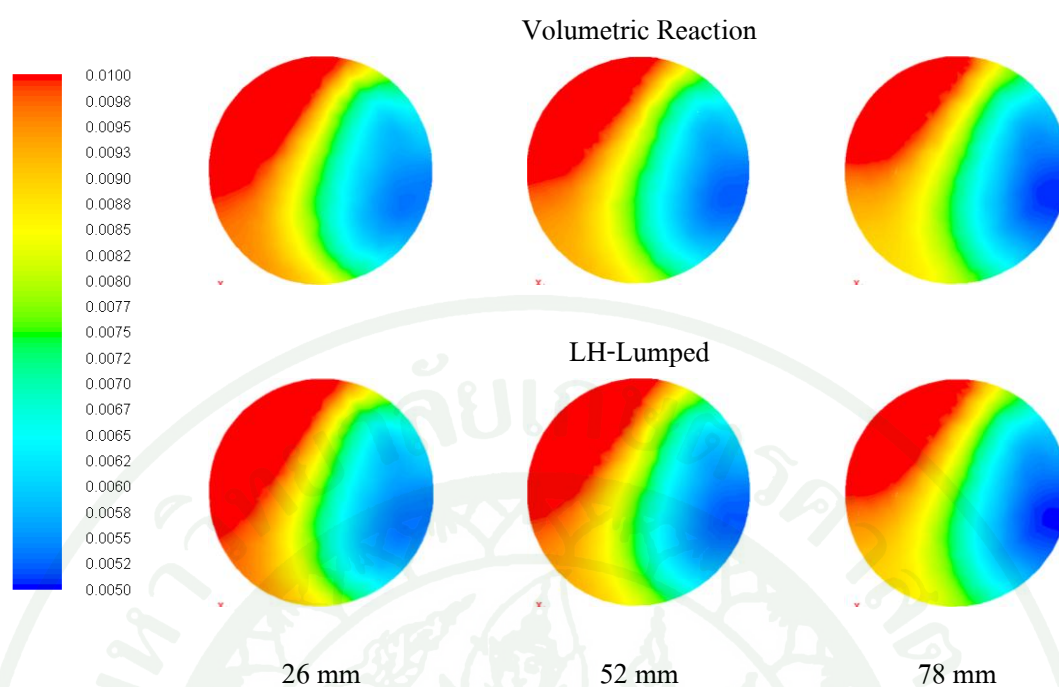


ภาพที่ 42 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี Baffles ที่ระยะต่างๆ

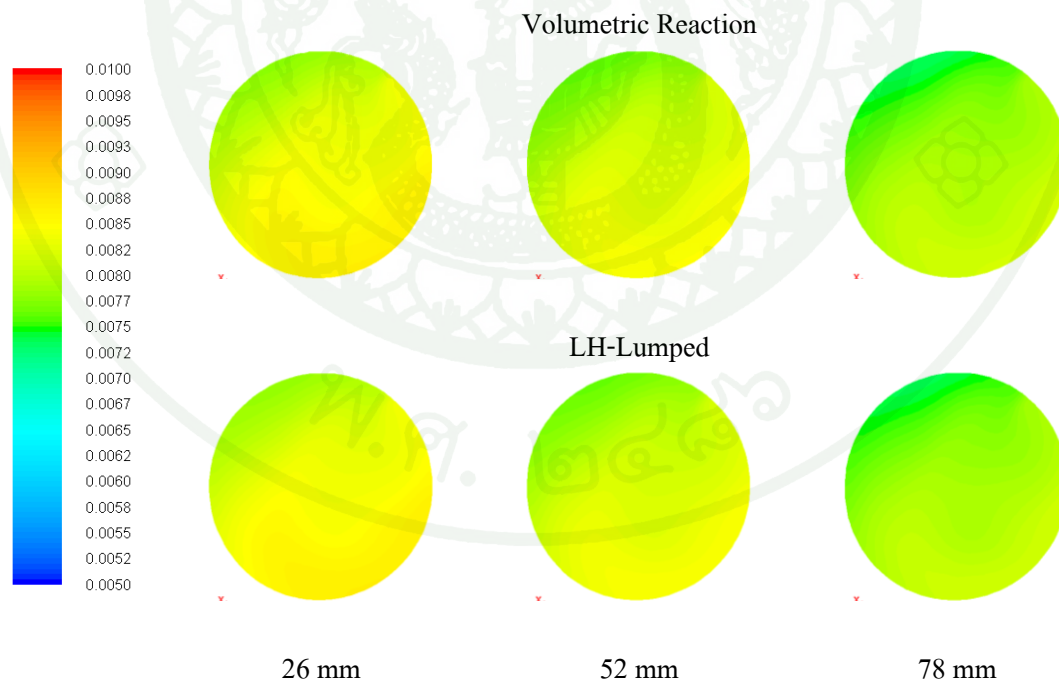


ภาพที่ 43 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO กรณี Pipe Extension ที่ระยะต่างๆ

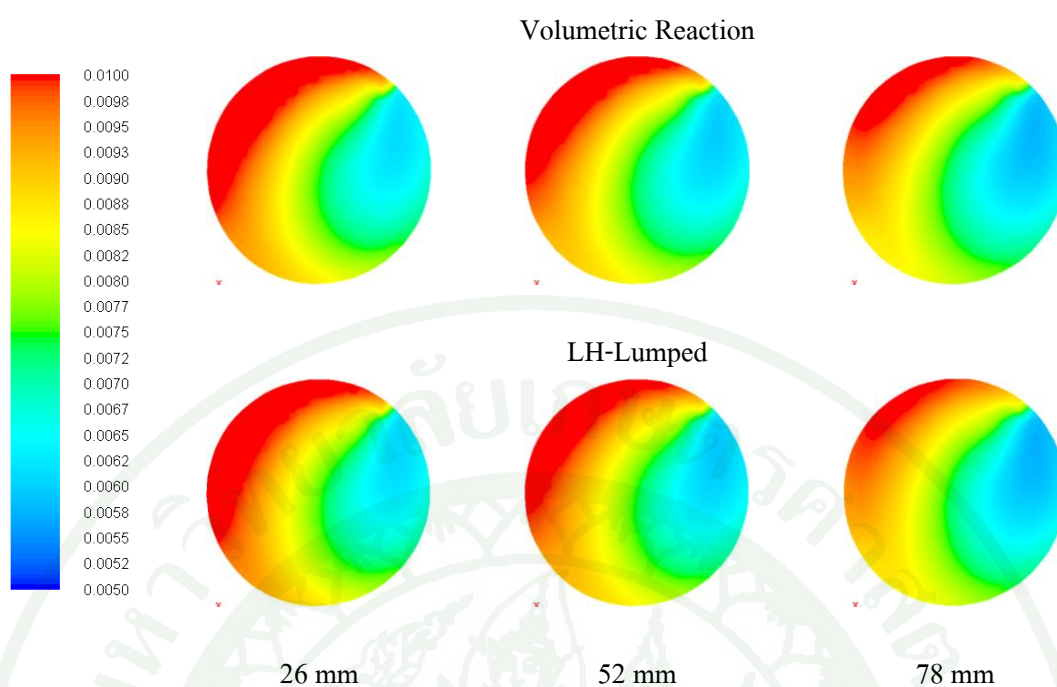
เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางการกระจายตัวของ HC ภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาระหว่าง Volumetric Reaction และ LH-Lumped ที่ระยะ 26 mm, 52 mm, และ 78 mm. (นับจากทางเข้า substrate) พบว่ามีการกระจายตัวค่อนข้างใกล้เคียงในทุกกรณีดังภาพที่ 44 – 46 และเมื่อพิจารณาในช่วงที่อุณหภูมิไอเสียที่ 320, 350 และ 400 °C พบว่าอุณหภูมิที่ทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 320, 350 °C มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แต่อุณหภูมิไอเสียที่ 400 °C อุณหภูมิทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ Volumetric Reaction มีค่าสูงเกินกว่า 1200 °C ดังภาพที่ 47 ซึ่งเกิดจากการที่ Volumetric Reaction นั้นมาจาก Global Reaction ซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงของเงื่อนไขที่เหมาะสมเท่านั้น ไม่เหมาะกับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความเข้มข้นของก๊าซไอเสีย (Koop, 2009) แสดงดังภาพที่ 47



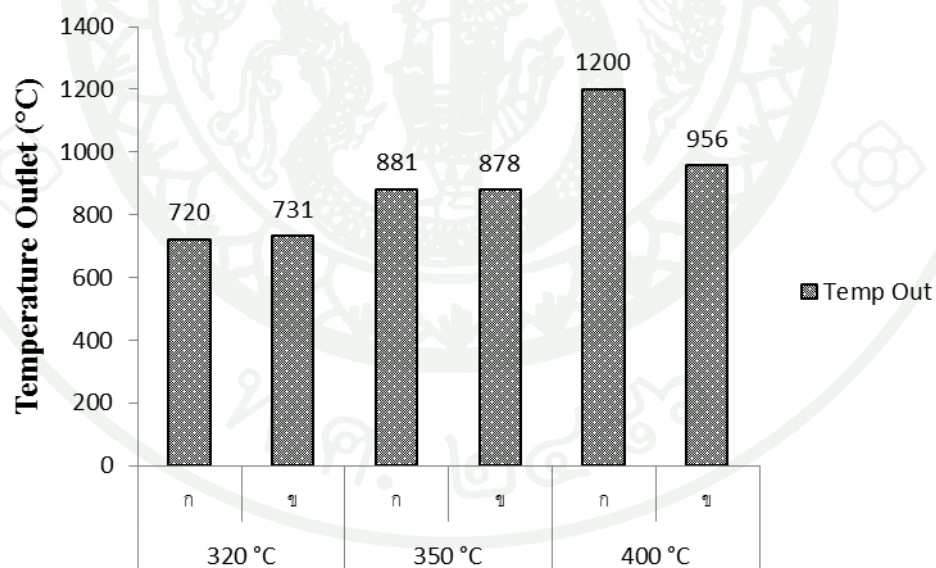
ภาพที่ 44 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ



