



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรต่อการลดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ
เครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Impacts of Parameters on CO Reductions in a Diesel Oxidation Catalyst of Diesel Dual
Fuel Engines Using Design of Experiments

نامผู้วิจัย นายธนศ ลิ้มภูมิมงคล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของตัวแปรต่อการลดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของ
เครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Impacts of Parameters on CO Reductions in a Diesel Oxidation Catalyst of
Diesel Dual Fuel Engines Using Design of Experiments

โดย

นายธนศ ลิ้มกูรมงคล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ. ลีณัฐมิ่งมณฑล 2556: อิทธิพลของตัวแปรต่อการลดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D. 112 หน้า

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมคือเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล โดยนำก๊าซธรรมชาติผสมเข้ากับอากาศที่ท่อไอดีและฉีดน้ำมันดีเซลโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยต่างๆ พบว่าในช่วงภาระการทำงานต่ำของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณมลพิษก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงออกมาซึ่งมากกว่าปริมาณ CO จากเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการดัดแปลงส่งผลให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ติดมากับเครื่องยนต์ดีเซลเดิมไม่สามารถลด CO ลงได้ตามมาตรฐานได้ โดยปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion อยู่ 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณความเข้มข้นของไพรเพน ในงานวิจัยนี้ได้นำการออกแบบการทดลองทางสถิติศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลด CO รวมทั้งหาสภาวะทำงานที่เหมาะสมเมื่อเครื่องยนต์ทำงานในโหมด DDF สำหรับการลดปริมาณ CO ลงได้ 50% และ 90% ตามลำดับ

ผลจากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีแฟคทอเรียลบางส่วน เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion ออกไป พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไพรเพน ไม่มีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยแผนการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่า อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 180°C สามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50% และการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่ออกมามากที่สุดที่เครื่องยนต์ทดสอบ ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์มากถึง 200°C อัตราการไหลเชิงมวล 25 kg/h และปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 16% จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 90%

Tanes Limpurimongkon 2013: Impacts of Parameters on CO Reductions in a Diesel Oxidation Catalyst of Diesel Dual Fuel Engines Using Design of Experiments. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Ekathai Wirojsakunchai, Ph.D. 112 pages.

A Diesel Dual Fuel (DDF) engine is an adapted diesel engine that uses natural gas and diesel fuel as the energy source at the same time. Natural gas is mixed with air at the intake manifold and then, diesel fuel is injected into combustion chamber directly. Based on the past DDF literatures, they were indicated that carbon monoxide (CO) emissions were more substantial at low load conditions than those when running in diesel engine modes. The catalytic converter that was installed to this diesel engine was, therefore, not capable to reduce CO emissions abide by to the emission regulation. Literatures indicated that the exhaust temperature, mass flow rate, oxygen concentration, CO concentration, and propane concentration may affect to CO conversions of the catalytic converter. In the present work, Design of Experiments (DOE) is employed to better the understanding of behavior and various factors that affect CO reductions in the catalytic converter. Once the knowledge is founded, the optimization of CO reductions in the catalytic converter at 50% and 90% is studied extensively.

Using Fractional Factorial Design for factors screening that not affect CO conversions, it is founds that the exhaust temperature, mass flow rate, oxygen concentration, and CO concentration affect CO conversions of the catalytic converter significantly. The optimization of these factors, by using Box-Behnken Design, indicate that 50% of CO conversions occur at the exhaust temperature of 180°C in order to reduce the CO concentration of 6200 ppm which is the maximum amount emitted from the tested engine. 90% of CO conversion occurs at the exhaust temperature of 200°C, the mass flow rate of 25 kg/h and the oxygen concentration of 16%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธนศ อรุณศรีโสภณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับทฤษฎีและข้อมูลต่างๆในการวิจัยตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร. กฤษฎา วรรณทอง คุณธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์ และนักวิจัย ฝ่ายเทคนิคพลังงานประยุกต์ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบ รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบคุณคณะนิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน จากห้องปฏิบัติการการเผาไหม้เชิงประยุกต์ (ACL Lab) ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อธนารักษ์ คุณแม่สมจิต และคุณป้ากิม ที่ได้อบรมและเป็นกำลังใจผู้วิจัยมาตลอดมา

ธนศ ลิ้มภูมิมงคล
เมษายน 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	88
สรุป	88
ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	92
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง	96
ภาคผนวก ข ข้อมูลและผลการวิเคราะห์สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น	99
ภาคผนวก ค ข้อมูลและผลการวิเคราะห์สำหรับแผนการทดลองสถานะที่เหมาะสม	103
ภาคผนวก ง ข้อมูลและผลการวิเคราะห์สำหรับการทำ Optimization	105
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงจำนวนการทดลองแบบสองปัจจัย	24
2	แสดงจำนวนการทดลองแบบสามปัจจัย	25
3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยพหุคูณ	33
4	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	46
5	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องฟอกโอเลียมเชิงเร่งปฏิกิริยา	47
6	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบโปรแกรมกับผลการทดลอง	55
7	แสดงการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล	56
8	แสดงการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม	57
9	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงของสภาวะการทำงานต่างๆ	59
10	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของเครื่องยนต์เพื่อหาสภาวะที่ เหมาะสม	60
11	ตารางการดำเนินงานวิจัย	61
12	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วรอบคงที่	63
13	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว	67
14	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว	72
15	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหา สภาวะที่เหมาะสม	78
16	การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการ	81
17	การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง Box-Behnken ใน เครื่องยนต์ดีเซล	97
ก2 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง Box-Behnken ใน เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	98
ข1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วคงที่	100
ข2 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว	101
ข3 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว	102
ค1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Box – Behnken	104
ง1 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% กรณีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm	106
ง2 แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% กรณีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm	107
ง3 แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% ในกรณีที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และ ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เปลี่ยนแปลงไป	108
ง4 แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับการลดปริมาณความเข้มข้นของ คาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง5	แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm	110
ง6	แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน	111

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงแผนภาพระบบก๊าซไอเสียสังเคราะห์	10
2	แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 80%	11
3	แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ 50%	12
4	แสดงระบบทดสอบที่ใช้ในการทดลอง	13
5	แสดงอุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ 50% ทั้งที่มี P, Zn และไม่มี P, Zn	13
6	แสดงปัจจัยและตัวตอบสนองที่ทำการพิจารณาของ DOC	14
7	แสดงผลการทดลองและผลที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อทำการควบคุมอัตราการใช้และปริมาณไฮโดรคาร์บอน เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของอุณหภูมิไอเสียที่ทางออกของ DOC	15
8	แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณมลพิษไอเสียของ CO และ HC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	16
9	แสดงปริมาณการเกิด CO, HC และ NO _x ในเครื่องยนต์แบบ SI เทียบกับ equivalence ratio	17
10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษไอเสียกับ air/fuel ratio ใน Three Way Catalytic	18
11	แสดงองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI ที่ความเร็วรอบ 1250 rev/min	19
12	รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป	20
13	อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์	22
14	การทดลองแบบสองปัจจัย	23
15	การทดลองแบบสามปัจจัย	24
16	การทดลอง Box-Behnken แบบสามปัจจัย	27
17	การออกแบบส่วนประสมกลางสามปัจจัย	28
18	แสดงตัวอย่างกราฟ Normal Probability Plot	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

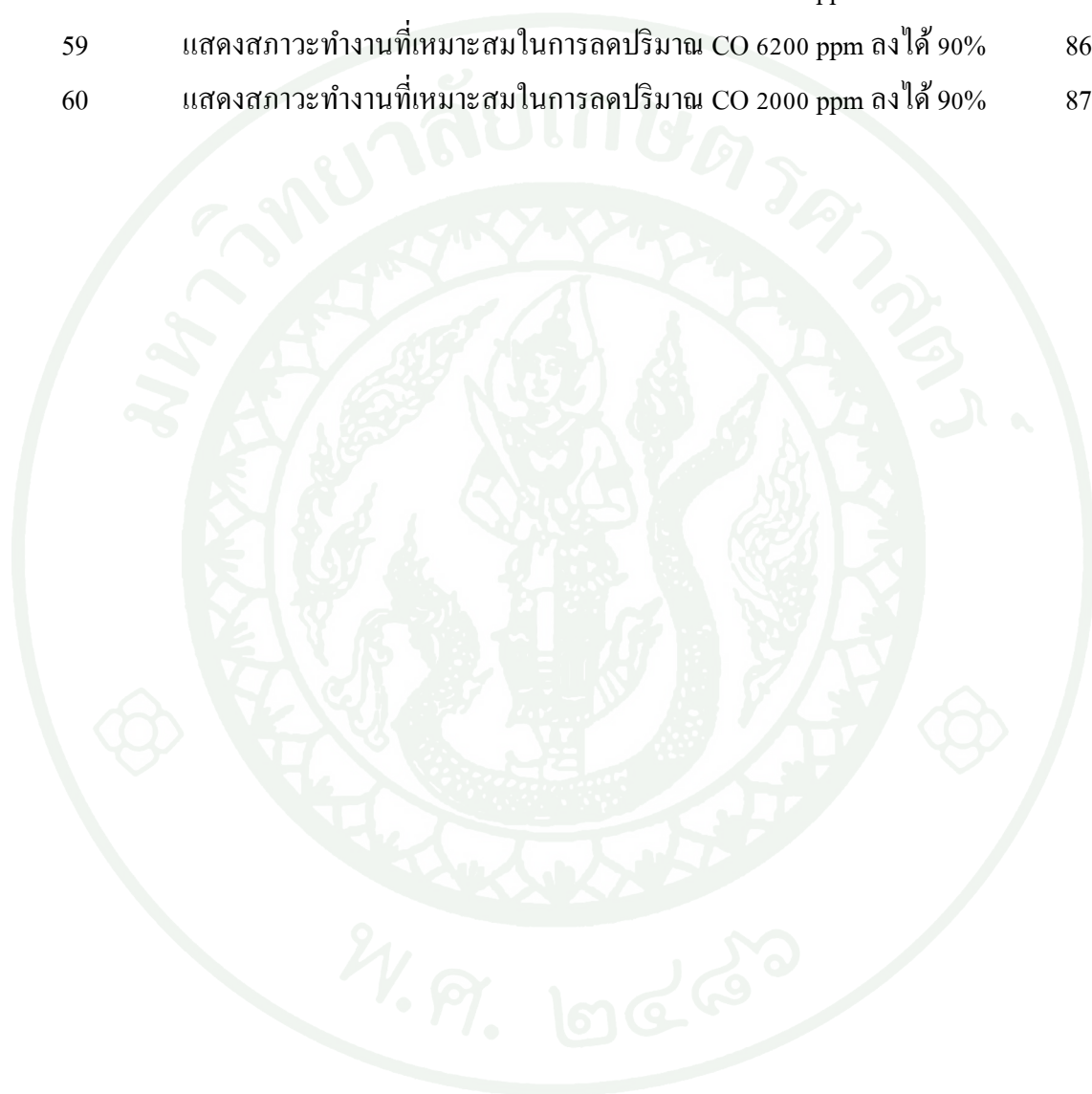
ภาพที่		หน้า
19	แสดงตัวอย่างกราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระ	29
20	แสดงตัวอย่างกราฟการตรวจสอบความเสถียร	30
21	การออกแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องฟอกไอเสีย	35
22	ระบบทดสอบของเครื่องฟอกไอเสีย	36
23	แผนภาพการทดลอง SCR Catalyst	36
24	กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์	37
25	แสดงตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ	40
26	แสดงตัวอย่างโปรแกรม AVL-BOOST	41
27	แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Simulation Control	42
28	แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Inlet Conditions	42
29	แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Catalyst	43
30	รายละเอียดเบื้องต้นของ Outlet Conditions	44
31	แสดงการทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC)	48
32	แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับขี่แบบในตัวเมืองและแบบนอกตัวเมือง ของการทดสอบแบบ NEDC	49
33	แสดงช่วง City Cycle (Loop III) ที่ใช้ในการทำงานวิจัย	50
34	แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับขี่แบบในตัวเมืองทั้ง 3 ลักษณะของการ ทดสอบแบบ NEDC ใน Loop III	51
35	แสดงแบบจำลองของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	52
36	แสดงผลการเปรียบเทียบของคาร์บอนมอนอกไซด์ใน Ordegg Cat	54
37	แสดงผลการเปรียบเทียบของโพรมะใน Ordegg Cat	54
38	แสดงผลการเปรียบเทียบของเครื่องยนต์ดีเซลระหว่างผลที่ได้จากการ ทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	แสดงผลการเปรียบเทียบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง	58
40	แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง	64
41	กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	65
42	กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	66
43	กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	67
44	แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง	68
45	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	69
46	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	70
47	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	71
48	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	71
49	แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง	73
50	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	74
51	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	75
52	กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	76
53	กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง	76
54	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken	79
55	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนอง สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken	80
56	กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken	81
57	แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณ CO 6200 ppm ลงได้ 50%	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณ CO 2000 ppm ลงได้ 50%	85
59	แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณ CO 6200 ppm ลงได้ 90%	86
60	แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณ CO 2000 ppm ลงได้ 90%	87



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

λ	=	Lambda
%	=	เปอร์เซ็นต์, ร้อยละ
A/F	=	อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง
Al_2O_3	=	อะลูมินา
ANOVA	=	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ
atm	=	หน่วยวัดความดันในอากาศ
$^{\circ}\text{C}$	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
cc	=	หน่วยวัดปริมาตร
CCD	=	การออกแบบส่วนประสมกลาง
CH_4	=	ก๊าซมีเทน (ppm)
C_2H_2	=	อะเซทิลีน
C_3H_8	=	โพรเพน
CI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
CNG	=	ก๊าซธรรมชาติสามารถอัดตัวได้
CO	=	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Vol%)
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Vol%)
COHb	=	คาร์บอนซีสโมโกลบิน
CPSI	=	Cell Per Square Inch
DDF	=	Diesel Dual Fuel engines; เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
DDFCAT	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
DOC	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
DPF	=	เครื่องกรองเขม่าอนุภาค
ECU	=	ตัวควบคุมเครื่องยนต์
EGR	=	ระบบ Exhaust Gas Recirculation คือ การนำเอาก๊าซไอเสียหลังจากกระบวนการเผาไหม้กลับมาเผาไหม้ใหม่เพื่อลดการชิงจุดระเบิด (Knock) และ ลด NO_x
FLT	=	วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

GHG	=	ก๊าซเรือนกระจก
g/ft ³	=	หน่วยวัดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี (กรัมต่อลูกบาศก์ฟุต)
H ₂	=	ก๊าซไฮโดรเจน (ppm)
H	=	อะตอมของไฮโดรเจน
H/C	=	อัตราส่วนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน
HC	=	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
HNO ₃	=	กรดไนตริก
H ₂ O	=	น้ำ
°K	=	หน่วยวัดอุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
kg/hr	=	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
kg/kmol	=	หน่วยวัดปริมาณ (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)
kW	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
kWh	=	หน่วยวัดกำลังทางไฟฟ้าต่อชั่วโมง (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
L	=	ลิตร
LPG	=	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว
LT	=	Light-off Temperature
$\dot{m}_A$	=	ปริมาณการใช้ของอากาศ (kg/hr)
mg/m ³	=	หน่วยวัดปริมาณมลพิษอนุภาค
MJ/kg	=	หน่วยวัดพลังงาน (มิลลิจูลต่อกิโลกรัม)
mm.	=	มิลลิเมตร
MW	=	น้ำหนัของอะตอม
N	=	อะตอมของไนโตรเจน
NEDC	=	การทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle
NM	=	นิวตันเมตร
NO	=	ไนตริกออกไซด์ (ppm)
NO _x	=	ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)
NO ₂	=	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)
NO ₃	=	ไนเตรต

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

N_2O	=	ไนตรัสออกไซด์
O	=	อะตอมของออกซิเจน
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน (%)
O_3	=	ก๊าซโอโซน
P	=	ฟอสฟอรัส
PAH's	=	โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
Pd	=	สารพาราเดียม
PGM	=	Precious Group Metal
PM	=	มลพิษอนุภาค
Pt	=	สารแพลตินัม
ppm	=	อัตราหนึ่งในล้านส่วน
ppmC	=	อัตราหนึ่งในล้านส่วนของคาร์บอน 1 อะตอม
Rh	=	โรเดียม
rpm	=	รอบต่อนาที
S	=	ซัลเฟอร์
s	=	หน่วยวัดเวลา (วินาที)
SG	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ
SI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์
SO_3	=	ซัลเฟต
Soot	=	เขม่าดำ
SOF	=	Soluble Organic Fraction
t	=	Time; เวลา
Temp.	=	Temperature; อุณหภูมิ
THC	=	ผลรวมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ppmC)
TiO_2	=	ไทเทเนียมไดออกไซด์
TWC	=	เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
Zn	=	สังกะสี

อิทธิพลของตัวแปรต่อการลดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Impacts of Parameters on CO Reductions in a Diesel Oxidation Catalyst of Diesel Dual Fuel Engines Using Design of Experiments

คำนำ

ปัจจุบันทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง และราคาน้ำมันที่ปรับตัวขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามค้นหาพลังงานทางเลือกอื่นมาใช้ทดแทน ซึ่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ได้มีการคิดค้นการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า เครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วมขึ้น ทำให้สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลง แต่มลพิษที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในรอบการทำงาน of เครื่องยนต์ในช่วงภาระต่ำมีระดับสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลแบบทั่วไป ดังนั้นการควบคุมการปล่อยมลพิษให้อยู่ที่กฎหมายกำหนดนั้น เป็นที่สนใจของนักวิจัยที่ศึกษาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกลุ่มต่างๆ เป็นอย่างมาก

ในการศึกษานี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งออกแบบการทดลองของระบบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยตามสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อีกทั้งยังกำหนดและระบุค่าเหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับระบบได้ โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนี้ ในเบื้องต้นได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเพื่อหาค่าคิเนติกส์ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของโมเดล หลังจากนั้นจึงนำแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองไปศึกษาเพื่อดูแนวโน้มปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย จำนวนการทดลอง และระยะเวลาทดลองลงได้อย่างมาก

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงภาระต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ที่จะส่งผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา
2. สามารถหาสภาวะทำงานที่เหมาะสมในช่วงภาระต่ำของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม สำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50% และ 90% ตามลำดับ

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเฉพาะช่วงการขับขี่ในตัวเมือง
2. งานวิจัยนี้ไม่รวมผลกระทบของเขม่าไอเสียและปริมาณมีเทนในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมต่อการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

การตรวจเอกสาร

1. เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel dual fuel engine)