ภาพที่ 45 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ

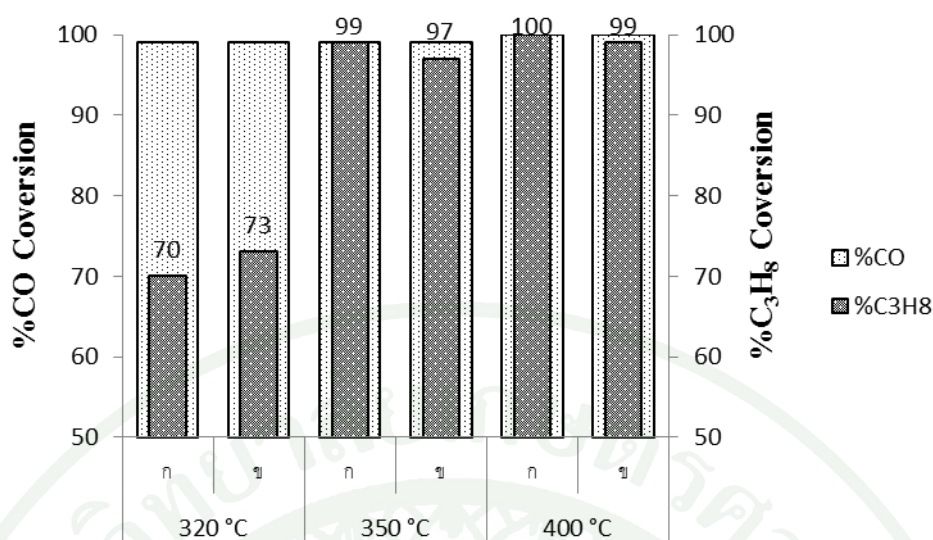


ภาพที่ 46 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 กรณี OEM ที่ระยะต่างๆ



ภาพที่ 47 ค่าอุณหภูมิทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงแรงปฏิกิริยาที่อุณหภูมิไอเสียต่างๆ

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir-Hinshelwood Lumped



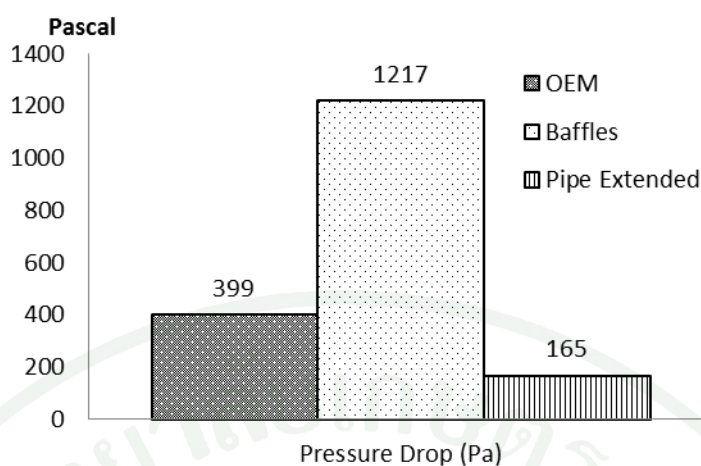
ภาพที่ 48 ค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณ CO และ C₃H₈ ที่อุณหภูมิไอเสียต่างๆ

(ก) Volumetric Reaction (ข) Langmuir-Hinshelwood Lumped

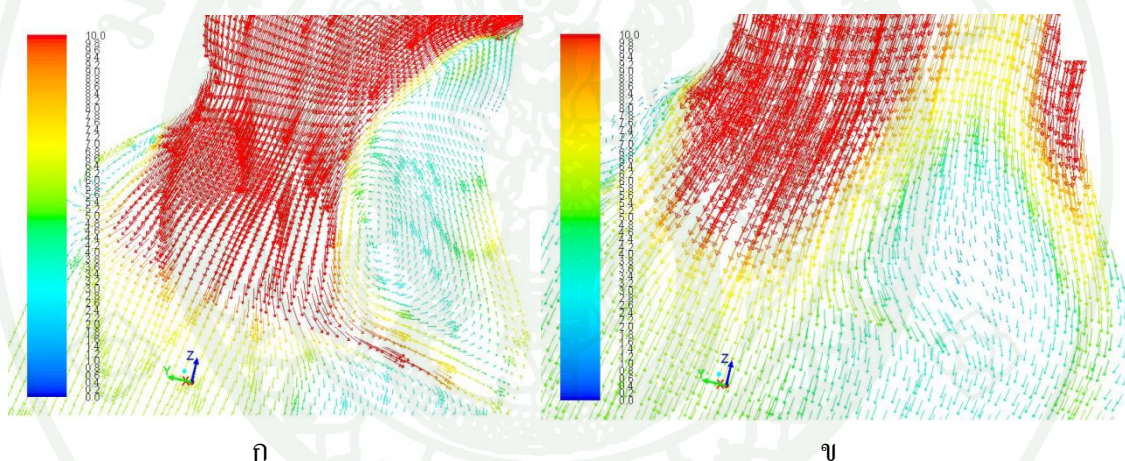
5. พิจารณาผลกระทบของความดันตกคร่อมเนื่องจากการปรับปรุงแบบจำลองคอมพิวเตอร์

เมื่อพิจารณาค่าความดันตกคร่อมของทั้ง 3 แบบจำลองพบว่า มีค่า 399 Pa, 1216 Pa และ 164 Pa ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 49 เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง OEM และ Pipe Extension แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวท่อช่วยทำให้ความดันตกคร่อมลดลงเพราะว่าในกรณี OEM เมื่อไอเสียไหลผ่านบริเวณท่อจะทำให้เกิดการแยกตัวของกระแสไหลออกจากผิวท่อ เมื่อไอเสียมาถึงบริเวณที่ด้านหน้า substrate บางส่วนได้ไหลเข้าสู่ substrate ตามปกติแต่บางส่วนเกิดการตีกลับของไอเสียและหมุนวนอยู่ที่ด้านหน้าของ substrate จึงทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูง แต่ในกรณี Pipe Extension จะต่างออกไปเพราะว่า เมื่อผ่านท่อมาแล้วมีระยะทางที่พอจะทำการสร้างของการไหลเป็นระเบียบยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีความดันตกคร่อมน้อยลงดังภาพที่ 50

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง OEM และ Baffles แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นช่วยกระจายตัวน้ำมันทำให้ความดันตกคร่อมสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 800 Pa หรือประมาณ 0.01 bar ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำและมีผลกระทบต่อเครื่องยนต์น้อยมากสามารถยอมรับได้ (Hield *et al.*, 2011)



ภาพที่ 49 ความดันตกคร่อมที่ทางออกเครื่องฟอกไอเสียเชิงแรงปฏิกิริยา (ก) OEM (ข) Baffles (ค) Pipe Extension



ภาพที่ 50 การหมุนวนของก๊าซไอเสียที่หน้า substrate (ก) OEM (ข) Pipe Extension

6. พิจารณาผลทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเริ่มต้นน้ำมัน

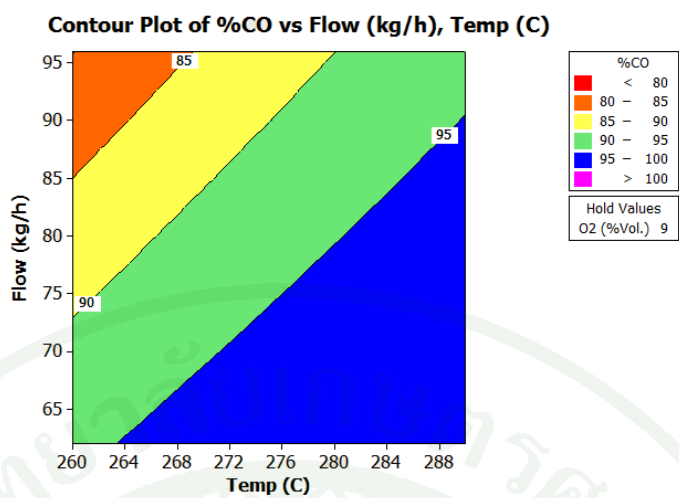
การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการฉีดน้ำมัน จากงานวิจัยของ (น้อยเพ็ง, 2554) พบว่าที่อุณหภูมิ 230 – 260°C การฉีดน้ำมัน Raw Fuel สามารถยกอุณหภูมิไอเสียได้น้อยหรือบางกรณีก็ไม่สามารถยกอุณหภูมิได้เลย ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้การออกแบบการทดลองมาช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสม โดยเราเลือกนำกรณี Baffles มาใช้เพื่อหาสภาวะเนื่องจากเป็นกรณีที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีที่สุด และเลือกปฏิกิริยาเคมีของ Langmuir Hinshelwood Lumped ซึ่งมีปัจจัยที่สนใจอยู่ 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ปริมาณความเข้มข้นของ CO และ ปริมาณความเข้มข้นของ C_3H_8 แต่ในงานวิจัยเลือก

ปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล และปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน เนื่องจากในหลายๆงานวิจัยได้บอกว่าอุณหภูมิก๊าซไอเสียและปริมาณความเข้มข้นของ O_2 มีความสำคัญต่อการยกอุณหภูมิเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ต่อมาเราเราเลือกอัตราการไหลเชิงมวลเป็นปัจจัยควบคุมเนื่องจากอัตราการไหลที่รุนแรงจะส่งผลต่อการกระจายตัวของน้ำมัน ซึ่งส่วนที่สนใจในงานวิจัยนี้

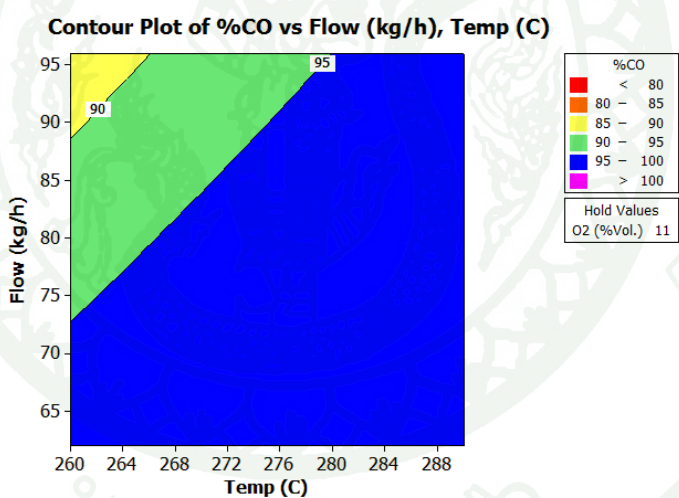
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ

Case	อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}C$)	ปริมาณ O_2 (% Vol.)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)
1	260	9	79
2		11	62
3		11	96
4		13	79
5	275	9	62
6		9	96
7		11	79
8		11	79
9		11	79
10		13	96
11		13	62
12	290	9	79
13		11	96
14		11	62
15		13	79

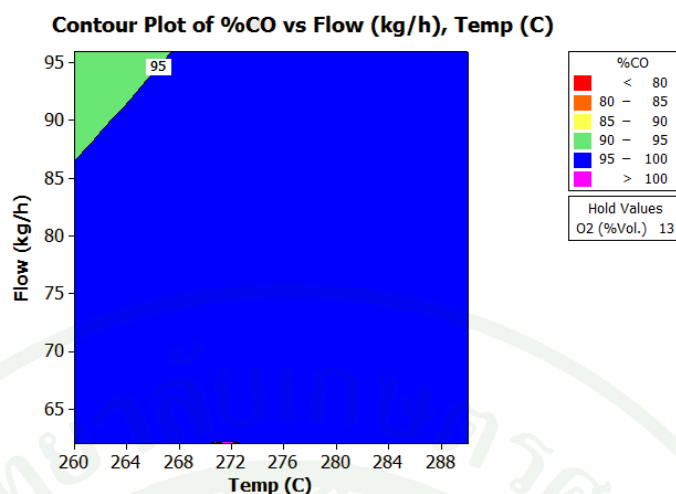
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ จะลดได้ประมาณ 80 – 100 % สภาวะที่ต่ำที่สุดในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้เกินกว่า 85 % คือ อุณหภูมิไอเสีย 260 $^{\circ}C$ อัตราการไหลเชิงมวล 85 kg/h และ ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน สามารถลดได้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิมแสดงดังภาพที่ 51 – 53



ภาพที่ 51 ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร

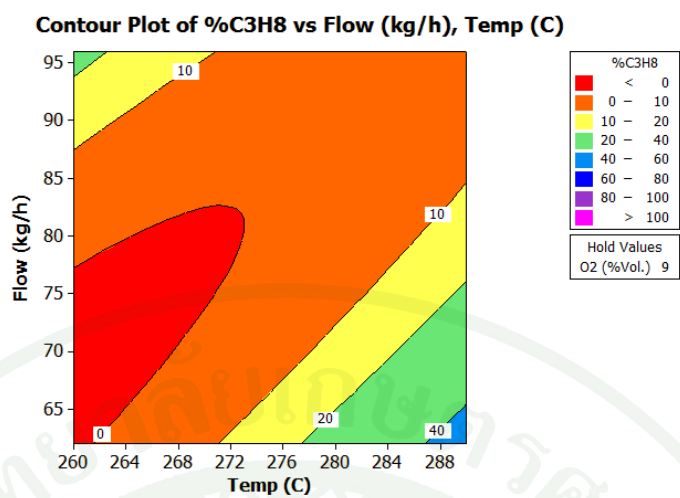


ภาพที่ 52 ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร

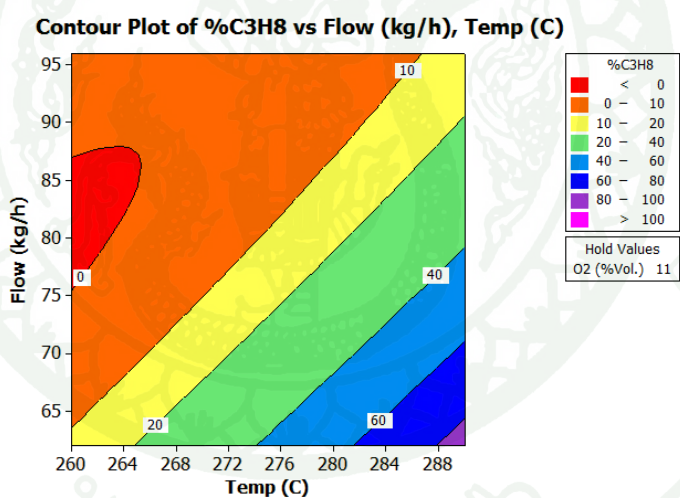


ภาพที่ 53 ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร

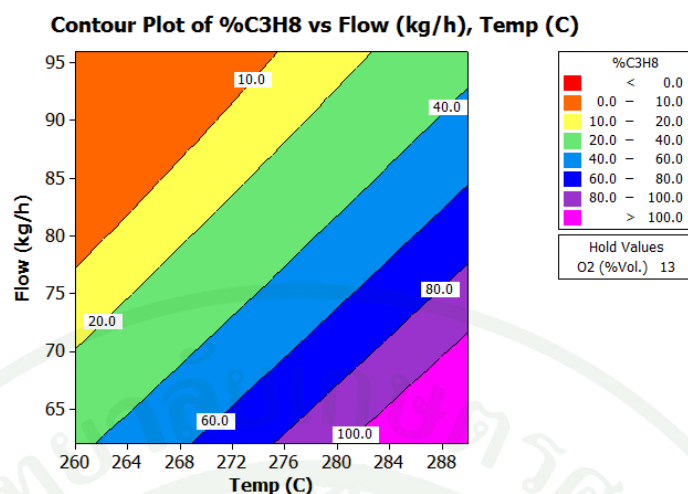
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพบว่า เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 260 °C อัตราการไหลเชิงมวล 62 – 77 kg/h แสดงดังภาพที่ 54 จะไม่สามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เลย แต่เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลมีค่าสูงกว่า 77 kg/h ขึ้นไปสามารถลดปริมาณ C_3H_8 ได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อมีอัตราการไหลเชิงมวลสูงจะช่วยให้การคลุกเคล้าของน้ำมันกับก๊าซไอเสียได้ดีขึ้น ซึ่งเกิดความปั่นป่วน (Turbulence) สูง ออกซิเจนสามารถเข้าไปผสมกับ C_3H_8 เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จึงช่วยให้อุณหภูมิที่ 260 °C สามารถลดปริมาณ C_3H_8 ได้ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนก็ช่วยลดปริมาณ C_3H_8 เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 54 ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร

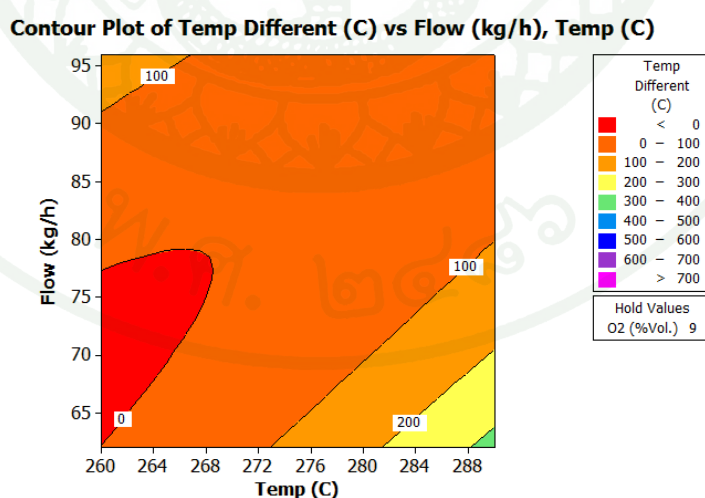


ภาพที่ 55 ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร



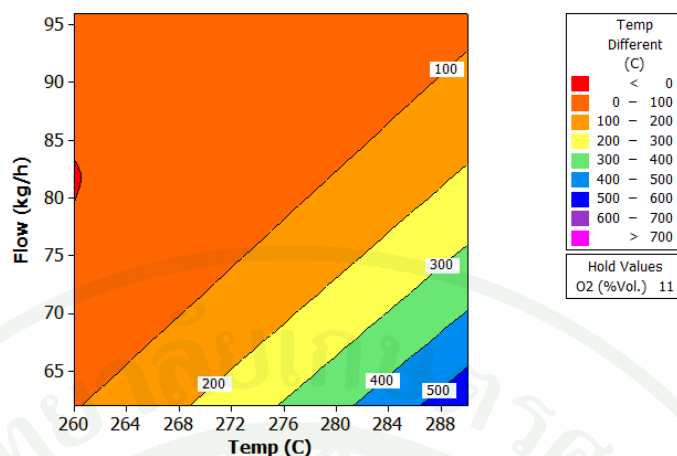
ภาพที่ 56 ประสิทธิภาพการลดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มจากของออกซิเดชันของก๊าซไอเสียพบว่า สภาพที่ต่ำที่สุดที่สามารถยกอุณหภูมิขึ้นก็คือ อุณหภูมิไอเสีย 260 °C อัตราการไหลเชิงมวล 80 kg/h และ ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ช่วยให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นยิ่งกว่าเดิมแสดงดังภาพที่ 57 – 59



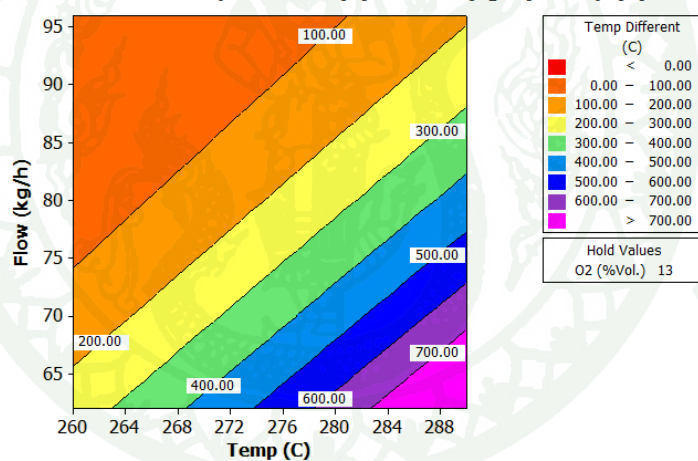
ภาพที่ 57 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9 % โดยปริมาตร