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เป็นเครื่องยนต์ที่สามารถใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับเชื้อเพลิงอื่นได้ เช่น ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed natural gas, CNG), ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG), เอทานอล เป็นต้น โดยมีการทำงานบนพื้นฐานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด หรือเครื่องยนต์ดีเซล โดยเชื้อเพลิงร่วม เช่น ก๊าซธรรมชาติ นั้นจะถูกผสมกับอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้แล้วจุดระเบิดด้วยการฉีดน้ำมันดีเซลในปริมาณที่น้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ส่วนผสมระหว่างก๊าซธรรมชาติกับอากาศนั้นสามารถทนต่อการจุดระเบิดด้วยตนเองจากการที่เครื่องยนต์มีกำลังอัดสูงได้ เนื่องจากมีค่าออกเทนสูงถึง 120 (Semin *et al.*, 2009) ก๊าซธรรมชาติจึงเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซล ลักษณะการเผาไหม้ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะแตกต่างจากเครื่องยนต์ดีเซลปกติ กล่าวคือ ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นการเผาไหม้จะเกิดขึ้นพร้อมๆกันในส่วนที่เชื้อเพลิงผสมกับอากาศ ในขณะที่เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เชื้อเพลิงดีเซลจะเป็นตัวเริ่มต้นการเผาไหม้แล้วประกายไฟจะลุกลามไปยังส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงร่วมกับอากาศ ซึ่งคล้ายกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

การติดตั้งระบบเชื้อเพลิงร่วมลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลเดิม เพียงแต่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมก๊าซธรรมชาติและเพิ่มตัวควบคุมเครื่องยนต์ (Engine control unit, ECU) อีกหนึ่งตัวเพื่อควบคุมการจ่ายก๊าซธรรมชาติและการฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้

2. มลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลในการแทนที่ปริมาณน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 70 - 80 หรือมากกว่า จะเป็นการประหยัดการใช้น้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ และเขม่าควันดำให้น้อยลงได้อีกด้วย แต่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยในส่วนนี้จะอธิบายการเกิดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมบางชนิดที่น่าสนใจ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจนออกไซด์ มีเทน และมลพิษอนุภาค

2.1 คาร์บอนมอนอกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส โมเลกุลของก๊าซประกอบด้วยคาร์บอนและออกซิเจนอย่างละหนึ่งอะตอมเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเกิดจากมีส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา (Fuel-rich mixture) เนื่องจากมีออกซิเจนไม่เพียงพอในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการเผาไหม้ และเกิดจากประสิทธิภาพการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต่ำ (Poor mixing) เนื่องจากไฮโดรคาร์บอนบางส่วนจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันไม่ถูกเผาไหม้ ดังสมการที่ 1



โดยที่ R แทน Radical ของไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามสมการที่ 2 นั้นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 K และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า ซึ่งในช่วงขยายตัวของกระบอกสูบจะทำให้อุณหภูมิในกระบอกสูบลดลง คาร์บอนมอนอกไซด์จึงไม่สามารถเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ (Heywood, 1988)



ร่างกายของมนุษย์สามารถผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาได้ในรูปของเหลือใช้จากกระบวนการย่อยสลายฮีโมโกลบิน (Hemoglobin degradation) ในรูปของคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (Carboxyhemoglobin, COHb) โดยพบสารนี้ในคนไม่สูบบุหรี่ประมาณ 1 – 3% และ 10 – 15% สำหรับคนที่สูบบุหรี่จัด โดยจะได้รับคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 400 – 500 ppm ในขณะที่กำลังสูบบุหรี่ (National Center for Health Statistics, 1988; Cobb and Etzl, 1991) นอกจากนี้เมื่อหายใจนำคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในร่างกาย คาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200 – 250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบินได้อีกด้วย ซึ่งสารนี้จะไปลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ สำหรับอาการตอบสนองของมนุษย์ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน และความไวรับของแต่ละบุคคลเป็นสำคัญ โดยสามารถแบ่งความเป็นพิษได้เป็น 3 ระดับ คือ เกือบพลัน ถึง เกือบพลัน และเรื้อรัง (Grace and Platt, 1981)

2.2 ไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน สามารถพบได้โดยธรรมชาติจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุไปเป็นน้ำมันดิบ นอกจากนั้นยังเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้และเกิดจากเชื้อเพลิงหรือน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยอยู่ในรูปไฮโดรคาร์บอนโดยรวม (Total hydrocarbons, THC) สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในนั้น ไฮโดรคาร์บอนสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น 1). ส่วนผสมเชื้อเพลิงบางเกินไป (Overleaning) เนื่องจากถูกเจือจางด้วยอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วการเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา ดังนั้นเมื่อเปลวไฟแพร่ขยายมาตรงบริเวณที่มีส่วนผสมเชื้อเพลิงบางเกินไปจึงไม่เกิดการเผาไหม้และเกิดไฮโดรคาร์บอนขึ้น 2). การเข้าไปแทรกตัวในช่องระหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบและผนังกระบอกสูบของเชื้อเพลิง เปลวไฟไม่สามารถแพร่ขยายเข้าไปเผาไหม้ได้จึงเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน 3). เชื้อเพลิงหลุดเข้าไปอยู่ในรูของหัวฉีด ไฮโดรคาร์บอนบางส่วนจึงไม่ถูกเผาไหม้ 4). การดับของเปลวไฟ (Flame quenching) ก่อนถึงผนังห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้จึงเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน (Heywood, 1988)

ไฮโดรคาร์บอนสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้มีอาการวิงเวียนศีรษะ เกิดอาการมินเมา หัวใจเต้นแรง และเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ไฮโดรคาร์บอนบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง หากได้รับต่อเนื่องในปริมาณมากและเป็นเวลานาน เช่น สารเบนโซไพรีน (Benzopyrene) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของไนโตรเจนในอากาศ เกิดเป็นก๊าซต่างๆ ทำให้เกิดหมอกควันเคมีแสง (Photochemical smog) ที่ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจและตาได้

2.3 ไนโตรเจนออกไซด์

ไนโตรเจนออกไซด์เป็นก๊าซซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ยกเว้นไนโตรเจนไดออกไซด์เมื่อรวมตัวกับอนุภาคอื่นๆในอากาศจะเห็นเป็นสีน้ำตาลแดง โดยเมื่อไนโตรเจนรวมตัวกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงสามารถเกิดเป็นออกไซด์ได้หลายชนิด เช่น ไนโตรเจนมอนอกไซด์ หรือไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เป็นต้น

ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศมากที่สุดในบรรดาออกไซด์ทั้งหมดของไนโตรเจนโดยกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม หรือเครื่องยนต์ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เนื่องจากการเผาไหม้แบบบาง (Lean burn) จึงมีปริมาณออกซิเจนมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน โดยในจังหวะอัดและระเบิดเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบสูงทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น และในจังหวะขยายอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ไนโตรเจนออกไซด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังสมการที่ 3, 4 และ 5 โดยมีอุณหภูมิและความดันเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800 K (Heywood, 1988)



ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับโอโซน (O_3) ในบรรยากาศเกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ ดังสมการที่ 6 และเมื่อไนโตรเจนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ของน้ำที่ความดันต่ำจะเกิดเป็นกรดไนตริก (HNO_3) ดังสมการที่ 7



นอกจากนี้เมื่อไนโตรเจนออกไซด์รวมตัวกับไฮโดรคาร์บอนและทำปฏิกิริยากับแสงแดด เกิดเป็นโอโซนระดับพื้นดิน (Ground-level ozone) หรือโอโซนที่ไม่ดี ดังสมการที่ 8 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของหมอกควันเคมีแสง (Photochemical smog) ที่เป็นอันตรายต่อคนชรา เด็กเล็ก ผู้ป่วยโรคหัวใจ โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหืด เป็นต้น



2.4 มีเทน

มีเทนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคน (Alkane) ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 4 อะตอม เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ น้ำหนักเบากว่าอากาศจึงลอยตัวได้ง่าย และเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ มีเทนสามารถแทนที่ออกซิเจน และทำให้เกิดการระเบิดที่ความเข้มข้น 50000 ppm หรือมากกว่า 5% ในบรรยากาศ แหล่งกำเนิดของมีเทนมีอยู่มากมายทั้งในธรรมชาติและที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น นาข้าว การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ การเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น นอกจากนี้มีเทนยังเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas, GHG) ที่ให้ผลรุนแรงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 20 เท่า

การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นจะนำก๊าซธรรมชาติซึ่งมีมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักผสมเข้าไปแบบ Premixed charge เมื่อมีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ จะสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 K ดังสมการที่ 9



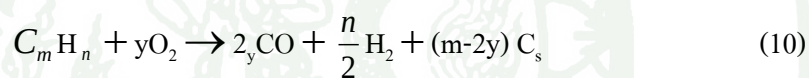
ทั้งนี้การดับของเปลวไฟ การหลุดไปอยู่ในปริมาตรช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเหนือแหวนอัด (Crevice volume) หรือการหลุดไปอยู่ในชั้นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่น (Lubrication oil film) ของก๊าซธรรมชาติ (Korakianitis *et al.*, 2011) ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ก๊าซธรรมชาติไม่ถูกเผาไหม้จึงทำให้เกิดมีเทนขึ้น

2.5 มลพิษอนุภาค

มลพิษอนุภาคเป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพและองค์ประกอบ อาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ มลพิษอนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดมากกว่าเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ (Tan *et al.*, 2004, 2007) มีองค์ประกอบหลักแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ด้วยสารละลายอินทรีย์ (Insoluble fraction, ISF) ซึ่งประกอบด้วยเขม่าควันดำ (Soot) ซัลเฟต (SO_4) และไนเตรต (NO_3) และส่วนที่สามารถละลายได้ด้วยสารละลายอินทรีย์ (Soluble organic fraction, SOF) ซึ่งประกอบด้วย เชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ (Unburned fuel)

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) และส่วนประกอบสังเคราะห์เชิงความร้อน (Thermally synthesized components) (Heywood, 1988; Tan *et al.*, 2004, 2007) มลพิษอนุภาคส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิง หรือน้ำมันหล่อลื่น โดยสามารถวัดปริมาณมลพิษอนุภาคได้เป็นหน่วยมวล (Mass basis) เช่น g/km สำหรับรถยนต์, g/kW-hr สำหรับเครื่องยนต์, g/kg-fuel และ mg/m³-exhaust เป็นต้น (Heywood, 1988) มลพิษอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะมีอันตรายต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ที่สุด กล่าวคือมลพิษอนุภาคสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ จึงอาจก่อให้เกิดความผิดปกติต่อระบบทางเดินหายใจและกระแสเลือด เนื่องจากมลพิษอนุภาคมีสารหลายชนิดที่เป็นสารก่อมะเร็ง (Health Effects Institute (HEI), 2002; World Health Organization (WHO), 2003)

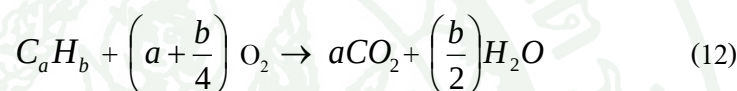
เขม่าควันดำซึ่งไม่สามารถละลายได้ด้วยสารละลายอินทรีย์นั้น จะเกิดจากการผสมหนาโดยมีอากาศเพียงพอที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมดที่ช่วงอุณหภูมิ 1000 – 2800 K และความดัน 50 – 100 atm ดังสมการที่ 10 (Heywood, 1988)



กระบวนการเกิดเขม่าควันดำนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะด้วยกันคือ 1). สภาวะการก่อตัวของอนุภาค (Particle formation) โดยเกิดการควบแน่นโมเลกุลของเชื้อเพลิงไปเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (Unsaturated hydrocarbons) เช่น อะเซทิลีน (C₂H₂) และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAH's) โดยกระบวนการออกซิเดชัน หรือไพโรไลซิส 2). สภาวะการขยายตัวของอนุภาค (Particle growth) ซึ่งประกอบด้วย Surface growth, Coagulation growth และ Aggregation growth โดยในช่วงของ Surface growth จะทำให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าควันดำ (Soot volume fraction) หรืออัตราส่วนของปริมาตรเขม่าควันดำต่อปริมาตรรวมเพิ่มขึ้น แต่จำนวนอนุภาคของเขม่าควันดำต่อหน่วยปริมาตรยังคงเท่าเดิม ซึ่งตรงข้ามกับช่วง Coagulation growth ที่อนุภาคชนและรวมตัวกันจึงทำให้จำนวนอนุภาคของเขม่าควันดำต่อหน่วยปริมาตรลดลงโดยสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าควันดำคงที่ และเมื่อกระบวนการดำเนินไปถึงช่วง Aggregation growth จะเกิดเป็นสายโซ่เขม่าควันดำ (Soot chains) และกลุ่มเขม่าควันดำ (Soot clusters) (Heywood, 1988)

3. เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม หรือ DDFCAT เป็นอุปกรณ์เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel oxidation catalyst, DOC) ชนิดหนึ่ง จัดเป็นเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแบบสองทาง (Two-way catalytic converter) กล่าวคือจะเกิดปฏิกิริยาเคมีในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 11 และ 12



เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนได้แก่

1). Catalyst core หรือ Substrate จะทำหน้าที่รองรับ Catalyst washcoat มีโครงสร้างคล้ายรังผึ้งทำมาจาก Ceramic monolith หรือ Metallic foil monolith และในปัจจุบันได้มีการใช้ Ceramic ที่ผสมกับ Cordierite $((\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18})$ เป็นวัสดุในการทำ Substrate เพื่อป้องกันการแตกหักเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีทันใด (Thermal shock cracking) (Gulati, 2006)

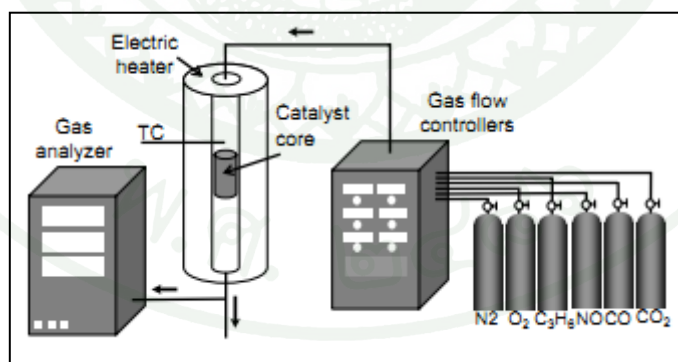
2). Washcoat จะทำหน้าที่รองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวบน Substrate ได้ดี Washcoat ส่วนใหญ่ทำมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์ หรืออะลูมินา (Al_2O_3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ Washcoat ที่ใช้รองรับพลาตินัมที่ใช้กันส่วนใหญ่นั้นคืออะลูมิเนียมออกไซด์ แต่อะลูมิเนียมออกไซด์นั้นจะไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง โดยจะเปลี่ยนจากอะลูมิเนียมออกไซด์ชนิดแอมมาไปเป็นชนิดแอลฟาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวไปและจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บน Washcoat นั้นหลุดออกไปด้วย (Yang *et al.*, 2000)

3). ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำมาจากโลหะมีค่า (Precious metal) เช่น พาลาเดียม (Pd) แพลทินัม (Pt) และ โรเดียม (Rh) เป็นต้น โดยโรเดียมจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชัน พาลาเดียมจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแพลทินัมจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน

4. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ามีหลากหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัยหลัก คือ 1). ปัจจัยภายใน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา, Catalyst additives, Space velocity, Washcoat เป็นต้น 2). ปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย, องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย เป็นต้น โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจ ดังนี้

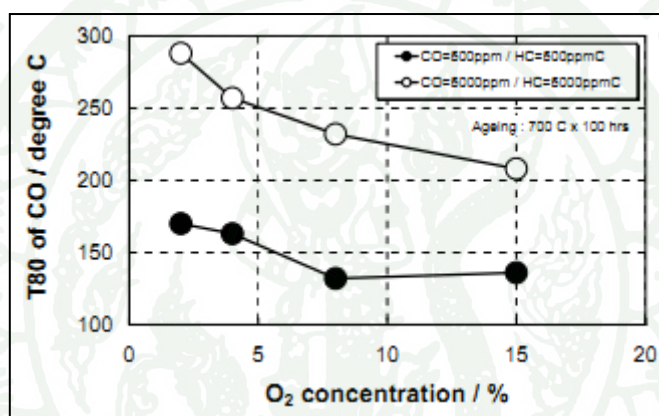
Sumiya et al. (2009) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์ขนาดเล็กขึ้น ประกอบด้วย 1). ถังก๊าซ 2). ระบบท่อ 3). เครื่องควบคุมอัตราการไหล 4). ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 5). เทอร์โมคัปเปิล 6). ตัว Catalyst 7). เครื่องวัดปริมาณก๊าซ โดยระบบสร้างก๊าซไอเสียสังเคราะห์นี้จะนำก๊าซต่างๆ ซึ่งถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหล ป้อนเข้าสู่ระบบท่อเพื่อสร้างเป็นก๊าซไอเสีย โดยก๊าซไอเสียสังเคราะห์ที่ได้ถูกควบคุมอุณหภูมิโดยฮีตเตอร์ไฟฟ้า แสดงตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพระบบก๊าซไอเสียสังเคราะห์

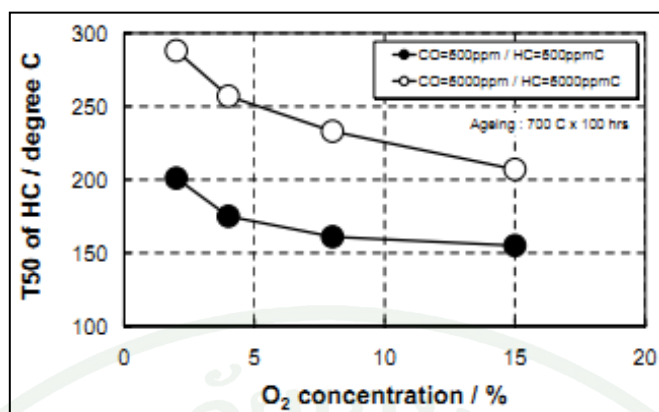
ที่มา: Sumiya et al. (2009)

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่มีสาร Pt และ Pd เป็นองค์ประกอบ โดยพบว่า ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อย ($\text{CO} = 500 \text{ ppm}$, $\text{HC} = 500 \text{ ppmC}$) ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้เร็ว (ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาค่ำ) เมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มาก ($\text{CO} = 5000 \text{ ppm}$, $\text{HC} = 5000 \text{ ppmC}$) ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่น้อยลง แสดงดังภาพที่ 2 และสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนนั้น จะมีพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ เพียงแต่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนกำจัดได้น้อยกว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 80%