Contour Plot of Temp Different (C) vs Flow (kg/h), Temp (C)



ภาพที่ 58 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 11 % โดยปริมาตร

Contour Plot of Temp Different (C) vs Flow (kg/h), Temp (C)



ภาพที่ 59 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 13 % โดยปริมาตร

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันและปรับปรุงการกระจายตัวของวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานปานกลาง โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งมีการใช้ Volumetric Reaction และ Langmuir Hinshelwood Lumped เป็น Kinetic Model โดยได้ทดลองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 2400 rpm, Lambda 1.7 อนุภาคน้ำมันของไอเสีย 290 °C ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ Volumetric Reaction และ Langmuir Hinshelwood Lumped พบว่า

1.1 ผลจากการใช้ Volumetric Reaction และ Langmuir Hinshelwood Lumped ให้ผลที่ได้ออกมาใกล้เคียงกัน สามารถใช้แทนกันได้ในช่วงที่อนุภาคน้ำมันไอเสียต่ำกว่า 350 °C แต่เมื่ออนุภาคน้ำมันไอเสียสูงกว่า 400 °C จะทำให้การทำนายผลของ Volumetric Reaction ขาดความแม่นยำ

1.2 เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุภาคน้ำมันหลังการฉีดน้ำมัน และการลดปริมาณ HC ที่ระยะต่างๆ พบว่าทั้ง 2 ปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาการภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO พบว่าทั้ง 2 ปฏิกิริยามีความแตกต่างกัน โดย LH-Lumped มีตัวแปรที่มากกว่า ทำให้ทำนายผลครอบคลุมมากกว่า

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันพบว่า

2.1 การติดแผ่นควบคุมการไหล สามารถช่วยทำให้อนุภาคน้ำมันสม่ำเสมอที่สุด เมื่อเทียบกับ Pipe Extension แต่ส่งผลให้ความดันตกคร่อมระบบสูงขึ้น

2.2 การเพิ่มระยะทางในการคลุกเคล้าก๊าซไอเสียกับน้ำมันที่ฉีดออกมา สามารถช่วยได้ในระดับหนึ่ง แต่อาจต้องใช้ระยะทางที่ยาวมากถ้าต้องการให้อนุภาคน้ำมันสม่ำเสมอ

2.3 การติดแผ่นควบคุมการไหล ทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้นแต่สามารถยอมรับได้ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มระยะทางทำให้ความดันตกคร่อมลดลงเนื่องจากทำให้การไหลเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น เมื่อความดันที่ Inlet Cone ลดน้อยลง การกระจายตัวของน้ำมันก็สม่ำเสมอ ก็ทำให้อุณหภูมิกระจายตัวได้ดีขึ้นเช่นกัน

3. สภาพะทำงานที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งแผ่นควบคุมการไหล

3.1 สภาพะที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถเริ่มลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนคือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 260 °C ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9% โดยปริมาตร อัตราการไหลเชิงมวล 77 kg/h

3.2 ที่อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 260 °C ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 9% โดยปริมาตร อัตราการไหลเชิงมวล 62 – 77 kg/h ไม่สามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นเพราะ มีอัตราการไหลต่ำ ทำให้น้ำมันที่ฉีดออกมาไม่สามารถเคลือบเคล้ากันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากเทอร์โบชาร์จเป็นแบบ Uniform ถ้าหากกำหนดให้เป็น Non-Uniform อาจจะได้เห็นการกระจายตัวที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะทำงานวิจัยมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

2. ถ้าหากมีการนำเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไปหา Light-off Temperature มาก่อน จะช่วยทำให้การปรับจูนแบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ง่ายขึ้น

3. จากข้อมูลการทดลองถ้าหากมีการวัดปริมาณสัดส่วนก๊าซไอเสียและอุณหภูมิก่อนเข้า substrate จะช่วยทำให้มั่นใจยิ่งขึ้นว่าปริมาณน้ำมันที่ฉีดนั้นถูกต้อง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ณภูมิ ไวทยะพันธ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย. 2554. การลดปริมาณก๊าซมีเทนของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระการทำงานต่ำโดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์, AEC04. น. 49. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กระบี่.

อนิรุทธิ์ น้อยเพ็ง. 2554. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดก๊าซมีเทนจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยวิธีการฉีดน้ำมันหน้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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.

Chiew, L., P. Kroner and M. Ranalli. 2005. Diesel Vaporizer: An Innovative Technology for Reducing Complexity and Costs Associated with DPF Regeneration. **SAE International** 2005-01-0671.

Ciambelli, V., V. Palma and P. Russo. 2003. Microwave Induced Catalytic Combustion Of Soot. **SAE NA** 2003-01-48.

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.

Dominguez, A., B. Fidalgo, Y. Fernandez, J.J. Pis, J.A. Menendez. 2007. Microwave-assisted catalytic decomposition of methane over activated carbon for CO₂-free hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy** 32: 4792–4799.

- Deutschmann, O., R. Schwiedernoch, L. I. Maier and D. Chatterjee. 2001. Natural Gas Conversion in Monolithic Catalysts: Interaction of Chemical Reactions and Transport Phenomena. **Studies in Surface Science and Catalysis** 136: 251 – 258.
- Florchinger P., U. Zink, W. Cutler and D. Tomazic. 2004. DPF Regeneration-Concept to avoid Uncontrolled Regeneration During Idle. **SAE Technical Paper** 2004-01-2657.
- Froment, G.F. and K.B. Bischoff. 1990. **Chemical Reactor Analysis and Design**. John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney.
- Garner, C.P. and J.C. Dent. 1989. Microwave Assisted Regeneration of Diesel Particulate Trap. **SAE Technical Paper** 890174.
- Girard, James W., F. Lacin, Charles J. Hass and J. Hodonsky. 2006. Flow Uniformity Optimization for Diesel Aftertreatment Systems. **SAE International** 2006-01-1092.
- 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.
- Hayes, R.E. and S. Kolackowski. 1997. **Introduction to Catalytic Combustion**. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Heywood, J. B.. 2002. **Internal Combustion Engine Fundamental**. 20nd ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Hilden, D. L. and C. C. Crelline. 2006. **Diesel Exhaust Aftertreatment Device Regeneration System**. U.S. Patent 7,021,047.
- Karim G. A., T. Liu and W. Jones. 1993. Exhaust emissions from dual fuel engines at light loads. **SAE Paper** 932822.

- 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.
- Koltsakis G.C., P.A. Konstantinidis and A.M. Stamatelos. 1997. Development and application range of mathematical model for 3-way catalysts. **Applied Catalysis B. Environmental** 12: 167–191.
- Koltsakis G.C., O.A. Haralampous, Z.C. Samaras, L. Kraemer, F. Heimlich, K. Behnk. 2007. Control Strategies for Peak temperature Limitation in DPF Regeneration Supported by Validated Modeling. **SAE Technical Paper** 2007-01-1127.
- Koop J. and O. Deutschmann. 2009. Detailed surface reaction mechanism for Pt-catalyzed abatement of automotive exhaust gases. **Applied Catalysis B: Environmental** 91: 47 – 58.
- Lapisardi, G., L. Urfels, P. Gélin, 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.
- 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.
- 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.
- Ludecke, O. and D. Demick. 1983. Diesel Exhaust Particulate Control System Development. **SAE Technical Paper** 830085.

- Ming, C., J. Aleixo, S. Williams and T. Leprince. 2004. CFD Modelling of 3-Way Catalytic Converters with Detailed Catalytic Surface Reaction Mechanism. **SAE International** 2004-01-0148.
- Moallemi, F., G. Batley, V. Dupont, T.J. Foster, M. Pourkashanian and A. Williams. 1999. Chemical modelling and measurements of the catalytic combustion of CH₄/air mixtures on platinum and palladium catalysts. **Catalysis Today** 47: 235–244.
- Noipheng, A., N. Waitayapat, T. Aroonsrisopon, E. Wirojsakunchai, T. Thummadetsak and K. Wannatong. 2011. Experimental Investigation of Applying Raw Fuel Injection Technique for Reducing Methane in Aftertreatment of Diesel Dual Fuel Engines Operating under Medium Load Conditions. **SAE Technical Paper** 2011-01-2093.
- Nagel, T., J. Diring, and E. G. Lohmar. 2000. Minimum Test Requirements for High Cell-Density, Ultra-Thin Wall Catalyst Supports; Part I. **SAE International** 2000-01-0495.
- 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.
- Niura Y., K. Ohkubo and K. Yagi. 1986. Study on Catalytic Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter. **SAE Technical Paper** 860290.
- 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.
- Ranalli, M. and J. Klement and M. Hoehnen and R. Rosenberger. 2004. Soot Distribution in DPF Systems. A Simple and Cost Effective Measurement Method for Series Development. **SAE International** 2004-01-1432.

- Reggie, Z., Y. Huang and M. Khair. 2006. Methodologies to Control DPF Uncontrolled Regenerations. **SAE International** 2006-01-1090.
- Ricoult D. 2005. Materials Engineering and New Designs for Robust Cordierite Diesel Particulate Filters. **SAE Technical Paper** 2005-26-024.
- Shi, L., Y. Cui, K. Deng, H. Peng and Y. Chen. 2006. Study of low emission homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR). **Energy** 31: 2665–2676.
- 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.
- Tan, P., K. Deng and J. Lu. 2004. Analysis of particulate matter composition from a heavy-duty diesel engine. **Institution of Mechanical Engineers** Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering. 1325 – 1331.
- Turn, S. R.. 2006. **An Introduction to Combustion**. 2 ed. McGRAW-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.
- Wannatong, K., N. Akarapanyavit and S. Siengsanorh. 2007. Combustion and Knock Characteristics of Natural Gas Diesel Dual Fuel Engine. **SAE International** 2007-01-2047.