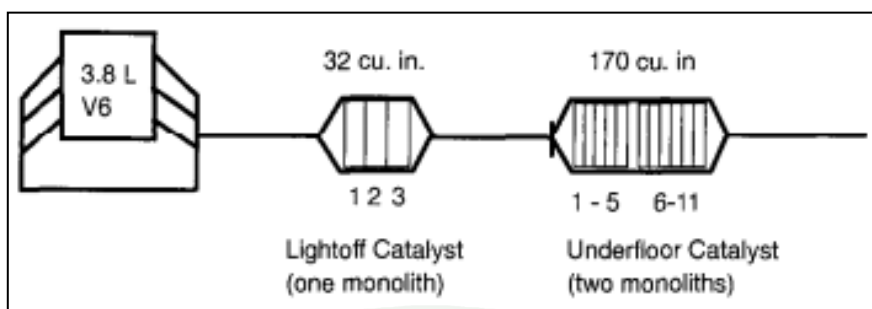
ที่มา: Sumiya *et al.* (2009)



ภาพที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ 50%

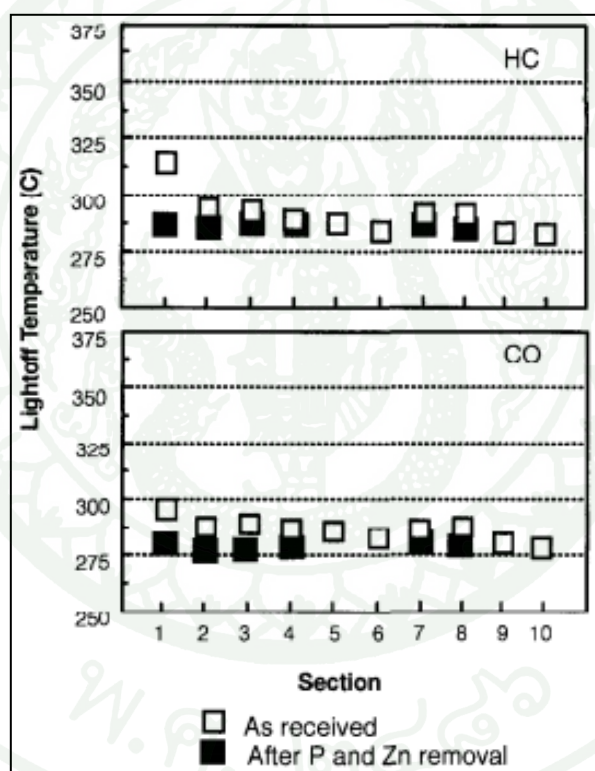
ที่มา: Sumiya *et al.* (2009)

Beck *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ 50% (Light-off Temperature) ทดสอบบนเครื่องยนต์ V6 ติดตั้งเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา 2 ลูก ดังแสดงภาพที่ 4 ระบบไอเสียนี้ลูกแรกเคลือบสาร Pd (75 g/ft^3) ออกแบบมาเพื่อใช้ในการยกอุณหภูมิให้สูงขึ้น ลูกที่สองเคลือบสาร Pt (18.3 g/ft^3) กับ Rh (1.3 g/ft^3) สำหรับการกำจัดปริมาณ HC และ CO ทำการทดสอบที่สภาวะส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงบาง โดยงานวิจัยนี้ได้ควบคุมปริมาณฟอสฟอรัส (P) สังกะสี (Zn) และแคลเซียม (Ca) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำมันเพื่อศึกษาความแตกต่างที่เกิดขึ้นด้วย จากภาพที่ 5 พบว่า อุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษไฮโดรคาร์บอนลงได้ 50% อยู่ที่ 295°C (กรณีมี P และ Zn) และ 280°C (กรณีไม่มี P และ Zn) สำหรับอุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ลงได้ 50% อยู่ที่ 290°C (กรณีมี P และ Zn) และ 275°C (กรณีไม่มี P และ Zn) จะเห็นว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณก๊าซพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4 แสดงระบบทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

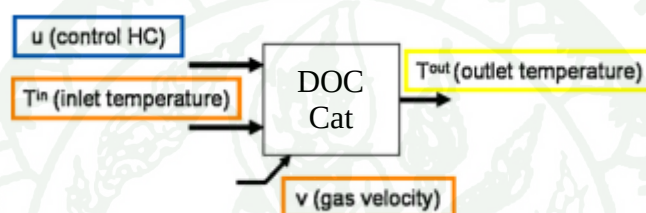
ที่มา: Beck *et al.* (1997)



ภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ 50% ทั้งที่มี P, Zn และไม่มี P, Zn

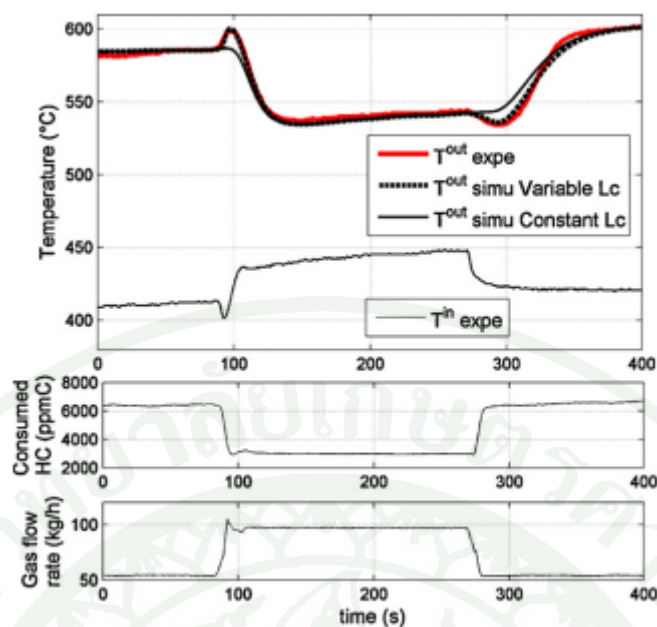
ที่มา: Beck *et al.* (1997)

Olivier et al. (2012) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก DOC โดยควบคุมปัจจัยที่สนใจสามตัวคือ ปริมาณไฮโดรคาร์บอน อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ และอัตราการไหล ดังแสดงภาพที่ 6 พบว่า ที่เวลา 0 - 90 s เมื่อควบคุมระบบให้มีอัตราการไหลต่ำ (50 kg/h) จะทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ทางออกของ DOC Cat สูงขึ้น (580°C) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของ DOC คี้อย่างขึ้น ทั้งที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ทางเข้ามีปริมาณมาก (6000 ppmC) แต่ในทางกลับกันที่เวลา 100 - 280 s หากเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้น (100 kg/h) อุณหภูมิไอเสียที่ทางออกของ DOC Cat ลดลง (540°C) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของ DOC ลดลง ทั้งที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ทางเข้ามีปริมาณน้อย (3000 ppmC) ดังแสดงภาพที่ 7



ภาพที่ 6 แสดงปัจจัยและตัวตอบสนองที่ทำการพิจารณาของ DOC

ที่มา: Olivier et al. (2012)



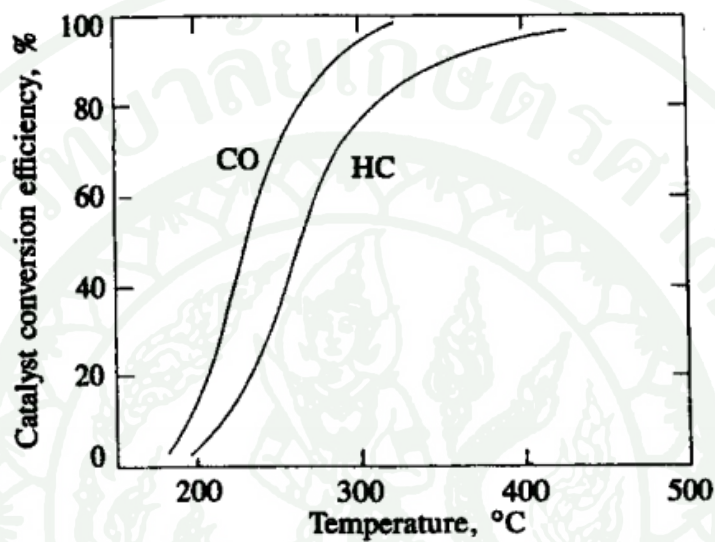
ภาพที่ 7 แสดงผลการทดลองและผลที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อทำการควบคุมอัตราการไหลและปริมาณไฮโดรคาร์บอนเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของอุณหภูมิไอเสียที่ทางออกของ DOC

ที่มา: Olivier *et al.* (2012)

สำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณมลพิษไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา คำนวณได้จาก ค่าอัตราส่วนของปริมาณมลพิษที่ออกโดยปริมาตรเทียบกับปริมาณมลพิษที่เข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยแสดงเป็นสมการที่ 13 ได้ดังนี้

$$\eta_{conv} = \frac{x_{in} - x_{out}}{x_{in}} \cdot 100 \quad (13)$$

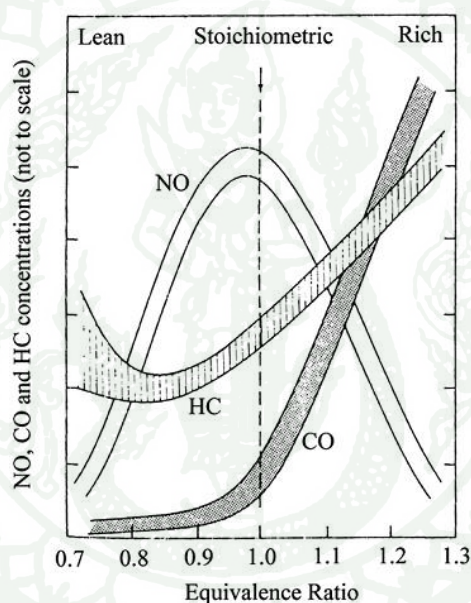
ซึ่งจากภาพที่ 8 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงมากพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณมลพิษไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้สูงถึง 98% สำหรับการลด CO (อุณหภูมิ 300°C โดยประมาณ) และ 95% สำหรับการลด HC (อุณหภูมิ 400°C โดยประมาณ) แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีประสิทธิภาพหากอุณหภูมิสูงไม่ถึง 250°C (อุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษไอเสียลงได้ 50%)



ภาพที่ 8 แสดงประสิทธิภาพการลดปริมาณมลพิษไอเสียของ CO และ HC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Heywood *et al.* (1988)

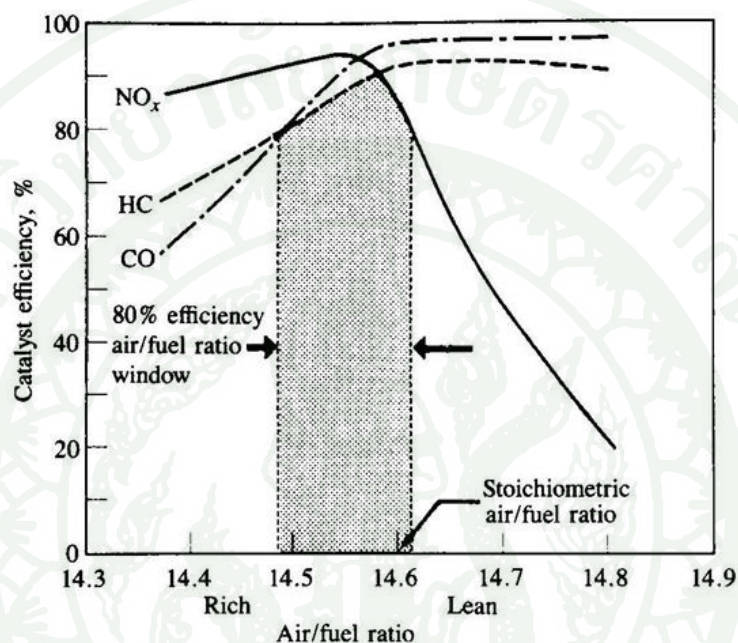
ในเครื่องยนต์แบบ SI มลพิษที่ออกมาได้แก่ CO หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, NO_x หรือออกไซด์ของไนโตรเจน และ HC (Unburned Hydrocarbon) หรือไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด โดยจากภาพที่ 9 แสดงถึงปริมาณการเกิด CO, HC และ NO_x ในเครื่องยนต์แบบ SI เปรียบเทียบกับค่า equivalence ratio จะเห็นได้ว่าค่า NO_x จะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อค่า equivalence ratio ใกล้กับ 1 หรือที่เรียกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงพอดี (stoichiometric) ส่วนบริเวณที่ส่วนผสมหนาหรือ rich condition จะเห็นได้ว่า CO และ HC จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Heywood *et al.*, 1988) โดยการที่ปริมาณ CO และ HC มีค่ามาก บริเวณส่วนผสมหนานั้น เนื่องมาจากกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั่นเอง ซึ่งอีกนัยหนึ่งกล่าวคือ ในบริเวณส่วนผสมหนา อากาศที่ผสมเข้าไปมีปริมาณน้อย (ปริมาณออกซิเจนน้อย) จะทำให้ปริมาณการเกิด CO และ HC มีค่ามาก



ภาพที่ 9 แสดงปริมาณการเกิด CO, HC และ NO_x ในเครื่องยนต์แบบ SI เทียบกับ equivalence ratio

ที่มา: Heywood *et al.* (1988)

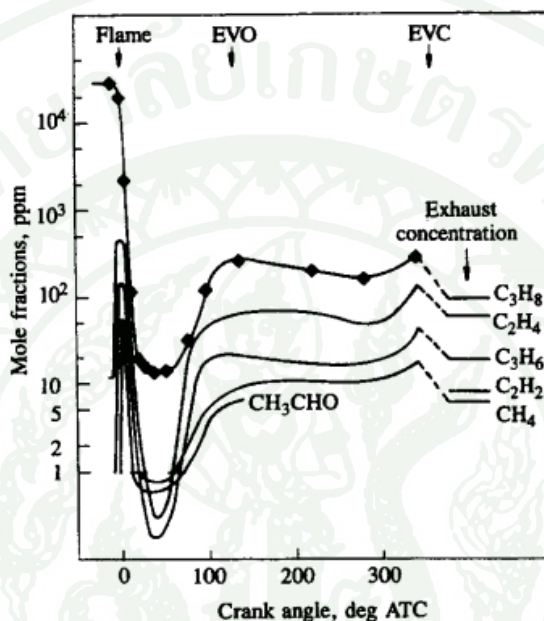
สำหรับการลดปริมาณมลพิษไอเสียในเครื่องยนต์ SI นั้น การที่จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ Three Way Catalytic Converter มีประสิทธิภาพมากที่สุด หรือสามารถกำจัดมลพิษไอเสียอย่าง CO, HC และ NO_x ได้มากกว่า 70% นั้น ควรมีสภาวะการทำงานเป็นแบบส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงพอดี (stoichiometric) แสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งหากสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เป็นแบบส่วนผสมหนาหรือบาง จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ TWC ลดลง



ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษไอเสียกับ air/fuel ratio ใน Three Way Catalytic

ที่มา: Heywood *et al.* (1988)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ซึ่งมีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำการพิจารณาชนิดของไฮโดรคาร์บอนหลักจากกระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แล้ว พบว่า ในช่วงตั้งแต่วาล์วไอดีเปิดจนกระทั่งวาล์วไอดีปิดนั้น โพรเพน (C_3H_8) จะมีปริมาณไอดีที่ออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ แสดงภาพที่ 11 จึงเป็นเหตุทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพรเพน (C_3H_8) เป็นตัวแทนของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด



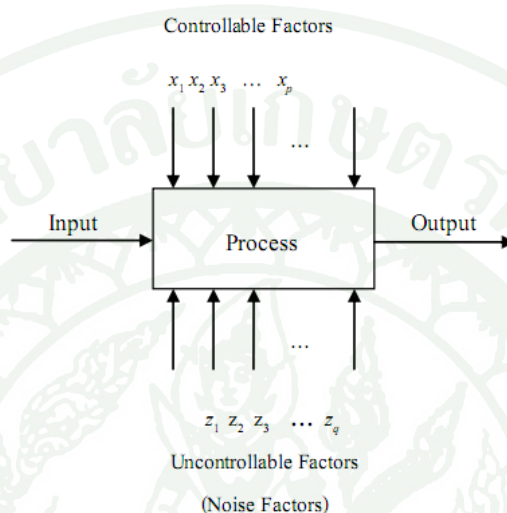
ภาพที่ 11 แสดงองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI ที่ความเร็วรอบ 1250 rev/min

ที่มา: Heywood *et al.* (1988)

5. การออกแบบการทดลอง

ระบบการออกแบบการทดลองทั่วไปจะประกอบด้วย การใส่ทรัพยากร (Input) ที่จำเป็นในการทดลองลงไปในกระบวนการทดลองนั้นๆ และจะได้ผลผลิต (Output) ออกมาดังแสดงในภาพที่ 12 ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองได้แก่ วัตถุดิบ เครื่องจักร คน เป็นต้น ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตที่ได้ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมให้ได้ในระดับที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตหรือการบริการหนึ่งๆ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) เป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อผลผลิต ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพและ

ผลผลิตของผลิตภัณฑ์และบริการ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือยากต่อการควบคุม (Uncontrollable Factor) ยังมีผลรบกวนต่อระบบการทดลองซึ่งเป็นผลให้ได้ผลผลิตออกมา มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น การออกแบบการทดลองที่ดีต้องสามารถกำจัดหรือลดอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Montgomery, 2009)



ภาพที่ 12 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป

ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

5.1 คำศัพท์พื้นฐานที่ควรทราบในการออกแบบการทดลอง

5.1.1 ตัวแปรตอบสนอง (Responses) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) ที่ต้องการควบคุมให้เป็นตามมาตรฐานที่ต้องการ

5.1.2 ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังที่กล่าวมาแล้วคือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

5.1.3 ระดับปัจจัย (Levels of Factor) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 100°C , 300°C และ 500°C นั่นคือ ปัจจัยอุณหภูมิทำการศึกษามี 3 ระดับ

5.1.4 จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs or Experimental Runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง มีค่าเท่ากับผลคูณของ จำนวนวิธีปฏิบัติ กับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ (Replicates)

5.1.5 วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นๆ เช่น ถ้าในการทดลองทำการศึกษา ปัจจัย A และปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับ จะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกันเท่ากับ $2 \times 3 = 6$ วิธี

5.1.6 ผลกระทบหลัก (Main Effect) คือ ผลกระทบของปัจจัยเดี่ยวที่ส่งผลต่อระบบหรือกระบวนการในการทดลอง

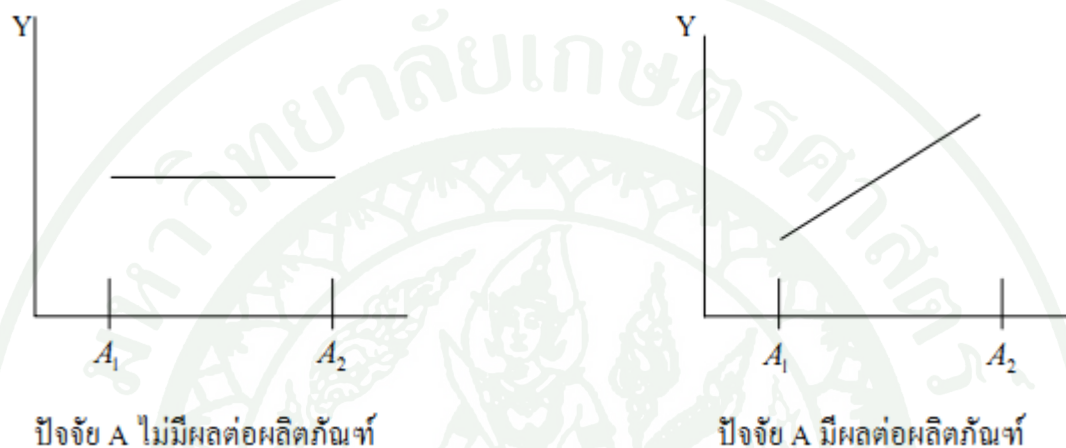
5.1.7 ผลกระทบร่วม (Interaction Factors) คือ ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา) ที่ส่งผลต่อระบบหรือกระบวนการในการทดลอง

5.2 ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

5.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึงปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

5.2.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย, ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก, มีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ Y หมายถึงค่าความเข้มของสี และ A หมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการบดสี ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟตัวอย่าง แสดงภาพที่ 13 ดังนี้



ภาพที่ 13 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

5.3 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

5.3.1 การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือ ทำให้ผู้ทดลอง สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้วการทำการทดลองซ้ำ จะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

5.3.2 การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีลำดับของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายอย่างอิสระ การที่เราได้ทำการทดลองแบบสุ่ม จะทำให้เราลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

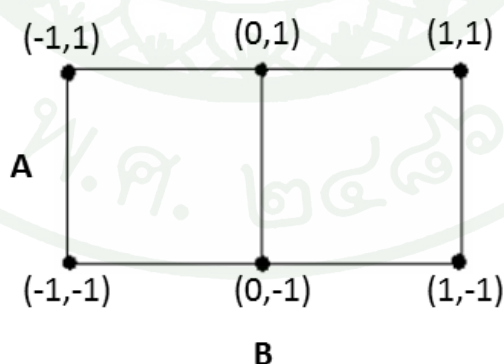
5.3.3 การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่ง อาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุ ที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

5.4 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

5.4.1 การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง โดยควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ ซึ่งวิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียล ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น การทดลองเต็มรูป และการทดลองบางส่วน อีกด้วย

ในภาพที่ 14 และ 15 แสดงตัวอย่างของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยแต่ละจุดที่อยู่ตรงมุมของกล่องแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (combination) แต่ละอันของการทดลอง (Montgomery, 2009) ซึ่งสามารถเขียนเป็นตารางของการทดลองได้ดังแสดงตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

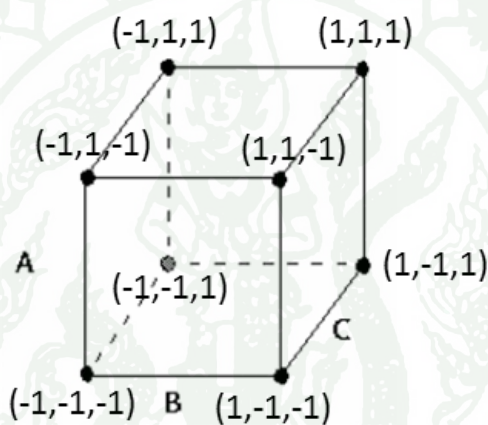


ภาพที่ 14 การทดลองแบบสองปัจจัย

ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนการทดลองแบบสองปัจจัย

จำนวนการทดลอง	ปัจจัย A	ปัจจัย B
1	-1	1
2	0	1
3	1	1
4	-1	-1
5	0	-1
6	1	-1



ภาพที่ 15 การทดลองแบบสามปัจจัย

ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนการทดลองแบบสามปัจจัย

จำนวนการทดลอง	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	-1	1
4	1	-1	1
5	-1	1	-1
6	1	1	-1
7	-1	1	1
8	1	1	1

ก. การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment)

เป็นวิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลอง สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้

ข้อดีคือ ศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลัก (Main Factors) และปัจจัยร่วม/อันตรกิริยา (Interaction Factors) ได้ทั้งหมด

ข้อเสีย คือค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองที่ใช้แปรผันตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัยที่ศึกษา

ข. การทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorials)

เป็นวิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากผู้ทดลองมีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองจำกัด

ข้อดีคือ ช่วยลดเวลา และค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง เนื่องจากการทดลองที่ลดรูปลงจากการทดลองเต็มรูป

ข้อเสียคือ การตีความผลจะซับซ้อนขึ้น

5.4.2 การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

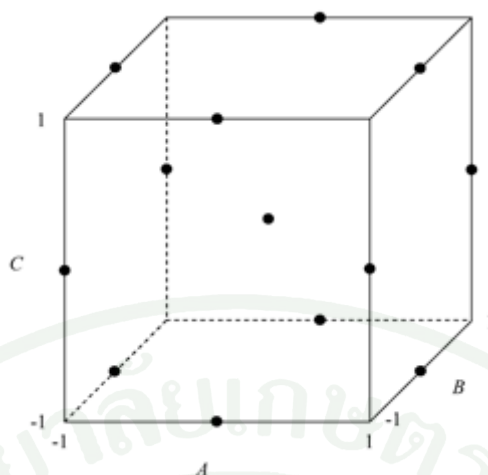
เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Mathematical Model) และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ สำหรับการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองนั้น แบบการทดลองที่นิยมใช้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การทดลอง Box – Behnken และการออกแบบส่วนประสมกลาง (Montgomery, 2009)

ก. การทดลองแบบ Box – Behnken

เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-Level Design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแทนเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยที่เชิงปริมาณ (Quantitative Factors) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น ฯลฯ ลักษณะของการออกแบบวิธี Box – Behnken จะใช้หลักการของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบบวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Points) รวมเข้าไป Box – Behnken Designs ดังแสดงในภาพที่ 16

ข้อดีคือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2 – Factor Inter – Actions)

ข้อเสียคือ จำนวนครั้งที่ทดลอง (Number of Runs) มีค่ามากและไม่สามารถที่จะลดได้



ภาพที่ 16 การทดลอง Box-Behnken แบบสามปัจจัย

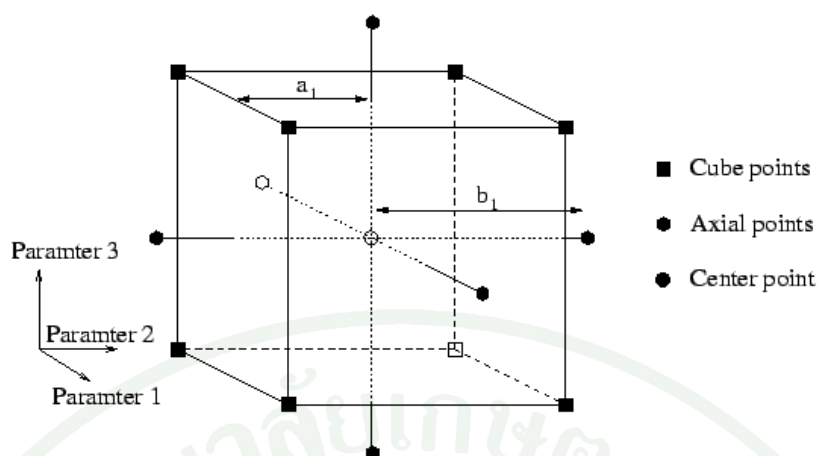
ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

ข. การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

การออกแบบส่วนประสมกลาง ประกอบด้วยวิธี 2^k แฟกทอเรียล, การทดลอง 2^k ในแนวแกน และการทดลองที่จุดศูนย์กลางดังภาพที่ 17 ทั้งนี้เพื่อนำมาใช้ในการประมาณสัมประสิทธิ์ของรูปแบบสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model)

ข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นในการใช้สูง อีกทั้งยังเหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการลำดับที่สอง

ข้อเสียคือ เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factors) จะต้องทำการปรับเปลี่ยนแผนการทดลอง โดยเฉพาะกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพมากกว่า 1 ปัจจัย จำเป็นที่จะต้องใช้การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน หรือการออกแบบแบบ D – Optimal



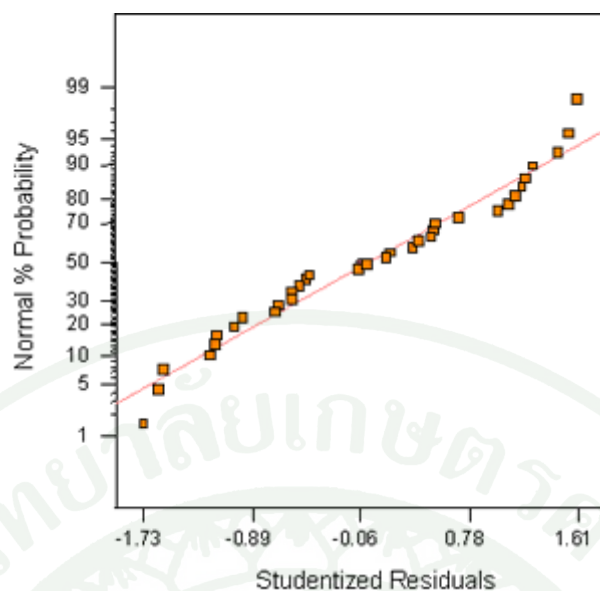
ภาพที่ 17 การออกแบบส่วนประสมกลาง 3 ปัจจัย

ที่มา: Montgomery *et al.* (2009)

5.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

5.5.1 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน

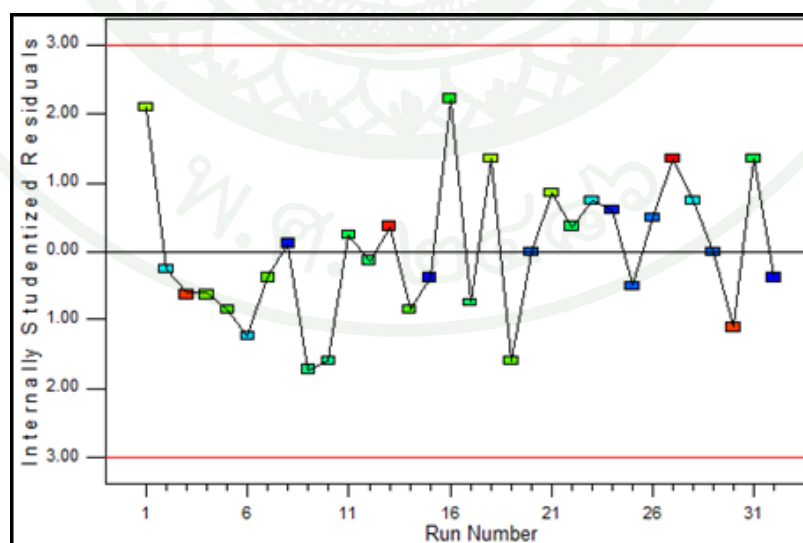
เป็นการตรวจสอบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ถ้ากราฟที่ได้ค่อนข้างเป็นเส้นตรง แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างกราฟ Normal Probability Plot

5.5.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน

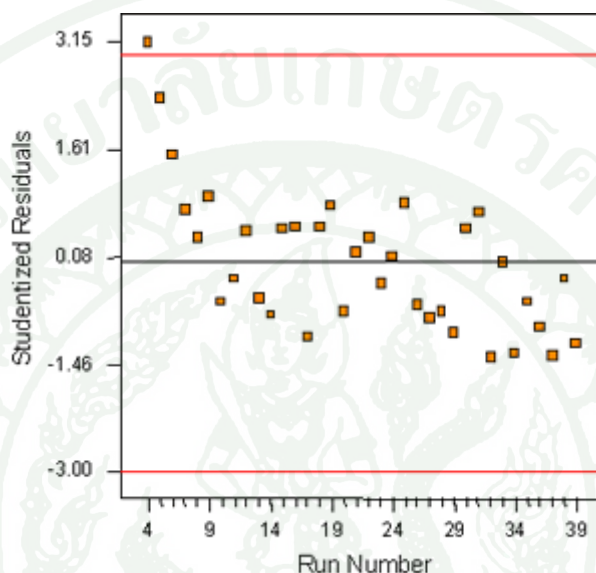
เป็นการตรวจสอบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระหรือไม่ โดยพิจารณาจากรูปแบบการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่ดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่มหรือมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างกราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระ

5.5.3 การตรวจสอบความเสถียร (Variance Stability)

เป็นการตรวจสอบโดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าประมาณค่าตอบสนอง คือ ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่ควรมีแนวโน้มของรูปทรงลักษณะลำโพงหรือกรวยปลายเปิด แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงตัวอย่างกราฟการตรวจสอบความเสถียร

5.6 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวหนึ่ง เรียกว่าตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (Dependent or Response Variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y และตัวแปรอื่นหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว เรียกว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรพยากรณ์ (Independent or Predictor Variable) นิยมเขียนแทนด้วย X มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรสุ่ม จากตัวแปรอิสระที่ทราบค่าหรือค่าคงที่ (Known or Fixed Values) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอยมีดังนี้

5.6.1 สร้างแบบจำลองการถดถอย

ในกรณีที่ต้องการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียงสองตัว จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) แต่เมื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่สามตัวขึ้นไป จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชุดเท่านั้น โดยตัวแปรชุดหนึ่งเป็นปัจจัยตาม และอีกชุดหนึ่งเป็นปัจจัยอิสระ หรือกล่าวง่ายๆ ได้อีกอย่างหนึ่ง คือการถดถอยเชิงเดียวเท่านั้น เป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่พิจารณาให้มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเท่านั้น โดยเขียนเป็นรูปแบบฟังก์ชันได้ว่า $Y = f(X)$ และมีรูปแบบสมการที่ 14 ดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

โดยที่	Y_i	แทน	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรตาม
	X_i	แทน	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรอิสระ
	β_j	แทน	สัมประสิทธิ์การถดถอยลำดับที่ j
	ε_i	แทน	ค่าที่ i ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม
	i	=	1, 2, ..., n
	j	=	0, 1
	n	=	จำนวนข้อมูล

ข. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ชุดขึ้นไป โดยตัวแปรชุดหนึ่งเป็นปัจจัยตาม ส่วนตัวแปรอื่นๆเป็นปัจจัยอิสระ หรือกล่าวง่ายๆ ได้อีกอย่างหนึ่ง คือ การถดถอยเชิงซ้อนนั้น เป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่พิจารณาให้มีตัวแปร

อิสระได้ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยสามารถเขียนรูปแบบฟังก์ชันทั่วๆไปของการถดถอยเชิงเส้น กรณีมีตัวแปรอิสระ k ตัวได้ คือ $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ และมีรูปแบบสมการที่ 15 ดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad (15)$$

โดยที่	Y_i	แทน	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรตาม
	X_{ij}	แทน	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรอิสระ
	β_j	แทน	สัมประสิทธิ์การถดถอยลำดับที่ j
	ε_i	แทน	ค่าที่ i ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม
	i	=	1, 2, ..., n
	j	=	0, 1, 2, ..., k โดยที่ $x_{0i} = 1$
	n	=	จำนวนข้อมูล

5.6.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Estimate Parameters)

จากข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์การถดถอย สามารถกำหนดรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย และการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยใช้รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression Equation) และสมการถดถอยเชิงเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Linear Regression Equation) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_j โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ได้ค่าประมาณเป็นค่า b_j ซึ่งจะมีค่าความแปรปรวนต่ำที่สุด รูปแบบที่ได้เป็นสมการที่ 16 ดังนี้

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_{1i} + \dots + b_k X_{ki} \quad (16)$$

โดยที่	$\hat{Y}_i$	แทน	ค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของ $\hat{Y}_i$ [$E(Y_i)$]
	X_{ij}	แทน	ค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรอิสระที่ j
	b_j	แทน	ค่าประมาณของ β_j
	i	=	1, 2, ..., n
	j	=	0, 1, 2, ..., k

5.6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

เมื่อมีตัวแปรอิสระหลายตัวในการวิเคราะห์การถดถอย สามารถทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ของการถดถอยพหุคูณ หรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ (Y) และเซตของตัวแปรอิสระ ($x_1, x_2, \dots, x_k$) ซึ่งการทดสอบจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 3 เป็นการแบ่งความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตามออกตามสาเหตุของความผันแปร คือ ความผันแปรของ Y เนื่องมาจากความไม่แน่นอนของข้อมูลรอบเส้นถดถอย โดยตั้งสมมติฐานที่ 17 และ 18 ว่า

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (17)$$

$$H_1 : \text{มีอย่างน้อยหนึ่ง } \beta_j \neq 0 \text{ โดยที่ } j = 1, 2, \dots, k \quad (18)$$

สถิติสำหรับทดสอบคือ $F = MSR/MSE$ จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha, k, n-k-1}$ โดย k คือ จำนวนพารามิเตอร์ ถ้ายอมรับ H_0 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม แต่ถ้าปฏิเสธ H_0 หมายความว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ X_j อย่างน้อยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้ มีประโยชน์ต่อการพยากรณ์หรืออธิบายตัวแปรตาม

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยพหุคูณ

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F
Regression	SSR	k	$MSR = SSR/k$	$F = MSR/MSE$
Error	SSE	n-k-1	$MSE = SSE/(n-k-1)$	
Total	SST	n-1		

ที่มา : วิรัช (2546)

5.6.4 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ในสัดส่วนเท่าใด (% ของ R^2) คำนวณได้จากสมการที่ 19 ซึ่งผลบวกกำลังสอง (SS) เป็นตัวแสดงความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยตัวนั้นๆ ว่า ค่าปัจจัยตัวใดมีความสำคัญต่อค่าตอบสนอง โดยค่า SS มาก แสดงว่า ปัจจัยตัวนั้นมีความสำคัญต่อค่าตอบสนองมาก

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (19)$$

กำหนดให้ SST = ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SSR = ผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย

SSE = ผลบวกกำลังสองซึ่งมาจากความคลาดเคลื่อน

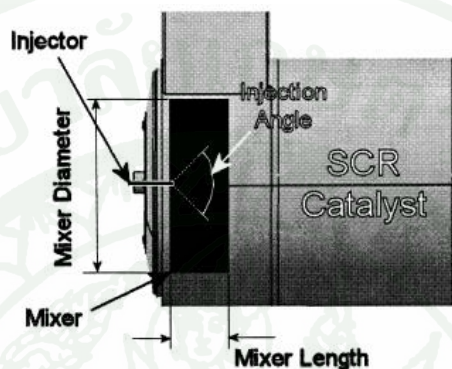
การเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เดิมเข้าป้อนนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ เพื่อขจัดปัญหานี้จึงมีการปรับค่า R^2 เรียกว่า R^2 ที่ปรับแล้ว (Adjusted R^2) คำนวณได้จากสมการที่ 20