- 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.
- 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.
- Whidenberger, William A., David T. Sheller and Jack Walters. 1992. Experiences with 20 User Vehicles Equipped with Electrically Heated Catalyst Systems-Part I. **SAE Technical Paper** 920722.
- 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.
- Voltz, S.E. , C.R. Morgan, D. Liederman and S.M. Jacob. 1973. **Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development** 12: 294–301.
- 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.





ภาคผนวก ก

การเขียนสมการ Langmuir Hinshelwood Lumped ให้อยู่ในรูปภาษาคอมพิวเตอร์ C++

```

#include "udf.h"

#define R 8.314          /*[j/(mol*K)]*/

/*----- CO REACTION -----*/
#define K1 74074000      /*[kmol.K/(m^2.s)]*/
#define K2 65.5          /*[-]*/
#define K3 2080          /*[-]*/
#define K4 3.98          /*[-]*/
#define K5 479000        /*[-]*/

#define E1 4615          /*5726.85[degC]*/
#define E2 961           /*-1234.15[degC]*/
#define E3 -361          /*-634.15[degC]*/
#define E4 11611         /*-11884.15[degC]*/
#define E5 3733          /*3459.85[degC]*/

/*----- C3H8 REACTION -----*/
#define K6 1.1111e9       /*[kmol.K/(m^2.s)]*/
#define K7 65.5          /*[-]*/
#define K8 2080          /*[-]*/
#define K9 3.98          /*[-]*/
#define K10 479000       /*[-]*/

#define E6 8285          /*7724.85[degC]*/
#define E7 961           /*-1234.15[degC]*/
#define E8 -361          /*-634.15[degC]*/
#define E9 11611         /*-11884.15[degC]*/
#define E10 3733         /*3459.85[degC]*/

```

```

/*----- C3H6 REACTION -----*/

#define K12 1.1111e9      /*[kmol.K/(m^2.s)]*/
#define K13 65.5          /*[-]*/
#define K14 2080          /*[-]*/
#define K15 3.98          /*[-]*/
#define K16 479000        /*[-]*/

#define E12 8285          /*7724.85[degC]*/
#define E13 961           /*-1234.15[degC]*/
#define E14 -361          /*-634.15[degC]*/
#define E15 11611         /*-11884.15[degC]*/
#define E16 3733          /*3459.85[degC]*/

/*----- NO REACTION -----*/

#define K11 1e11          /*[m^(2.5).K/(kmol^(0.5).s)] ----- NO Equation 1*/
/*#define K11 100000      /*[m^(2.5).K/(kmol^(0.5).s)] ----- NO Equation 2*/
#define E11 6200          /*5926.85[degC]----- NO Equation 1*/
/*#define E11 6200        /*[degC]-----NO Equation 2*/
#define A 0               /*Temperature Dependency, [-]*/

DEFINE_VR_RATE(VR_RATE_BOOST,c,t,r,mw,y,rate,rr_t)
{
double yo2 = y[0];
double yco2 = y[1];
double yco = y[2];
double yh2o = y[3];
double yc3h6 = y[4];
double yc3h8 = y[5];
double yno = y[6];
double yn2 = y[7];

```

```

double mwmix;

double Patm;

double rho;

double Ts;

double xo2, xco2, xco, xh2o, xc3h6, xc3h8, xno, xno2;

double AA, BB, CC, DD, EE;

double FF, GG, HH, II, JJ;

double KK, LL, MM, Kequ1, Kequ2;

double NN, OO, PP, QQ, RR;

double co2, cco2, cco, ch2o, cc3h6, cc3h8, cno, cno2;

mwmix =
1/((y[0]/mw[0])+(y[1]/mw[1])+(y[2]/mw[2])+(y[3]/mw[3])+(y[4]/mw[4])+(y[5]/mw[5])+(y[6]/m
w[6])+(y[7]/mw[7])); /*1/((0.008783243/31.9988)+(1.568849e-
06/44.00995)+(0.01457824/28.01055)+(6.422038e-
07/18.01534)+(0.0006750436/42.08127)+(0.001069646/30.0061)+(0.974891629/28.0134));*/
Patm = 101325+C_P(c,t);
Ts = C_T(c,t);
rho = C_R(c,t);

/*Mass Fraction to Mole Fraction*/
xo2 = y[0]*mwmix/mw[0];
xco2 = y[1]*mwmix/mw[1];
xco = y[2]*mwmix/mw[2];
xh2o = y[3]*mwmix/mw[3];
xc3h6 = y[4]*mwmix/mw[4];
xc3h8 = y[5]*mwmix/mw[5];
xno = y[6]*mwmix/mw[6];

```

/*Mass Fraction to Molar Concentration*/

co2 = y[0]*rho/mw[0];

cco2 = y[1]*rho/mw[1];

cco = y[2]*rho/mw[2];

ch2o = y[3]*rho/mw[3];

/*----- CO EQUATION -----*/

AA = K1*exp(-E1/Ts)*xco*xo2;

BB = K2*exp(-E2/Ts)*xco;

CC = K3*exp(-E3/Ts)*xc3h6;

DD = K4*exp(-E4/Ts)*pow(xco,2)*pow(xc3h6,2);

EE = K5*exp(-E5/Ts)*pow(xno,0.7);

/*----- C3H8 EQUATION -----*/

FF = K6*exp(-E6/Ts)*xc3h8*xo2;

GG = K7*exp(-E7/Ts)*xco;

HH = K8*exp(-E8/Ts)*xc3h6;

II = K9*exp(-E9/Ts)*pow(xco,2)*pow(xc3h6,2);

JJ = K10*exp(-E10/Ts)*pow(xno,0.7);

/*----- C3H6 EQUATION -----*/

NN = K12*exp(-E12/Ts)*xc3h6*xo2;

OO = K13*exp(-E13/Ts)*xco;

PP = K14*exp(-E14/Ts)*xc3h6;

QQ = K15*exp(-E15/Ts)*pow(xco,2)*pow(xc3h6,2);

RR = K16*exp(-E16/Ts)*pow(xno,0.7);

/*----- NO EQUATION -----*/

/*Kequ1 = pow((Patm/(UNIVERSAL_GAS_CONSTANT*Ts)), -1)*exp((-

18.518)+(13697/Ts)+(0.5582*(Ts/1000))-(0.04489*pow((Ts/1000),2))-(0.8278*log(Ts/1000)));*/

/*Kequ2 = pow((Patm/(UNIVERSAL_GAS_CONSTANT*Ts)), -0.5)*exp((-

```

9.259)+(6848/Ts)+(0.2791*(Ts/1000))-(0.02245*pow((Ts/1000),2))-(0.4139*log(Ts/1000))),*/
/*KK = K11*pow(Ts,A)*exp(-E11/Ts);*/
/*LL = (pow(cno,2)*co2)-(pow(cno,2)/Kequ1); /*NO Equation 1*/
/*MM = (cno*pow(co2,0.5))-(cno/2/Kequ2); /*NO Equation 2*/

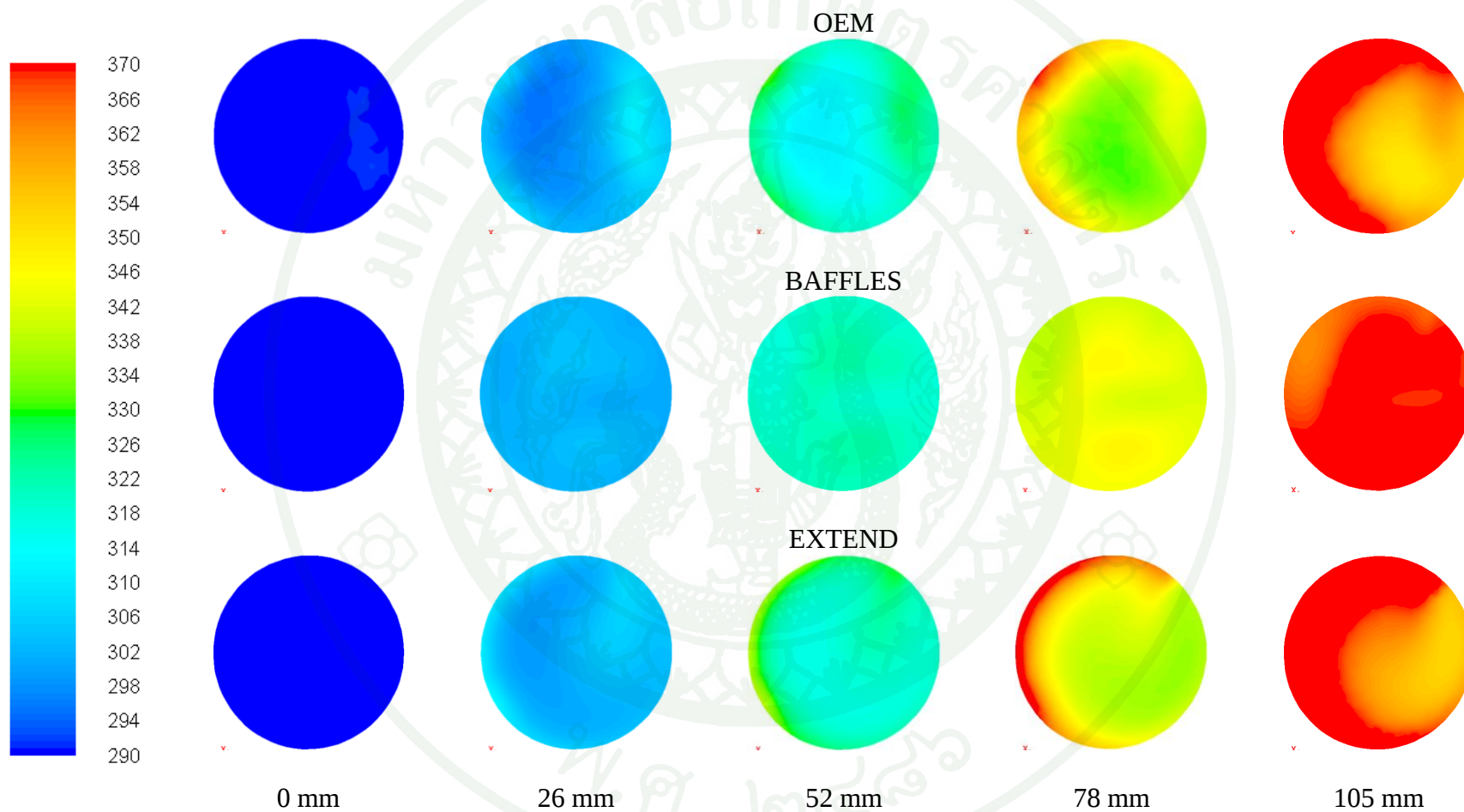
if (FLUID_THREAD_P(t) && THREAD_VAR(t).fluid.porous)
{
    if (STREQ(r->name, "reaction-1")) /*--- CO
REACTION FROM AVL BOOST ---*/
        *rate = AA/(pow(1+BB+CC,2)*(1+DD)*(1+EE)*Ts);
    else if (STREQ(r->name, "reaction-2")) /*--- C3H8 REACTION
FROM AVL BOOST ---*/
        *rate = FF/(pow(1+GG+HH,2)*(1+II)*(1+JJ)*Ts);
    /*else if (STREQ(r->name, "reaction-3")) /*--- C3H6 REACTION
FROM AVL BOOST ---*/
        /**rate = NN/(pow(1+OO+PP,2)*(1+QQ)*(1+RR)*Ts);*/
    /*else if (STREQ(r->name, "reaction-4")) /*--- NO REACTION Kequ1
FROM AVL BOOST ---*/
        /**rate = KK*LL;*/
    /*else if (STREQ(r->name, "reaction-4")) /*--- NO REACTION Kequ2 FROM
AVL BOOST ---*/
        /**rate = KK*MM;*/
}
else *rate = 0.;
*rr_t = *rate;
}