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST} = 1 - \left[\frac{SSE/(n-k-1)}{SST(n-1)} \right] \quad (20)$$

6. การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

Arrowsmith *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาระบบ SCR+CR-DPF ที่ใช้บนรถโดยสารประจำทาง ซึ่งสามารถรองรับการควบคุมมลพิษระดับมาตรฐานยูโร 4 ได้ โดยระบบนี้เป็นการใช้อากาศร่วมกับการฉีดยูเรีย แต่เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งมีจำกัด ผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อปรับปรุงขนาดของหัวฉีดยูเรียสำหรับฉีดเข้าไปในเครื่องฟอกไอเสียเพื่อลดปริมาณ NO_x , PM, HC และ CO ที่เกิดขึ้น โดยเสียงที่เกิดจากการฉีดยูเรียกระทบท่อไอเสียนั้น ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังภาพที่ 21 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกเป็นการใช้วิธีของ Factorial design ในการคัดกรองเงื่อนไขการทดลองให้เหมาะสม พร้อมทั้งหา

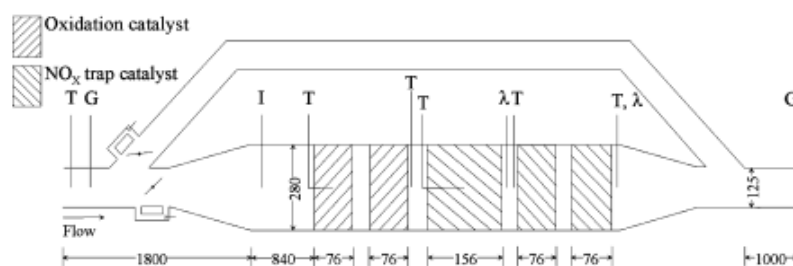
ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนครั้งที่สองนั้นใช้วิธี Central Composite Design (CCD) สำหรับหาขนาดของหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุดให้กับระบบ ซึ่งหลังจากวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่า Mixer length ที่สั้นและ Mixer diameter ที่ใหญ่ จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการลดปริมาณ NO_x ได้มากที่สุด โดยที่เสียงที่เกิดขึ้นจากการกระทบท่อไอเสียยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 21 การออกแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องฟอกไอเสีย

ที่มา: Arrowsmith *et al.* (2006)

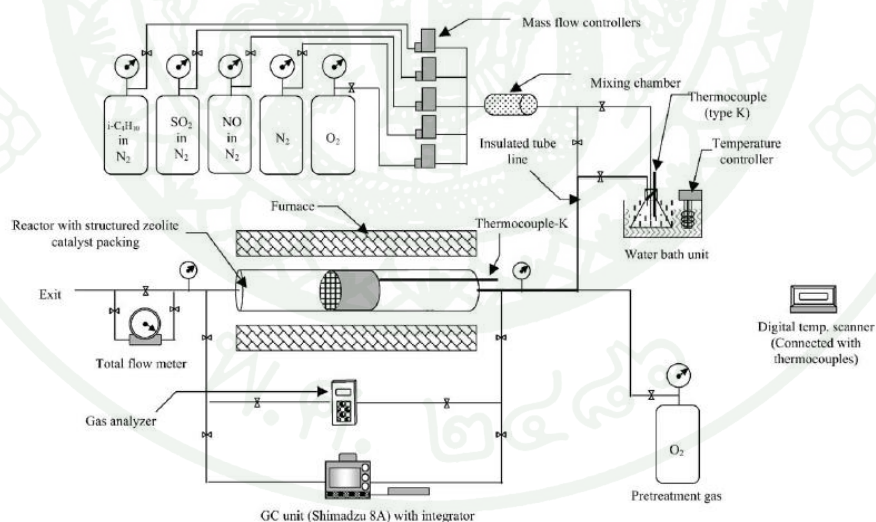
Jonas *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการควบคุมปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ให้อยู่ภายใต้กฎหมายที่กำหนดนั้น จำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบบำบัดไอเสียให้เหมาะสมสำหรับการทำงานในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพการดักจับไนโตรเจนออกไซด์ โดยทำการติดตั้งหัวฉีดและท่อแยกที่บริเวณทางเข้าเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาดังแสดงภาพที่ 22 โดยงานวิจัยนี้ ได้นำทฤษฎีการออกแบบการทดลองมาช่วยในการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ได้พบว่า สภาวะเหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการที่ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับไนโตรเจนออกไซด์ได้สูงโดยใช้ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่ต่ำคือ เมื่อไอเสียที่ทางเข้าที่อุณหภูมิต่ำให้ทำ bypass และ cycle times ยาวนานขึ้น แต่เมื่อไอเสียที่ทางเข้ามีอุณหภูมิสูงให้ทำ cycle times และ injections สั้นลง



ภาพที่ 22 ระบบทดสอบของเครื่องฟอกไอเสีย

ที่มา: Jonas *et al.* (2005)

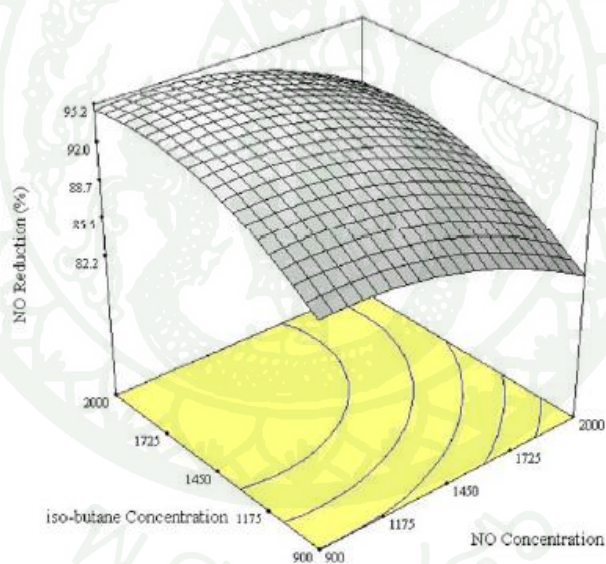
Deeng *et al.* (2004) ได้ทำการทดสอบ SCR Catalyst ที่มีสาร Cu-ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ทำการทดลองดังภาพที่ 23 โดยขึ้นแรกควบคุมให้ออกซิเจนไหลผ่านในระบบ 100 ml/min จนเตาเผามีความร้อนถึง 450°C รวมระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้กำจัดปริมาณออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ภายในท่อโดยการให้ไนโตรเจนไหลผ่านเข้าไป 30 นาที จึงเริ่มทำการทดลอง



ภาพที่ 23 แผนภาพการทดลอง SCR Catalyst

ที่มา: Deeng *et al.* (2004)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ด้วยโปรแกรม Design Expert ในการหาตัวปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งหาสถานะเงื่อนไขเหมาะสมที่สุดให้กับระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามหลักสถิติพบว่า การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียซึ่งใช้ Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดไนตริกออกไซด์ อุณหภูมิไอเสียควรรอยู่ที่ 375°C ปริมาณไนตริกออกไซด์ที่ออกจากเครื่องยนต์ 1730 ppm และปริมาณไอโซบิวเทน 1280 ppm จึงสามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพการลดปริมาณไนตริกออกไซด์ได้มากที่สุดที่ 94% ดังแสดงไว้ในภาพที่ 24 โดยความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์ที่ได้นั้นอยู่ในรูปของกำลังสอง คือ $\% \text{NO Reduction} = 93.15 - 2.9C_{\text{NO}} + 3.32C_{\text{HC}} + 22.95\text{Temp} - 2C_{\text{NO}}^2 - 2.42C_{\text{HC}}^2 - 14.87\text{Temp}^2 + 0.3C_{\text{NO}}C_{\text{HC}} + 0.55C_{\text{NO}}\text{Temp} + 0.87C_{\text{HC}}\text{Temp}$ นอกจากนี้ยังทราบว่า ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในระบบเพียง 5% สามารถทำให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณไนตริกออกไซด์ลดลงได้ถึง 50% อีกทั้งหากมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำมันอยู่ในระบบเพียง 50 ppm จะทำให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณไนตริกออกไซด์ลดลงอยู่ที่ 30%



ภาพที่ 24 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

ที่มา: Deeng *et al.* (2004)

จากการตรวจเอกสารและงานวิจัยต่างๆ พบว่า มลพิษไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะคาร์บอนมอนอกไซด์ในรอบการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมในช่วงภาระต่ำ มีหลายปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการลดมลพิษไอเสียในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งหากนำการออกแบบการทดลองทางสถิติมาช่วยในการศึกษา สามารถช่วยระยะเวลา ต้นทุน และขั้นตอนต่างๆลงได้มาก นอกจากนี้งานวิจัยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ยังมีน้อย จึงเป็นเหตุทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษา

สำหรับตัวแปรที่สนใจศึกษาได้แก่ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ (Exhaust Temperature) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกซิเจน (O₂) และโพรเพน (C₃H₈) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ (D.D. Beck et al., 1997) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ 50% (Light-off Temperature) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณก๊าซพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ

2. อัตราการไหลของไอเสีย เป็นปัจจัยที่แสดงถึงเวลาที่ DOC มีในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ CO และ HC ในไอเสีย ซึ่งอัตราการไหลของไอเสียผ่าน DOC มักบอกในรูปของความเร็วการไหล (Space Velocity, SV) หากไอเสียมีความเร็วในการไหลที่สูงเกินไปทำให้ DOC มีเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลด CO และ HC ลดลงได้ (Stein et al., 1996)

3. ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย สำหรับการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันใน DOC เพื่อลดปริมาณ CO และ HC ในไอนั้น จำเป็นต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลด CO และ HC ของ DOC ให้ดีขึ้น (Sumiya et al., 2009) พบว่า การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในไอเสียทำให้ Light-off Temperature ในการลด CO และ HC ลดต่ำลงได้

4. ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์และปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย (Sumiya et al., 2009) พบว่า เมื่อไอเสียมีปริมาณของ CO และ HC สูงขึ้นทำให้ Light-off Temperature ของการลด CO และ HC มีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการกำจัดปริมาณไอเสียที่มากขึ้น

สาเหตุที่เลือกใช้ C_3H_8 แทนที่จะเลือก CH_4 ทั้งๆที่มีเทนเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ใน THC ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วม เนื่องจากอุณหภูมิ light-off temperature ของมีเทน มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ light-off temperature ของคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองหาอิทธิพลของ CO Conversion นั้น ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นมีเทนจึงไม่ส่งผลต่องานวิจัยที่สนใจทำการศึกษา

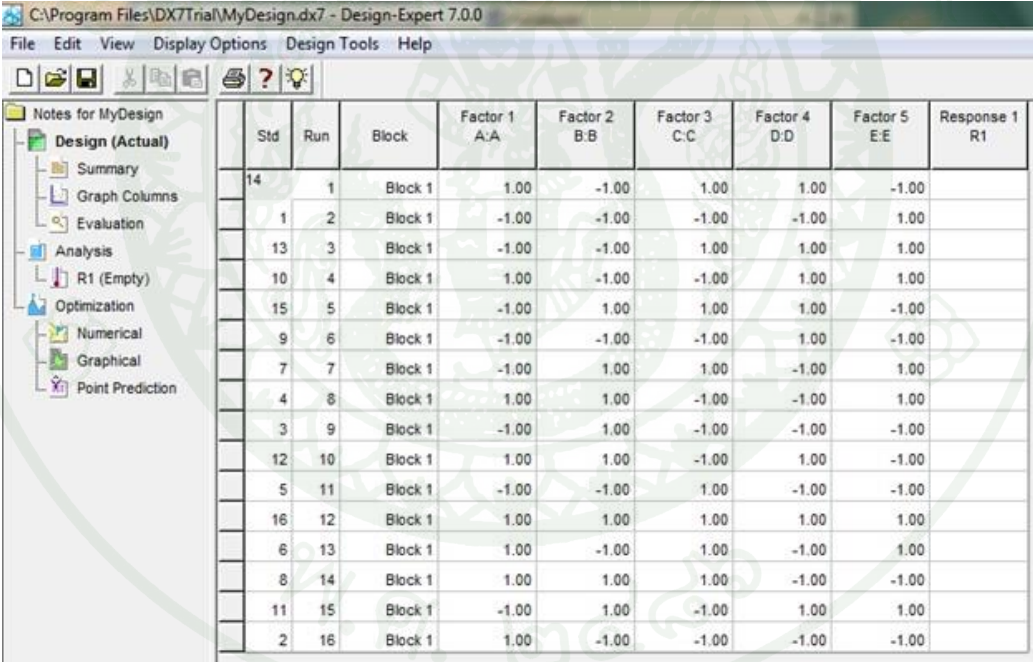
โดยตัวแปรที่สนใจศึกษานี้จะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งสามารถหาสภาวะทำงานเหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของการวิจัยในบทถัดไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert

เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ ที่มีความโดดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่ายและมีการพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันต่างๆ ให้สอดคล้องกับความรู้และทฤษฎีใหม่ๆ รวมถึงการประยุกต์ทางด้านสถิติโดยเฉพาะในงานด้านคุณภาพอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิชาการ นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และผู้ใช้สถิติทั่วไป ซึ่งแสดงตัวอย่างโปรแกรมดังภาพที่ 25



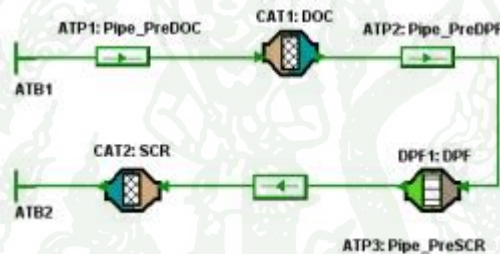
The screenshot shows the Design-Expert 7.0.0 software interface. The main window displays a table of 16 experimental runs. The table has columns for Std, Run, Block, and five factors (A:A, B:B, C:C, D:D, E:E), followed by a column for Response 1 (R1). The runs are arranged in a randomized order. The left sidebar shows a tree view of the project structure, including Design (Actual), Summary, Graph Columns, Evaluation, Analysis, R1 (Empty), Optimization, Numerical, Graphical, and Point Prediction.

Std	Run	Block	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Factor 3 C:C	Factor 4 D:D	Factor 5 E:E	Response 1 R1
14	1	Block 1	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	
	2	Block 1	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	
13	3	Block 1	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	
10	4	Block 1	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	
15	5	Block 1	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	
9	6	Block 1	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	
7	7	Block 1	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	
4	8	Block 1	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	
3	9	Block 1	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	
12	10	Block 1	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	
5	11	Block 1	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	
16	12	Block 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
6	13	Block 1	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	
8	14	Block 1	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	
11	15	Block 1	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	
2	16	Block 1	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	

ภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

2. โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรม AVL-BOOST Version 2011

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์รวมไปถึงอุปกรณ์ลดไอเสียแบบต่างๆ แบบ 1 มิติ โดยมีรูปแบบและลักษณะการทำงานด้วยการนำแบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆ มาเชื่อมต่อกัน แสดงตัวอย่างการจำลองอุปกรณ์การลดไอเสียดังภาพที่ 26 คำนวณเป็นวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (cycle) หรือช่วงเวลา (time) ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ในระบบ เช่น ทิศทางของของไหล ความดัน อุณหภูมิ ปริมาณมลพิษชนิดต่างๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เนื่องจาก AVL-BOOST เป็นโปรแกรมจำลองเครื่องยนต์แบบ 1 มิติ ซึ่งการคำนวณคุณสมบัติของก๊าซจะขึ้นกับ 1 ทิศทาง ส่งผลให้การจำลองเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดต้นทุนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทั้งด้านเวลาและแรงงานอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ

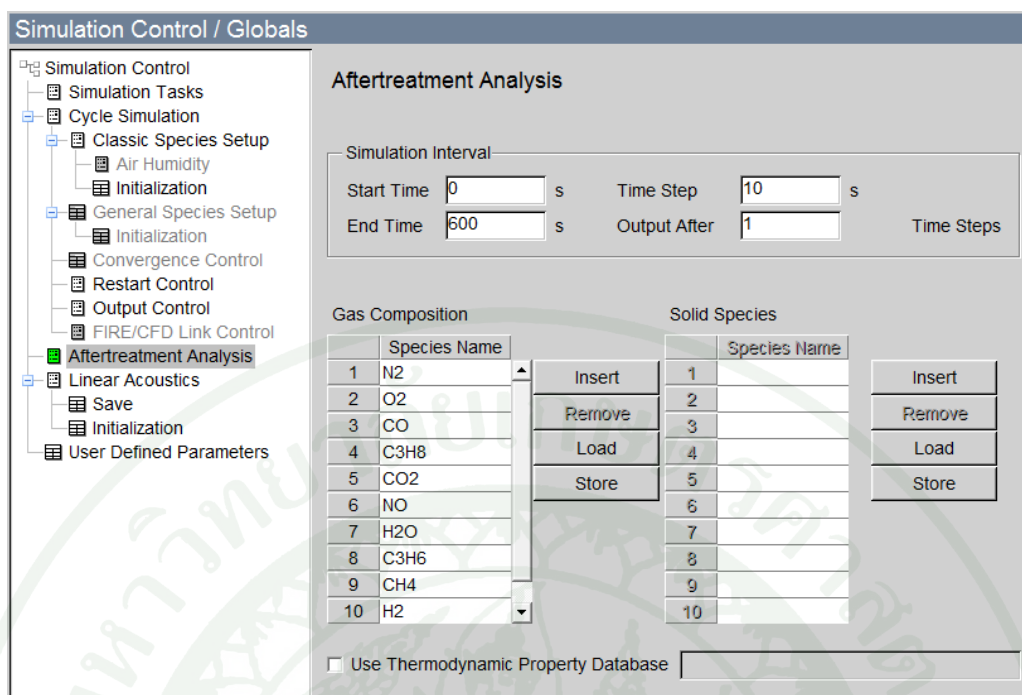


ภาพที่ 26 แสดงตัวอย่างโปรแกรม AVL-BOOST

2.1 รายละเอียดเบื้องต้นสำหรับการสร้างแบบจำลองโมเดล

2.1.1 Simulation Control

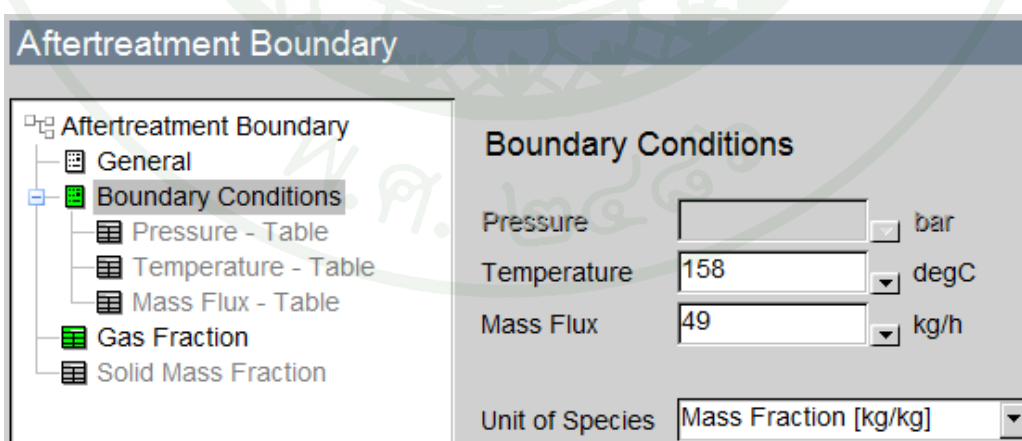
เป็นการตั้งค่าสภาวะการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ ช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง องค์ประกอบของแก๊สชนิดต่างๆ ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องฟอกไอเสีย เป็นต้น ดังแสดงภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Simulation Control

2.1.2 Inlet Condition

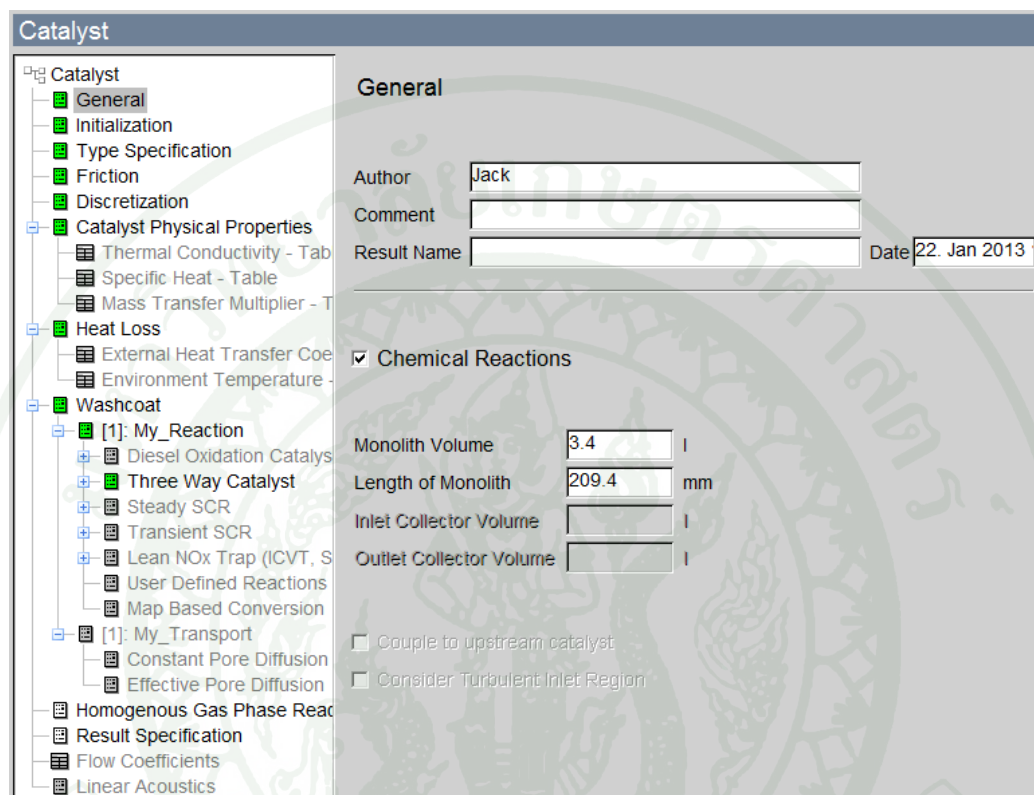
เป็นการตั้งค่าสภาวะการทำงานที่เกิดขึ้นจริงหลังจากออกจากเครื่องยนต์ในช่วงเวลาต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณไอเสียชนิดต่างๆ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Inlet Conditions

2.1.3 Catalyst

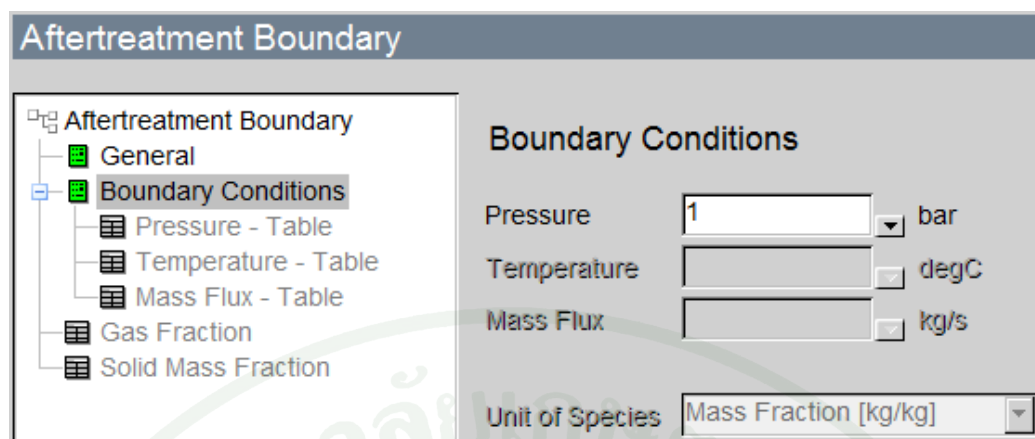
เป็นการกำหนดรายละเอียดทางกายภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น โดยแสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของ Catalyst

2.1.4 Outlet Conditions

เป็นการตั้งค่าสถานะที่เกิดขึ้นจริงหลังจากออกจากเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยกำหนดค่าความดันออกสู่ความดันบรรยากาศ แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 รายละเอียดเบื้องต้นของ Outlet Conditions

วิธีการ

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ในการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลแบบธรรมดาและแบบเชื้อเพลิงร่วม มีอยู่หลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา เช่น ชนิดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณก๊าซออกซิเจน ปริมาณไอเสียชนิดอื่นๆ เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ ดังนั้น ปัจจัยต่างๆควรมีการควบคุมให้เหมาะสมกับการทำงานในสภาวะนั้นเพื่อให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

2. อุปกรณ์ทดสอบ

2.1 เครื่องยนต์ทดสอบ

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

ตารางที่ 4 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

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

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2554)

2.2 เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาครั้งนี้ระบบบำบัดไอเสียของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องยนต์ 2KD-FTV ซึ่งภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเคลือบสาร Pt และ Pd เป็นสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ในการลด HC, CO และ CH₄ ที่ออกมาจากเครื่องยนต์และเพิ่มอุณหภูมิของไอเสียผ่านทางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยรายละเอียดของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแสดงไว้ดังตารางที่ 5

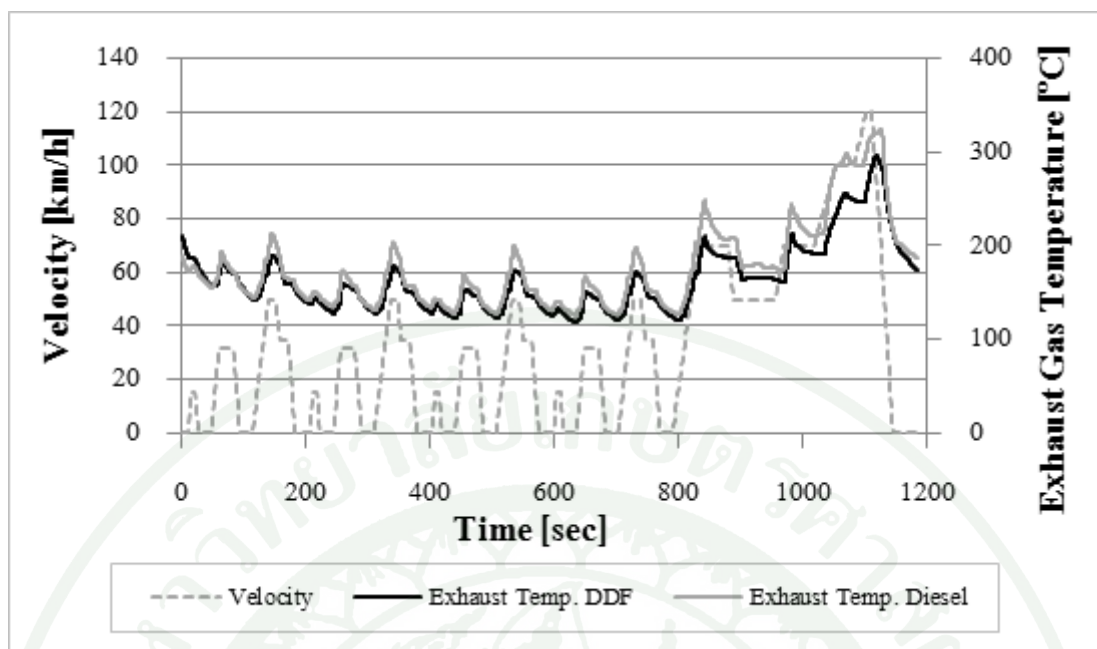
ตารางที่ 5 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

Parameter Designation	DOC (Ordegg CAT)
Cell Per Square Inch (CPSI)	400
Cell Shape	Square
Volume (L)	2 x 1.70
Pt : Pd	1:5
Precious Group Metal (g/ft ³)	165

ที่มา: Diesel Oxidation Catalyst of Ordegg (2554)

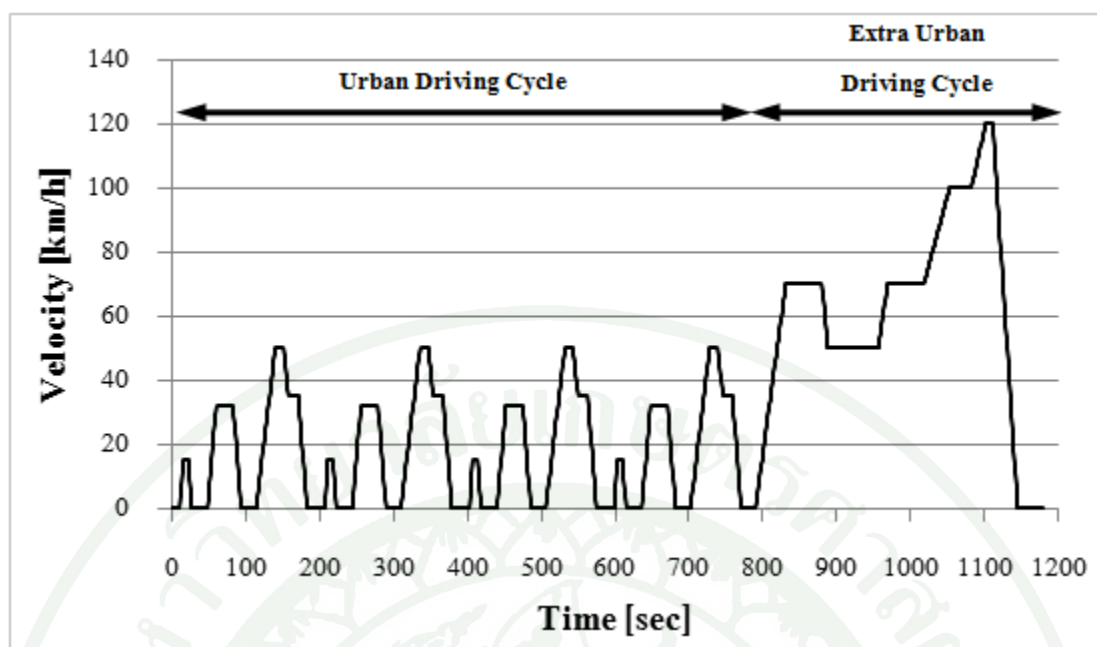
2.3 สภาพะการทำงาน of เครื่องยนต์

การทดสอบมลพิษมาตรฐานแบบ New European Driving Cycle (NEDC) เป็นมาตรฐานการวัดปริมาณไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ซึ่งเป็นการทดสอบของรถยนต์ในโหมดดีเซลธรรมดาและโหมดดีเซลเชื้อเพลิงร่วมบน Engine Dynamometer จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ซึ่งมีทั้งหมด 13 Cycle ต่อ 1 รอบการทดสอบ ดังแสดงภาพที่ 31 โดยเป็นการจำลองการขับขี่ของรถยนต์ซึ่งมีทั้งการขับขี่ในตัวเมือง (City Cycle) และนอกตัวเมือง (Highway Cycle) ดังภาพที่ 32 พบว่าในช่วง Cold Start และช่วงที่เครื่องยนต์ดีเซลมีภาระการทำงานต่ำนั้น (โดยจะอยู่ในช่วง City Cycle) จะมีปริมาณมลพิษจำพวก HC และ CO หลุดออกมาเป็นปริมาณที่มาก เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ในช่วงนั้นจะมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาต่ำนั้น ทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาไม่พร้อมทำงานในการออกซิไดซ์สารพิษเหล่านั้นไปได้



ภาพที่ 31 แสดงการทดสอบแบบ New European Driving Cycle (NEDC)

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2554)

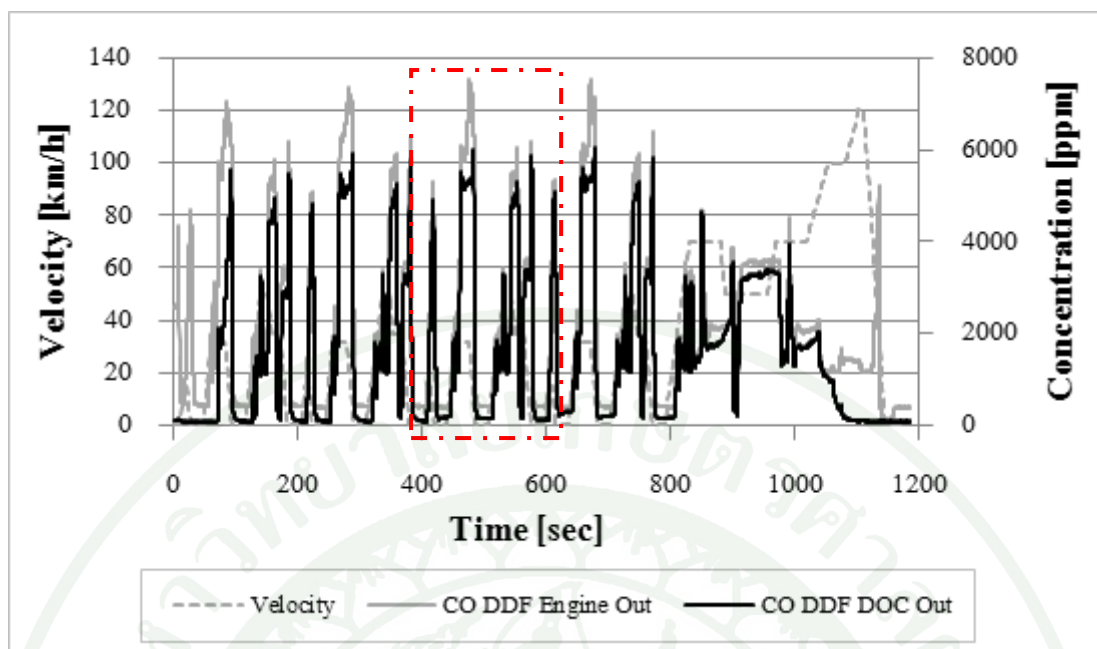


ภาพที่ 32 แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับขี่แบบในตัวเมืองและแบบนอกตัวเมืองของการทดสอบแบบ NEDC

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2554)

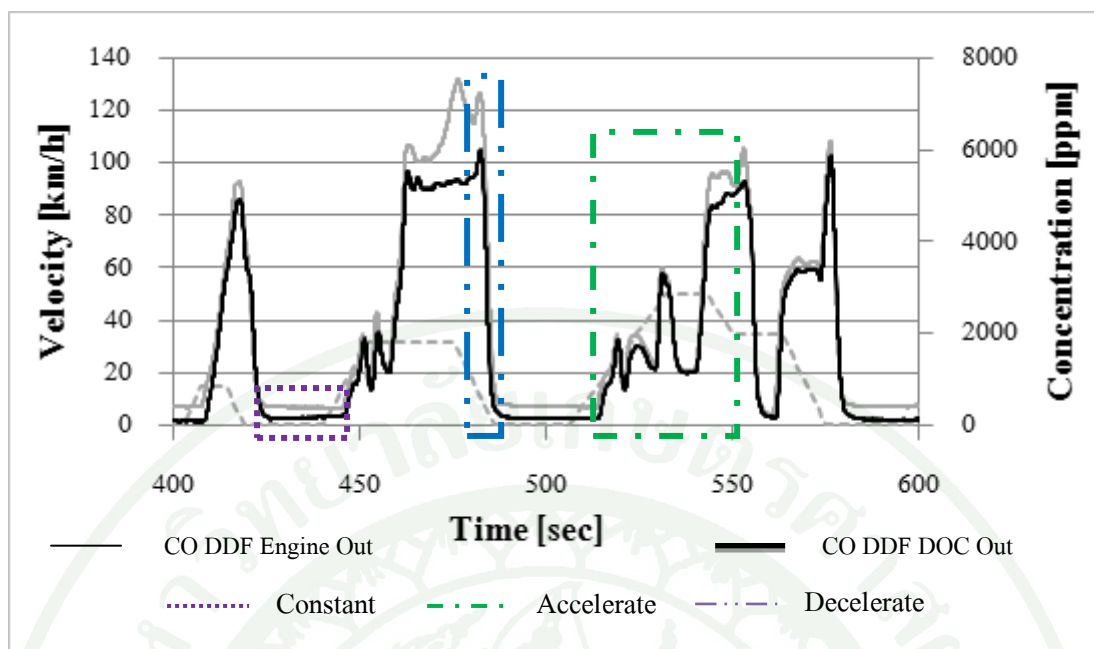
3. มลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

โดยทั่วไปสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันจะมีคุณลักษณะของไอเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ การะการทำงาน of เครื่องยนต์มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ทั้งสิ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการลดมลพิษไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในช่วง City Cycle (Loop III) ดังแสดงภาพที่ 33 ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ต่ำและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมามาก จึงส่งผลให้การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณของ CO ยังไม่พร้อมทำงาน โดยได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 ลักษณะคือ ช่วงความเร็วรอบคงที่, ช่วงเร่งความเร็ว และช่วงลดความเร็ว ดังแสดงภาพที่ 34



ภาพที่ 33 แสดงช่วง City Cycle (Loop III) ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2554)