```

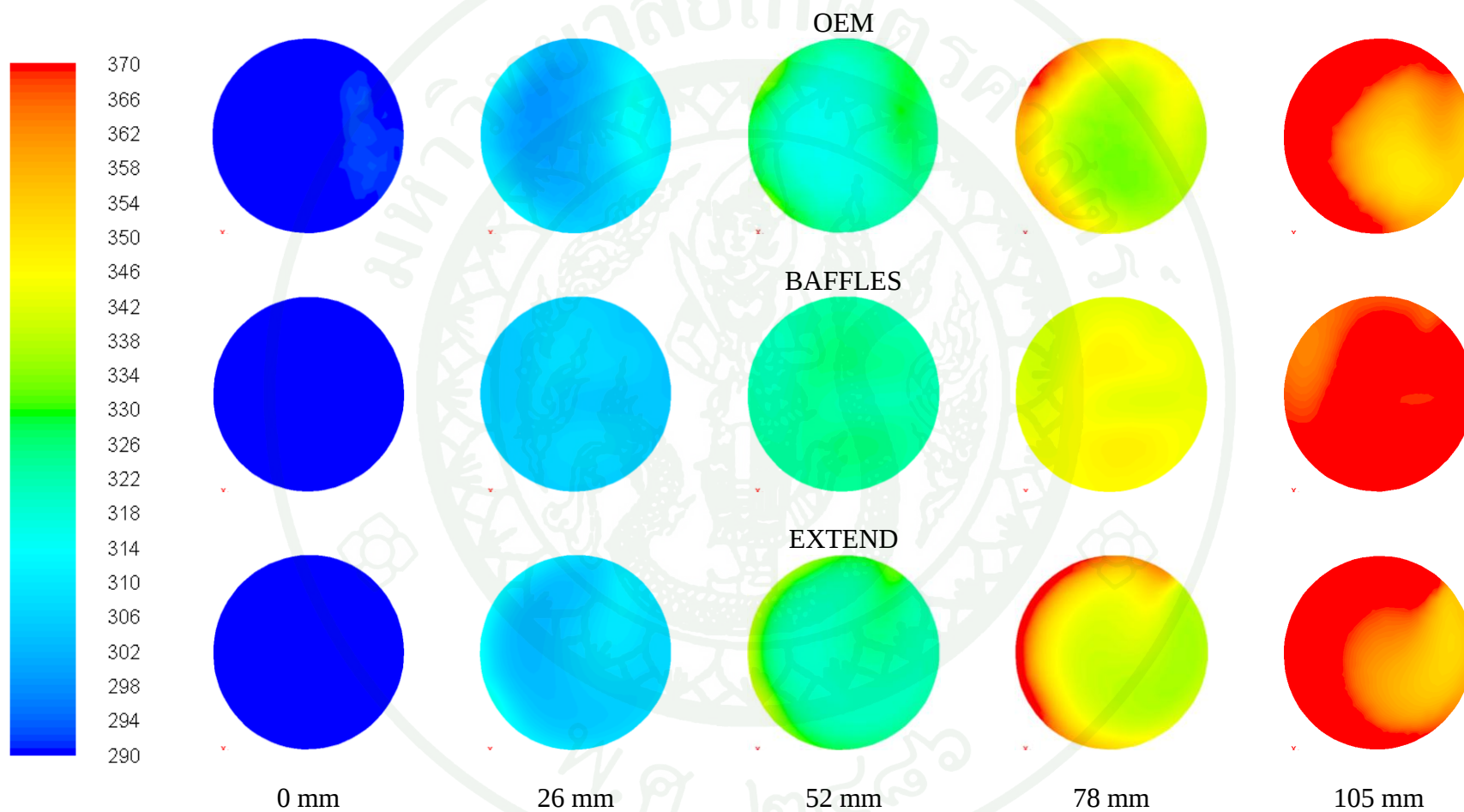
ภาพผนวกที่ ก1 การเขียนสมการ Langmuir Hinshelwood Lumped ให้อยู่ในรูปภาษาคอมพิวเตอร์