ภาพที่ 34 แสดงการแบ่งช่วงการจำลองการขับขี่แบบในตัวเมืองทั้ง 3 ลักษณะของการทดสอบแบบ NEDC ใน Loop III

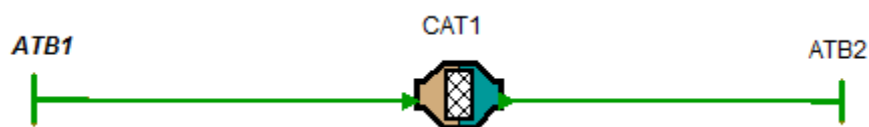
ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (2554)

4. การสร้างแบบจำลองของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

หลังจากรวบรวมข้อมูลในสภาวะการทำงานต่างๆแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้างแบบจำลองของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยโปรแกรม AVL-BOOST ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา พร้อมกับปรับเทียบค่ากับผลการทดลอง Light-Off Temperature ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อโมเดล โดยรายละเอียดมีดังนี้

4.1 การจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

จากอุปกรณ์ทดสอบ สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองด้วยโปรแกรม AVL-BOOST ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 แสดงแบบจำลองของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยา

กำหนดให้ ATB1 เป็นการกำหนดคุณลักษณะโอเลียงที่ออกมาจากเครื่องยนต์
 CAT1 เป็นการกำหนดลักษณะทางกายภาพของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยา
 ATB2 เป็นการกำหนดคุณลักษณะโอเลียงที่ออกมาจากเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่ง
 ปฏิกิริยา

4.2 การปรับเทียบค่ากับผลการทดลอง Light-Off Temperature

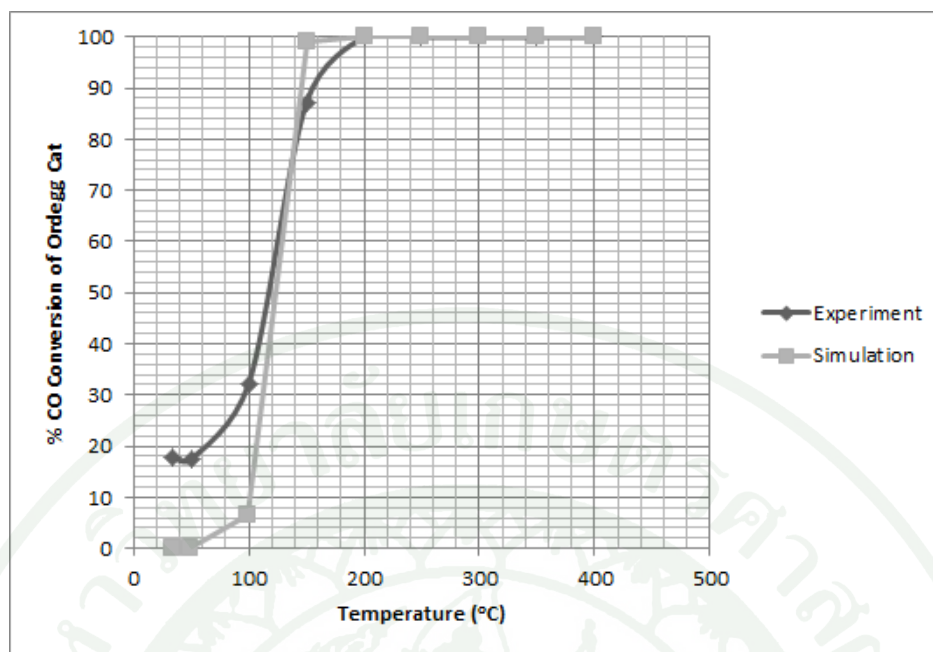
Light-Off Temperature คืออุณหภูมิที่เครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถลดปริมาณมลพิษโอเลียงได้ 50% ซึ่งการทดสอบด้วย Light-Off Temperature นั้น ทำได้โดยการฉีดก๊าซโอเลียงที่สนใจศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยาในการลดปริมาณมลพิษโอเลียงเข้าไปในระบบ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิภายนอกของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยเตาอบ และทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอเลียงที่ตำแหน่งก่อนและหลังเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิทุกๆ 50°C จนกระทั่งได้อัตราการลดปริมาณมลพิษโอเลียง 100% และนำข้อมูลไปสร้างกราฟรูปตัวเอส (S-curve) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอเลียงกับอุณหภูมิภายนอกของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยา ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อโมเดล ดังภาพที่ 36 และ 37 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการปรับเทียบ แสดงไว้ตารางที่ 6 ซึ่งจากการปรับค่าพารามิเตอร์แบบจำลองเทียบกับการทดลอง พบว่า ในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น การปรับค่าพารามิเตอร์ได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร สาเหตุเนื่องมาจากการควบคุมอุณหภูมิการทดลองไม่นิ่งพอ จึงทำให้มีการลดปริมาณมลพิษโอเลียงได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิต่ำ แต่ไม่มีผลกระทบต่องานวิจัยนี้เพราะข้อมูลของการทำงานวิจัยอยู่ในช่วงความชันของกราฟ (Slope)

แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม AVL Boost นี้ ได้ใช้ทฤษฎีของ Langmuir-Hinshelwood เป็นแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของมลพิษไอเสียที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงสมการที่ (21) และ (22) (Koltsakis *et al.*, 1997, 1999) ตามลำดับ โดยทฤษฎีของ Langmuir-Hinshelwood นี้เป็นทฤษฎีที่ในหลายๆงานวิจัยเลือกใช้ เพราะมีเทอมของ adsorption, desorption และ pore diffusion phenomena ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดก๊าซมลพิษไอเสียภายในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

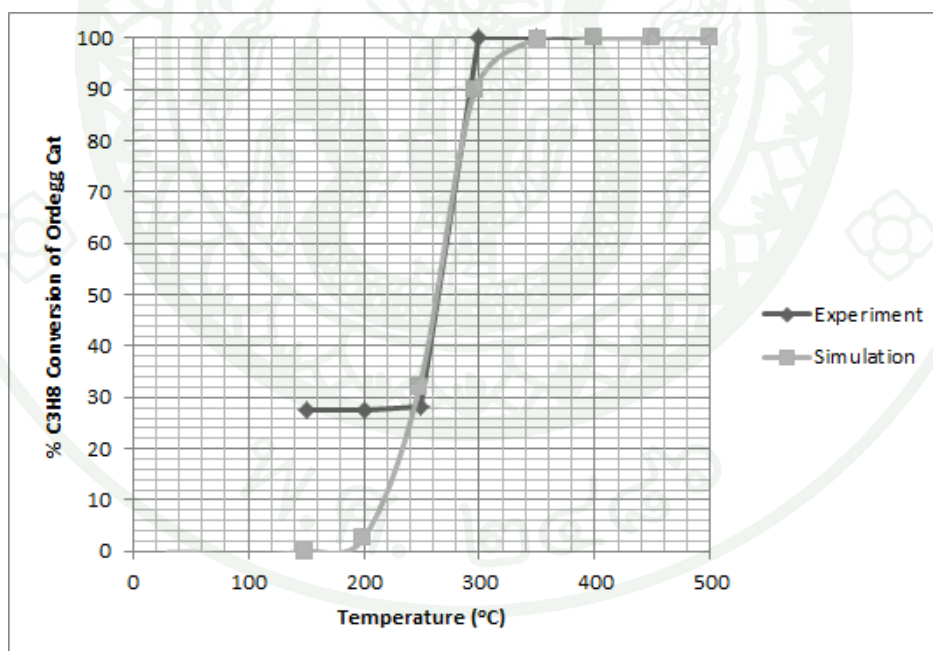
$$\dot{r} = \frac{\left[K_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T_s}\right)} \cdot y_{CO} \cdot y_{O_2} \right] \cdot \left[1 + K_2 \cdot e^{\left(\frac{-E_2}{T_s}\right)} \cdot y_{CO} + K_3 \cdot e^{\left(\frac{-E_3}{T_s}\right)} \cdot y_{C_3H_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 \cdot e^{\left(\frac{-E_4}{T_s}\right)} \cdot y_{CO}^2 \cdot y_{C_3H_6}^2 \right] \cdot \left[1 + K_5 \cdot e^{\left(\frac{-E_5}{T_s}\right)} \cdot y_{NO}^{0.7} \right] \cdot T_s} \quad (21)$$

$$\dot{r} = \frac{\left[K_1 \cdot e^{\left(\frac{-E_1}{T_s}\right)} \cdot y_{C_3H_8} \cdot y_{O_2} \right] \cdot \left[1 + K_2 \cdot e^{\left(\frac{-E_2}{T_s}\right)} \cdot y_{CO} + K_3 \cdot e^{\left(\frac{-E_3}{T_s}\right)} \cdot y_{C_3H_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 \cdot e^{\left(\frac{-E_4}{T_s}\right)} \cdot y_{CO}^2 \cdot y_{C_3H_6}^2 \right] \cdot \left[1 + K_5 \cdot e^{\left(\frac{-E_5}{T_s}\right)} \cdot y_{NO}^{0.7} \right] \cdot T_s} \quad (22)$$

กำหนดให้	r	=	Reaction rate	kmole/m ³ s
	K	=	Adsorption Heat	J/mol
	E	=	Activation Energy	J/mol
	y	=	Mole Fraction of species	kmol/kmol
	T _s	=	Solid Temperature	°K



ภาพที่ 36 แสดงผลการเปรียบเทียบของคาร์บอนมอนอกไซด์ใน Ordegg Cat



ภาพที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบของโพรเพนใน Ordegg Cat

ตารางที่ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบโปรแกรมกับผลการทดลอง

Kinetic Model	Ordegg Cat	
	CO	C ₃ H ₈
K1	127037000	550000000
E1	8000	12200
K2	65.5	65.5
E2	-1234.15	-1234.15
K3	2080	2080
E3	-634.15	-634.15
K4	3.98	3.98
E4	-11884.15	-11884.15
K5	479000	479000
E5	3459.85	3459.85

4.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

ก่อนที่จะทำการศึกษาผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการทดลองเบื้องต้นตามสภาวะการทำงานในแต่ละช่วงนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อดูแนวโน้มของแบบจำลองที่ได้จากการเทียบผลการทดลอง Light-Off Temperature

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแบบจำลองของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำแบบจำลองที่ได้มาปรับเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อความถูกต้อง โดยทั่วไปในงานวิจัยด้านเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองทางสถิติ คือ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์, ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งการออกแบบการทดลองได้นำหลักการของ Box-Behnken มาใช้ในพิจารณา แสดงช่วงของการออกแบบดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8 โดยผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแสดงในตารางภาคผนวกที่ ก1 และ ก2 ตามลำดับ

ส่วนความถูกต้องของแบบจำลองเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่จำลองด้วย AVL-BOOST นั้น แสดงดังภาพที่ 38 และ 39 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองจริงและ AVL-BOOST ที่สภาวะการทำงานต่างๆกัน โดยมีรายละเอียดของการทดสอบ ดังนี้

ก. อุณหภูมิ 120°C ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 1000 ppm ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า 1000 ppm ผลที่ได้จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดียวกัน

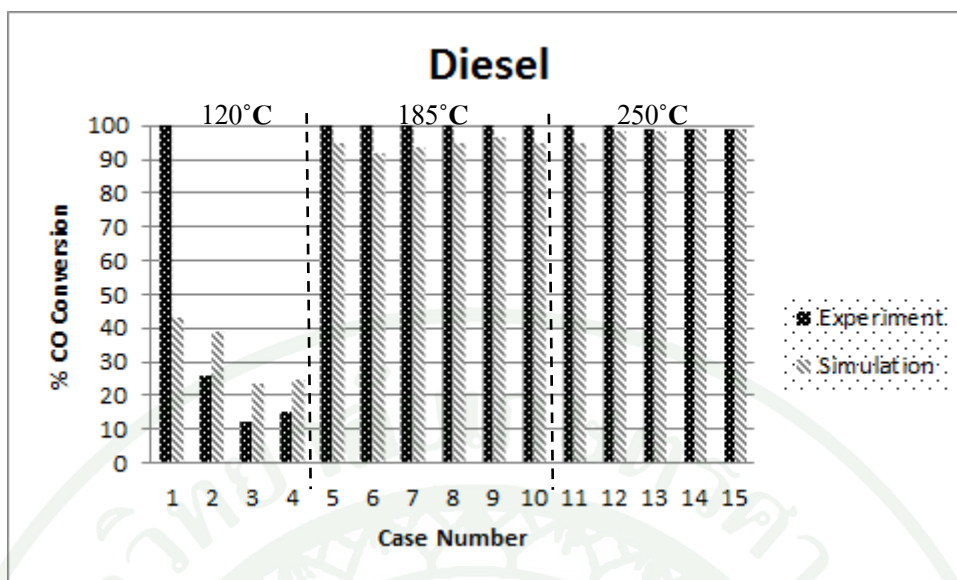
ข. อุณหภูมิ 185°C ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 1000 ppm ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า 1000 ppm ผลที่ได้จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดียวกัน

ค. อุณหภูมิ 250°C ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 – 7500 ppm ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบเบื้องต้น พบว่า ให้ผลที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่เกิดขึ้นในลักษณะทิศทางเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นและลดลง จึงเทียบเคียงได้ว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายผลได้

ตารางที่ 7 แสดงการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

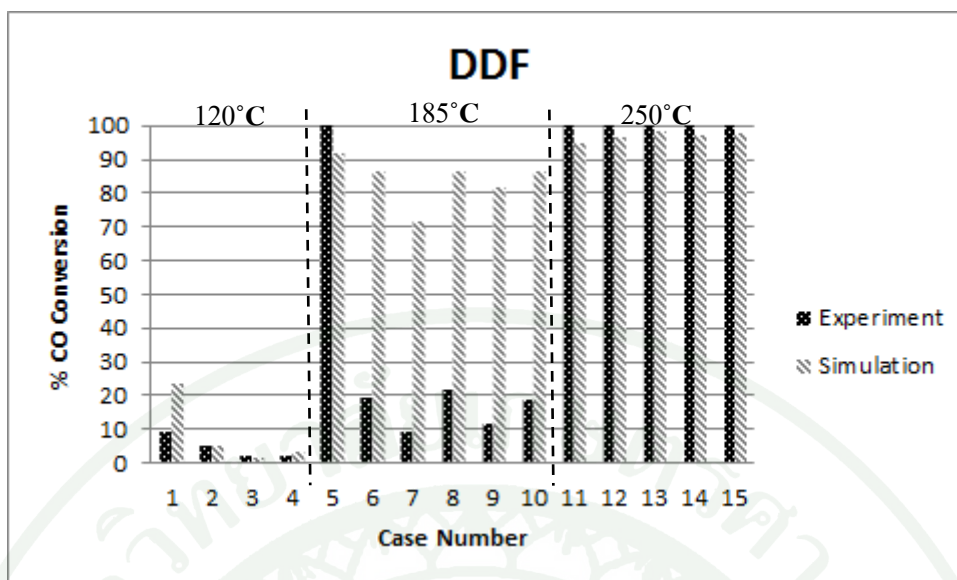
ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์	120	250	°C
ปริมาณออกซิเจน	10	16	%
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์	200	1000	ppm



ภาพที่ 38 แสดงผลการเปรียบเทียบของเครื่องยนต์ดีเซลระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 8 แสดงการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์	120	250	°C
ปริมาณออกซิเจน	10	16	%
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์	1000	7500	ppm



ภาพที่ 39 แสดงผลการเปรียบเทียบของเครื่องย่นตัดเซลล์เชื้อเพลิงร่วมระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

5. การออกแบบการทดลอง

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลอง 2 ครั้งคือ ในครั้งแรกทำการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อที่จะคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป พร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะทำงานต่างๆ หลังจากนั้นทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 50% และ 90% ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การเลือกศึกษาที่ 50% และ 90% นั้น เนื่องจากในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น จะใช้ Light-Off Temperature เป็นตัวแทนในการทดสอบ ซึ่ง Light-Off Temperature คืออุณหภูมิที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสามารถลดปริมาณมลพิษไอเสียได้ 50% ส่วนประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 90% จะเป็นช่วงการทำงานที่สามารถลดมลพิษได้มากที่สุด

5.1 การทดลองเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้นนี้ ผู้ทำการวิจัยจะใช้เทคนิคการทดลองและวิเคราะห์ผลแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เมื่อปัจจัยมี 2 ระดับ แบบไม่มีการทำซ้ำ (No Replicate) โดยจะกำหนดปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (Maximum) และค่าต่ำสุด (Minimum) ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะกับการทดลอง

เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในเบื้องต้น (Factor Screening Experiment) เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองของประสิทธิภาพการลดไอเสียของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาออกไป ข้อดีของการทดลองแบบนี้คือใช้ตัวอย่างน้อยที่สุด ทำให้สามารถประหยัดเวลาและทรัพยากรได้มาก โดยช่วงข้อมูลของการทดลองที่นำมาใช้นั้น อ้างอิงจากสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ในช่วง City Cycle (Loop III) ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณไอเสียออกมามากที่สุด เนื่องจากเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยายังไม่พร้อมทำงานได้ แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 ลักษณะคือ ช่วงความเร็วรอบคงที่, ช่วงเร่งความเร็ว และช่วงลดความเร็วตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดของแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

5.1.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม (DDF)

ทำการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงของสภาวะการทำงานต่างๆ

Case Study	Temperature (°C)	Flow Rate (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)
Constant	139	34	18	440	2054
	122	24	16	360	344
Accelerate	173	93	17	5780	7533
	122	24	8	530	1567
Decelerate	146	47	20	6200	1842
	134	23	13	440	445

5.1.3 ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

5.2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หลังจากนั้นจึงออกแบบการทดลองสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสม โดยการใช้การทดลองแบบ Box - Behnken เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการลดโอเลียงของเครื่องฟอกโอเลียงเชิงเร่งปฏิกิริยาอย่างแท้จริง โดยช่วงข้อมูลของการทดลองที่นำมาใช้นั้น อ้างอิงจากสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์จริงในช่วง City Cycle (Loop III) รายละเอียดของแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมมีดังนี้

5.2.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของเครื่องยนต์ ทำการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของเครื่องยนต์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
อุณหภูมิโอเลียงที่ออกจากเครื่องยนต์	125	200	°C
อัตราการไหลเชิงมวล	25	96	kg/h
ปริมาณออกซิเจน	8	16	%
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์	100	6200	ppm

5.2.2 ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

5.2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

6. สรุปผลการวิจัย

เป็นการนำผลการคำนวณที่ได้ในแต่ละส่วนมาวิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งแสดงในบทถัดไป