C++

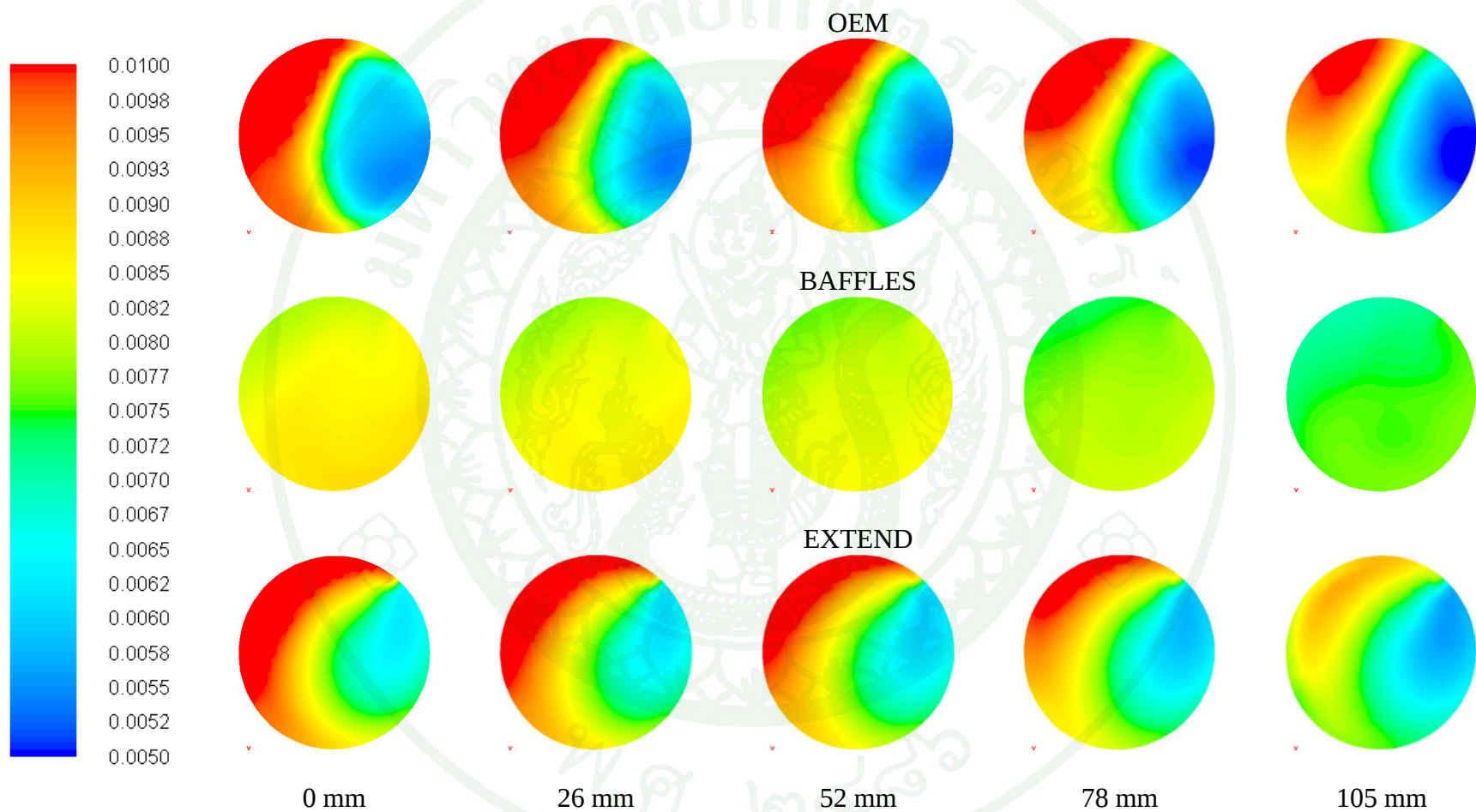




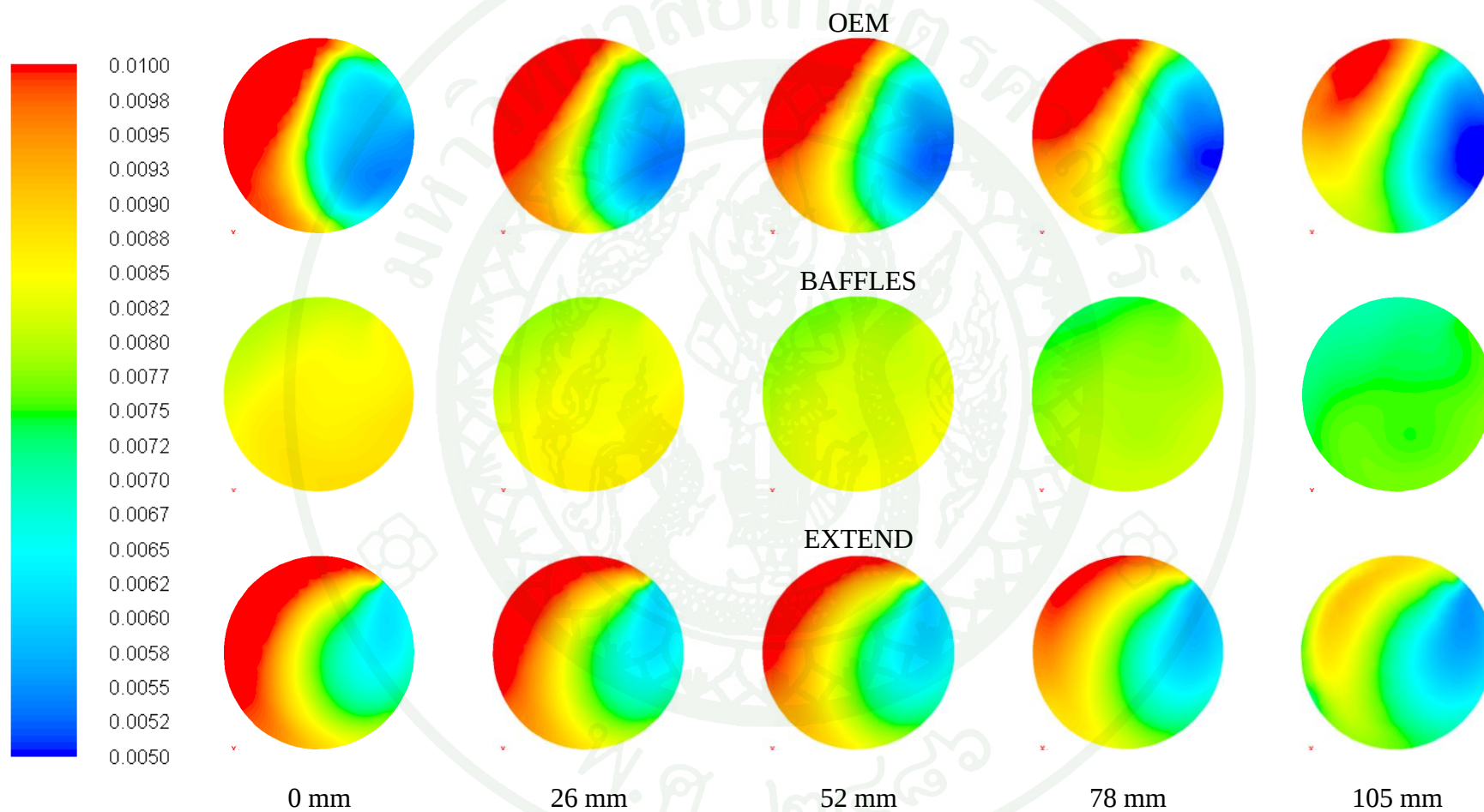
ภาพผนวกที่ ข1 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมหลังการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction



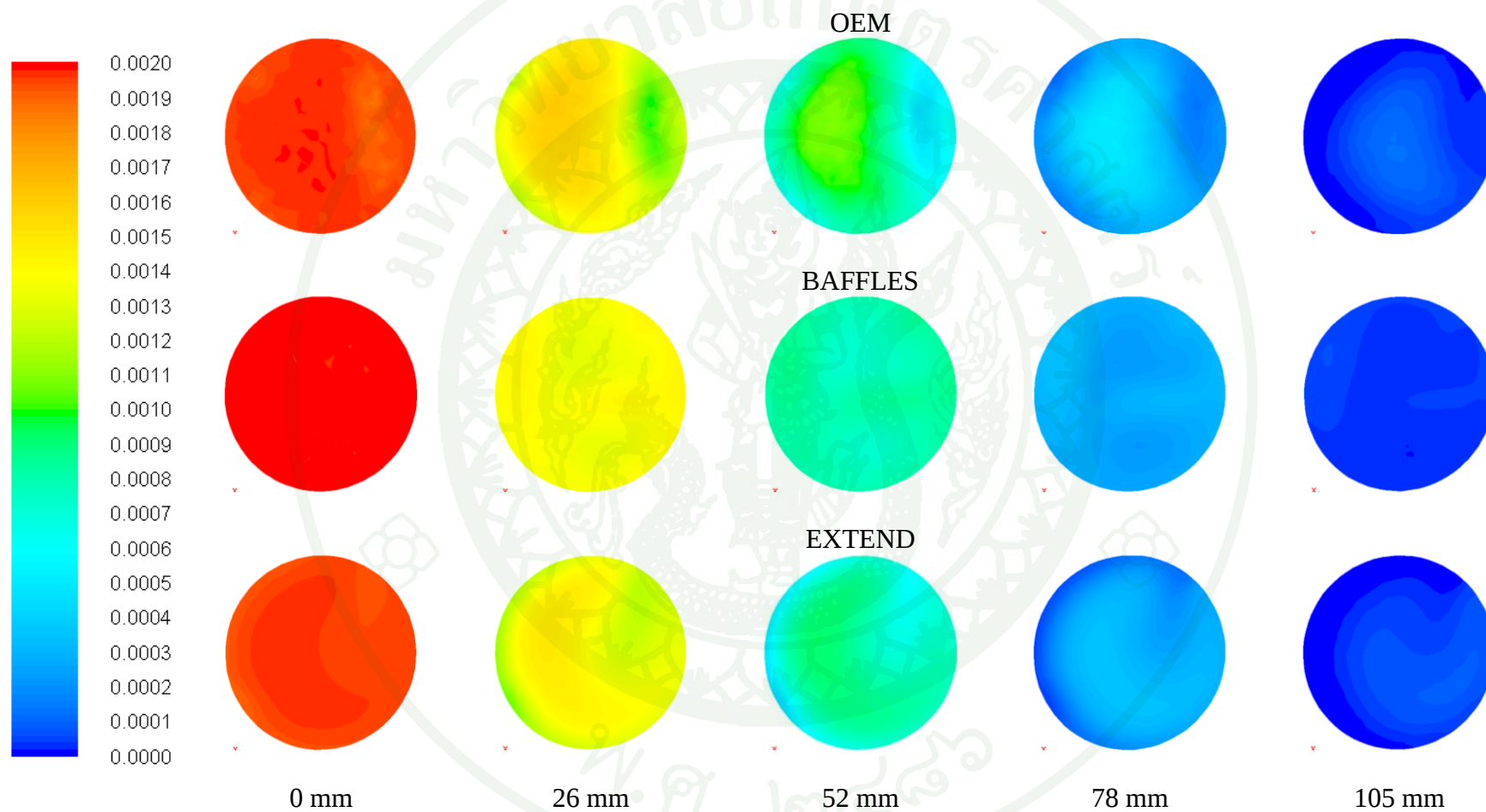
ภาพผนวกที่ ข2 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมหลังการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped



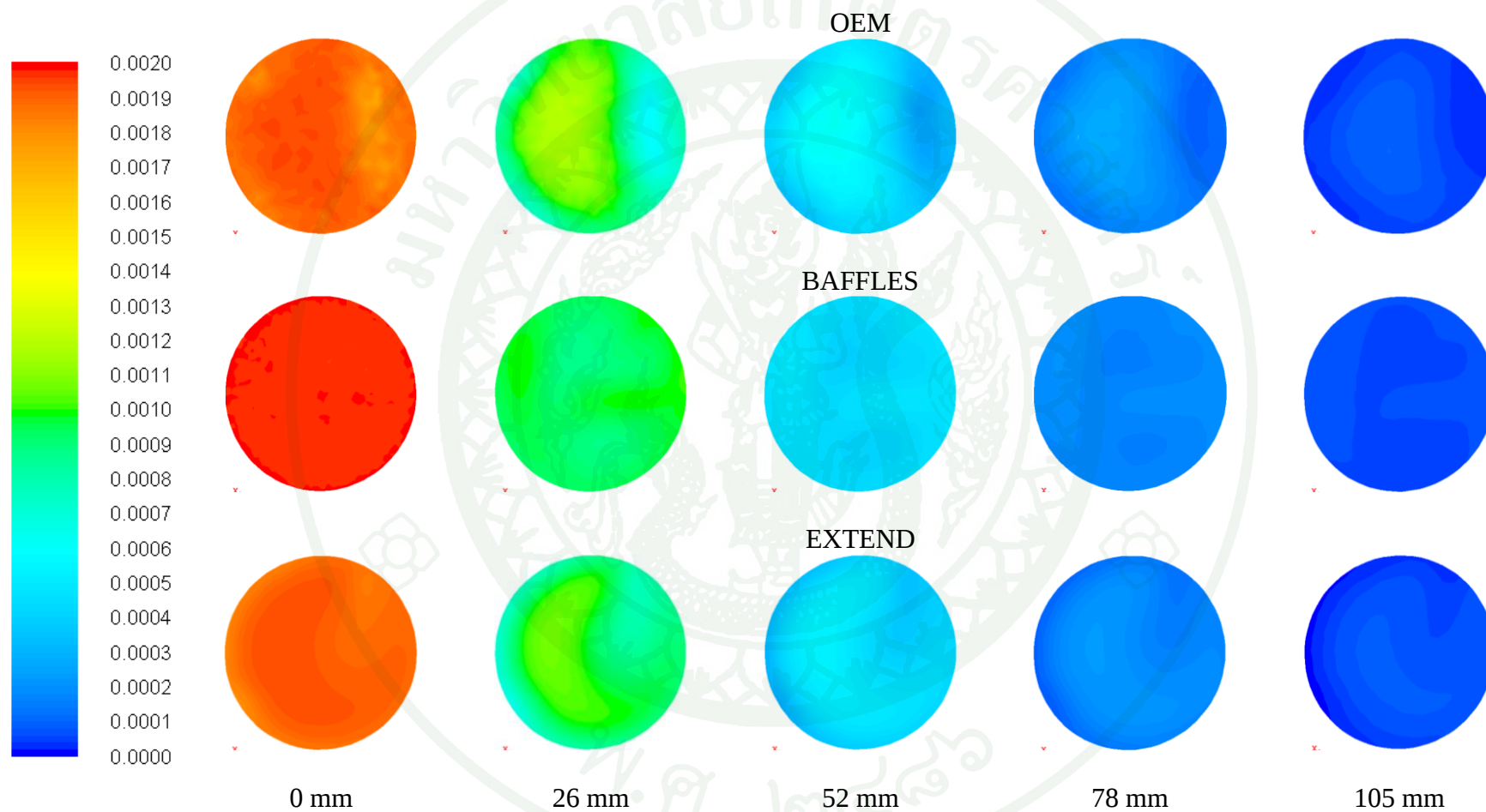
ภาพผนวกที่ ข3 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction



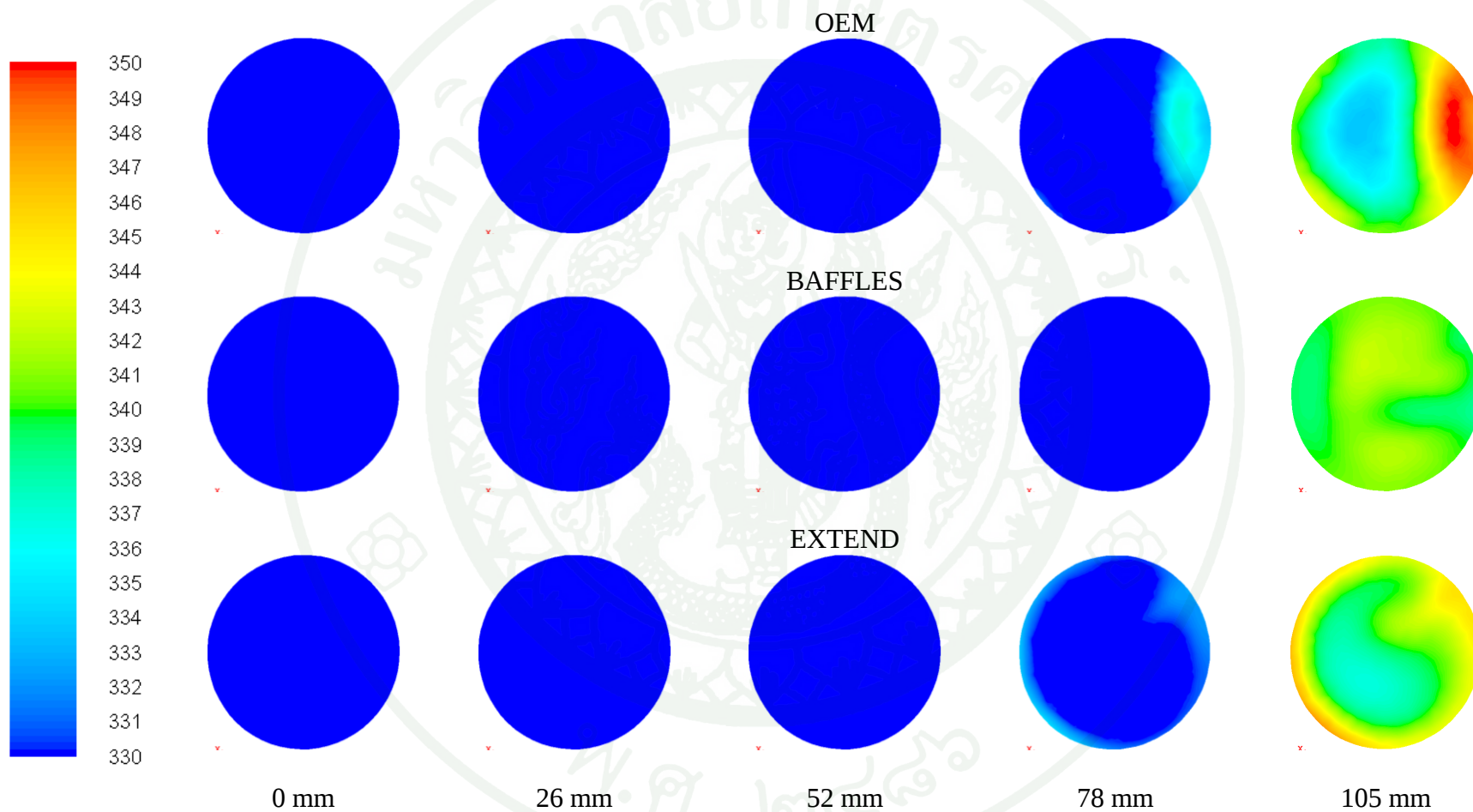
ภาพผนวกที่ ข4 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ C_3H_8 ที่ระยะต่างๆโดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped



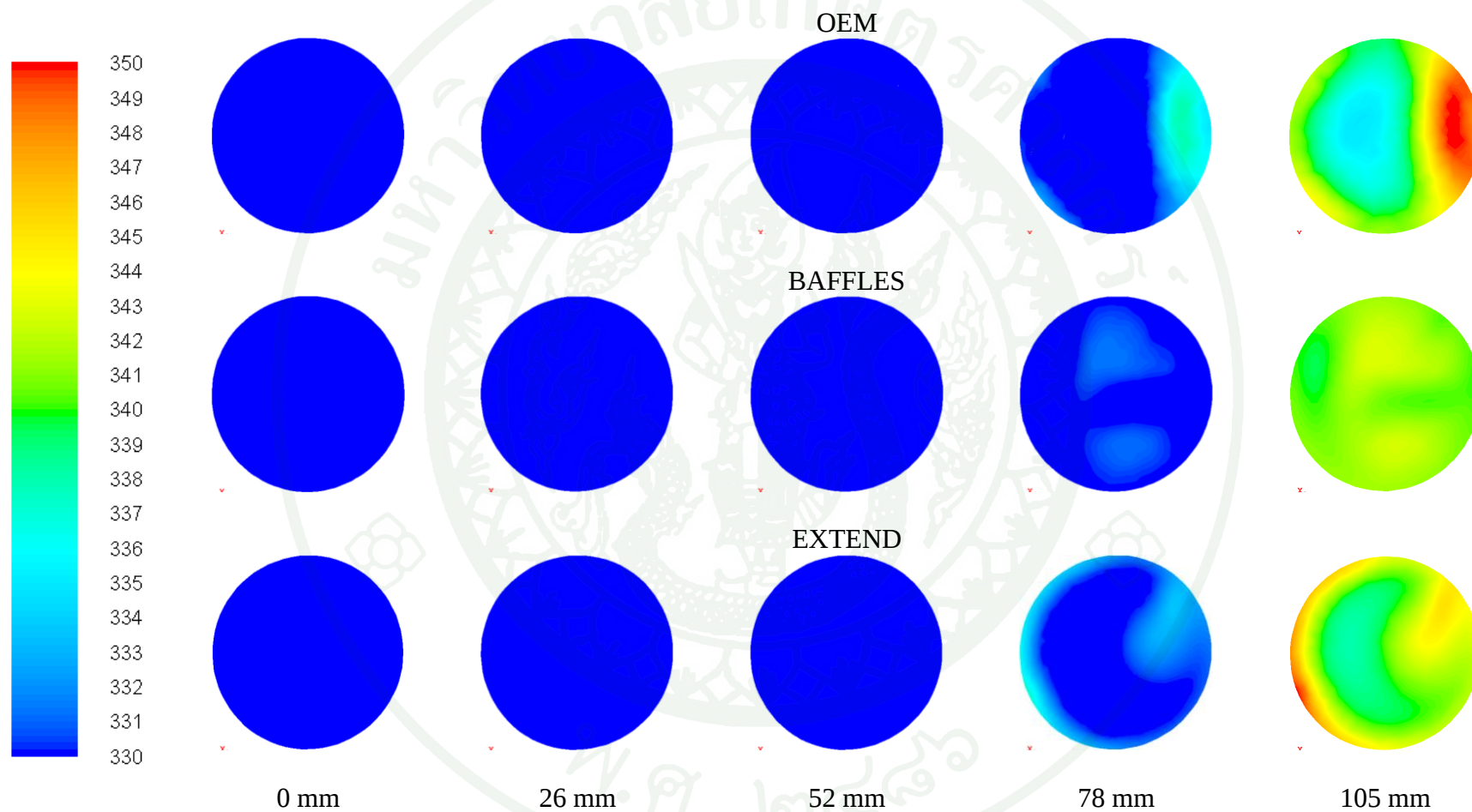
ภาพผนวกที่ ๕ ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Volumetric Reaction



ภาพผนวกที่ ๖ ภาพตัดขวางภายใน substrate ของ CO ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped



ภาพผนวกที่ ข7 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมก่อนการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆโดยใช้ Volumetric Reaction



ภาพผนวกที่ ข8 ภาพตัดขวางภายใน substrate ของอนุกรมก่อนการฉีดน้ำมันที่ระยะต่างๆโดยใช้ Langmuir Hinshelwood Lumped

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายวัชรินทร์ จันทสุวรรณ
วันเกิด	วันที่ 3 กรกฎาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) พ.ศ. 2551