ตารางที่ 11 ตารางการดำเนินงาน

ชื่อโครงการ : Impacts of Parameters on CO Reductions in a Diesel Oxidation Catalyst of Diesel Dual Fuel Engines Using Design of Experiments												
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เอกไท วิโรจน์สกุลชัย, Ph.D. ผศ. ดร. ชเนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.						ผู้จัดทำ : นายชเนศ ลิ้มภูมิมงคล						
สถานที่ดำเนินงาน : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท.						เริ่มโครงการ : 1 พ.ค. 2555 สิ้นสุดโครงการ : 31 เม.ย. 2556						
รายละเอียด	2555						2556					
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. รวบรวมข้อมูล												
2. ออกแบบการทดลอง												
3. ทำการทดลอง												
4. วิเคราะห์ข้อมูล												
5. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์												

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งสามารถหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50% และ 90% ซึ่งจากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อแบบจำลอง ยังทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยแล้ว จึงแบ่งการศึกษาออกเป็นหัวข้อ ดังนี้

การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆ

ก. ช่วงความเร็วรอบคงที่

ข. ช่วงเร่งความเร็ว

ค. ช่วงลดความเร็ว

การทดลองหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ก. กรณีลดปริมาณมลพิษลงได้ 50%

ข. กรณีลดปริมาณมลพิษลงได้ 90%

ซึ่งข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองตามหัวข้อต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการทดลองเบื้องต้น

ผลการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นนี้ ได้จากการทำการทดลองตามสภาวะและเก็บข้อมูลตามลำดับ โดยมีจำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งหมด 16 สภาวะที่แตกต่างกัน แบบไม่มีการทำซ้ำ และมีวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองในช่วงความเร็วรอบคงที่, ช่วงเร่งความเร็ว และช่วงลดความเร็ว โดยใช้การทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ซึ่งตัวแปรตอบสนองคือค่า CO Conversion ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลใน

เบื้องต้นสามารถแสดงได้ในตารางที่ 12 ถึง 14 ตามลำดับ มีรายละเอียดของการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

1.1 การทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วรอบคงที่

1.1.1 ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้นที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ข1 โดยระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วรอบคงที่

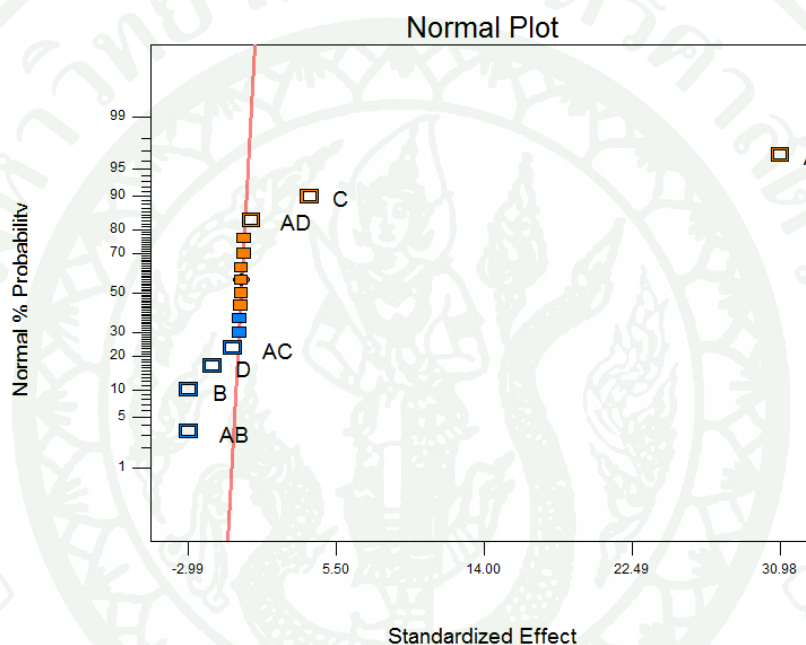
ตัวแปร	ปัจจัย	-1	+1
A	อุณหภูมิไอเสียจากเครื่องยนต์ (°C)	122	139
B	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)	24	34
C	ปริมาณออกซิเจน (%)	16	18
D	ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	360	440
E	ปริมาณโพรเพน (ppm)	344	2054

1.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วรอบคงที่

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลบางส่วนเมื่อระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้หลักการทางสถิติ ดังนี้

ก. การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนนั้น สามารถทำได้โดย การแจกแจงความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยค่าแกนนอนคือค่าผลกระทบปัจจัย ค่าแกนตั้งคือ ความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งกราฟที่ได้จะใช้พิจารณาความสำคัญของปัจจัย โดยอาศัยการลากเส้นตรงผ่านจุดให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าจุดค่าผลกระทบปัจจัยใดอยู่ห่างจากเส้นตรงมาก ปัจจัยนั้นก็จะมีส่วนต่อคำตอบสนองมาก ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง

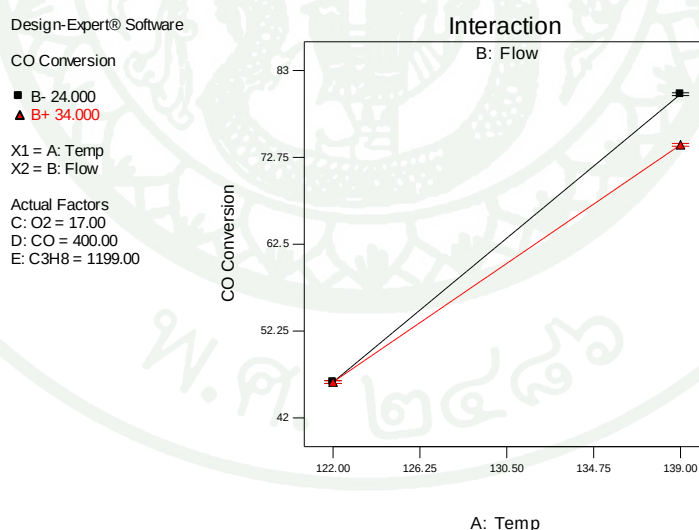
จากกราฟจะเห็นว่า จุดที่อยู่ห่างจากเส้นตรงมากที่สุด คือ ค่าผลกระทบปัจจัย A, C, B, D, AB, AC, AD โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียล จะทำการพิจารณาอันตรกิริยา (ผลกระทบร่วม) ก่อนเสมอ จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยร่วม AB, AC, AD มีผลต่อคำตอบสนอง ซึ่งขั้นต่อไปคือทำการกำหนดค่าที่เหมาะสม โดยการใช้การสร้างกราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) AB, AC, AD

ข. การวิเคราะห์กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot)

ในการพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยนั้น อาจพิจารณาได้โดยใช้กราฟที่เรียกว่า Interaction Plot โดยหากเส้นกราฟระหว่างปัจจัยนั้นขนานกัน แสดงว่า ไม่พบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย แต่ถ้าเส้นกราฟระหว่างปัจจัยนั้นไม่ขนานกันหรือตัดกัน แสดงว่า พบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในข้อต่อไป

1) อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับอัตราการไหลเชิงมวล

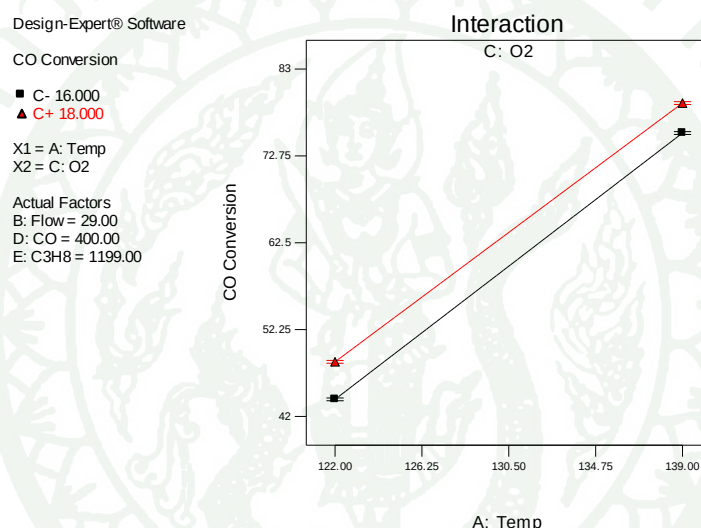
ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับอัตราการไหลเชิงมวล มีผลต่อค่า CO Conversion แสดงว่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับอัตราการไหลเชิงมวลมีความสัมพันธ์กัน โดยที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (139°C) และอัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (24 kg/h) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ (Mean = 80) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ตัวแปรตอบสนอง

2) อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณออกซิเจน

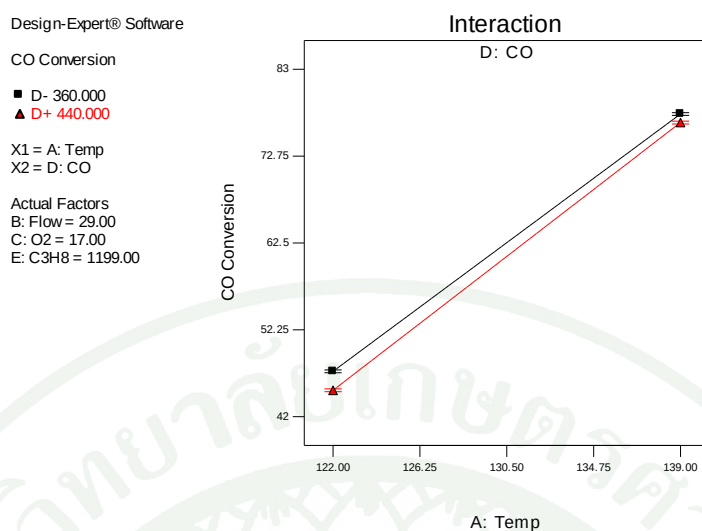
ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณออกซิเจนมีผลต่อค่า CO Conversion แสดงว่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณออกซิเจนมีความสัมพันธ์กัน โดยที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (139°C) และปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้น (18%) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean = 80) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

3) อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีผลต่อค่า CO Conversion แสดงว่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีความสัมพันธ์กัน โดยที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (139°C) และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (360 ppm) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean < 83) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

1.2 การทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว

1.2.1 ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้นที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ข2 โดยระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว

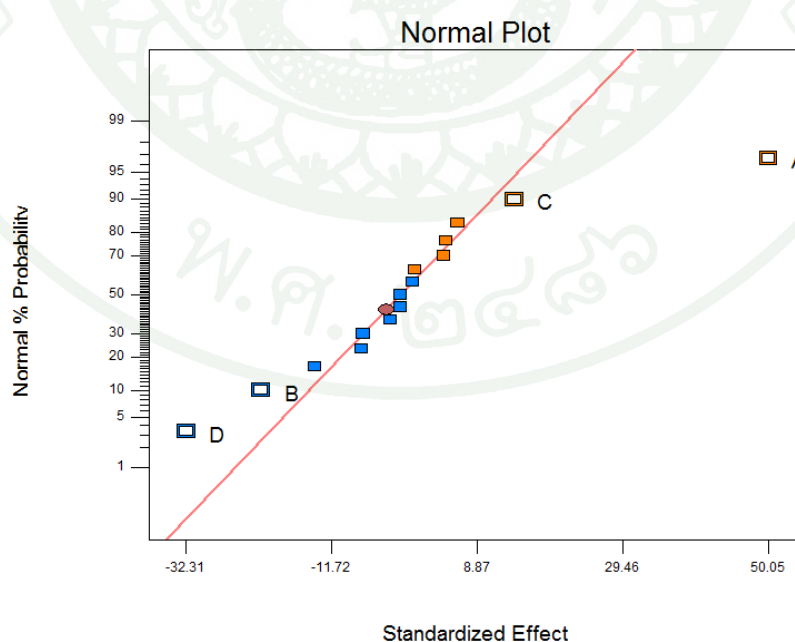
ตัวแปร	ปัจจัย	-1	+1
A	อุณหภูมิไอเสียจากเครื่องยนต์ (°C)	122	173
B	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)	24	93
C	ปริมาณออกซิเจน (%)	8	17
D	ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	530	5780
E	ปริมาณโพรเพน (ppm)	1567	7533

1.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลบางส่วนเมื่อระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้หลักการทางสถิติดังนี้

ก. การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนนั้น สามารถทำได้โดย การแจกแจงความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยค่าแกนนอนคือค่าผลกระทบปัจจัย ค่าแกนตั้งคือ ความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งกราฟที่ได้จะใช้พิจารณาความสำคัญของปัจจัย โดยอาศัยการลากเส้นตรงผ่านจุดให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าจุดค่าผลกระทบปัจจัยใดอยู่ห่างจากเส้นตรงมาก ปัจจัยนั้นก็จะมผลกระทบต่อค่าตอบสนองมาก ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง

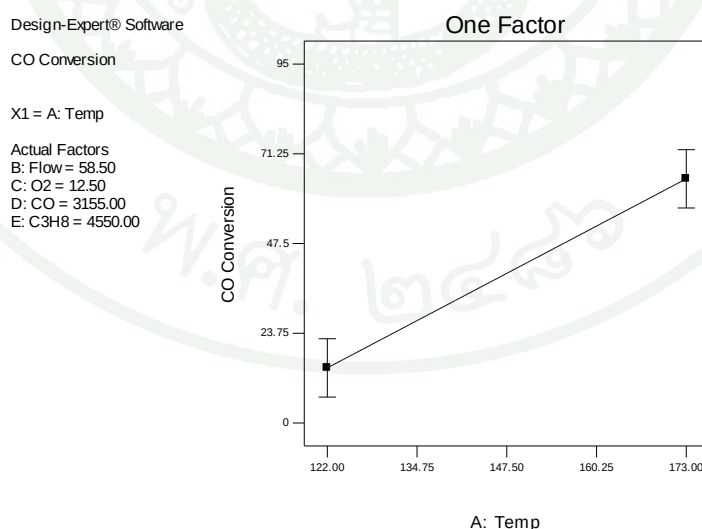
จากกราฟจะเห็นว่า จุดที่อยู่ห่างจากเส้นตรงมากที่สุด คือ ค่าผลกระทบปัจจัย A, B, D ซึ่งขั้นต่อไปคือทำการกำหนดค่าที่เหมาะสม โดยการใช้การสร้างกราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot)

ข. การวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot)

ในการพิจารณาผลกระทบหลักนั้น อาจพิจารณาได้โดยการใช้กราฟที่เรียกว่า Main Effect Plot เป็นเส้นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง ในกรณีที่ปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในข้อต่อไป

1) อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์

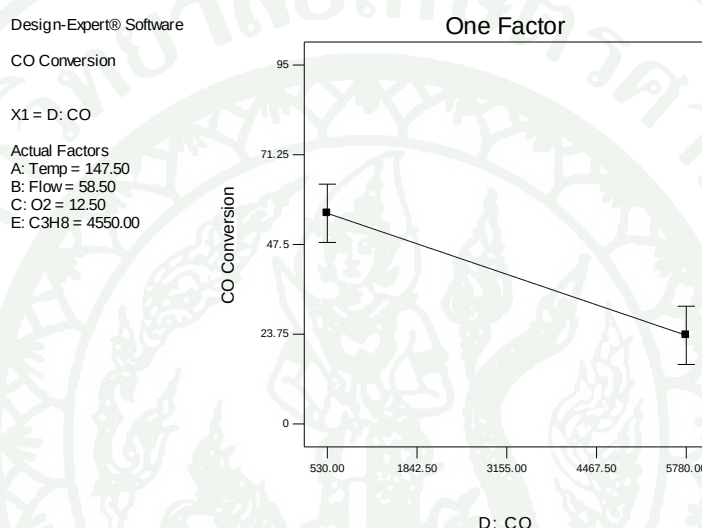
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ มีผลต่อค่า CO Conversion โดยอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (173°C) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean > 60) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

2) ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

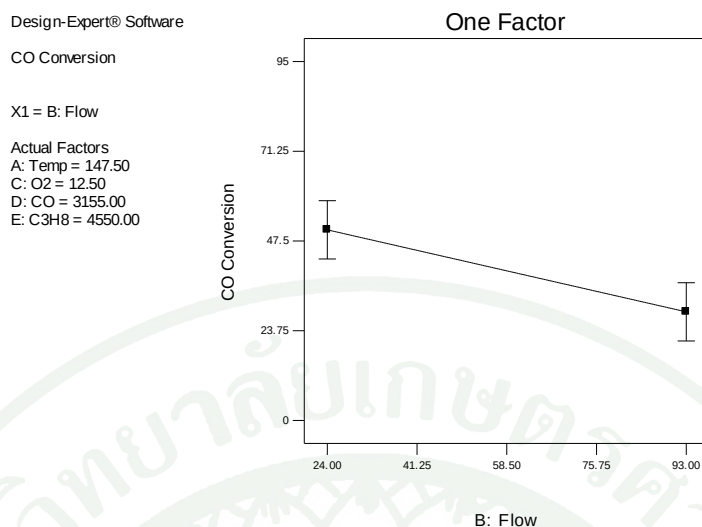
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีผลต่อค่า CO Conversion โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (530 ppm) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean > 55) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

3) อัตราการไหลเชิงมวล

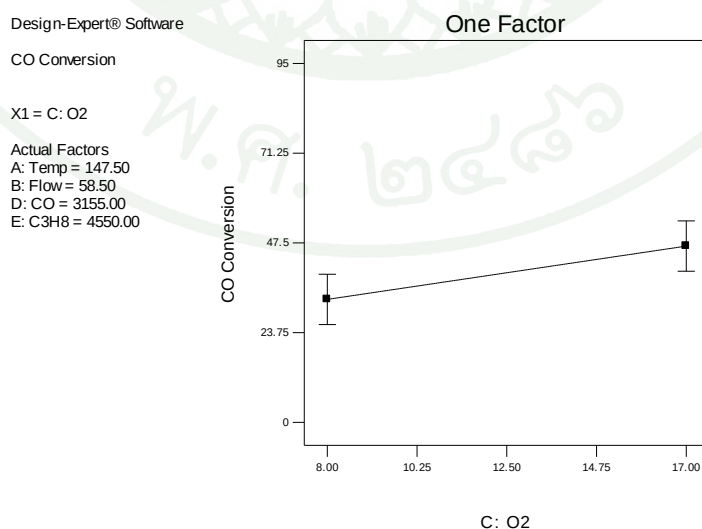
อัตราการไหลเชิงมวลมีผลต่อค่า CO Conversion โดยอัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (24 kg/h) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean = 50) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 47



ภาพที่ 47 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

4) ปริมาณออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนมีผลต่อค่า CO Conversion โดยปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้น (17%) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ (Mean = 47.5) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

1.3 การทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว

1.3.1 ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้นที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ข3 โดยระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว

ตัวแปร	ปัจจัย	-1	+1
A	อุณหภูมิไอเสียจากเครื่องยนต์ ($^{\circ}\text{C}$)	134	146
B	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)	23	47
C	ปริมาณออกซิเจน (%)	13	20
D	ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	440	6200
E	ปริมาณโพรเพน (ppm)	445	1842

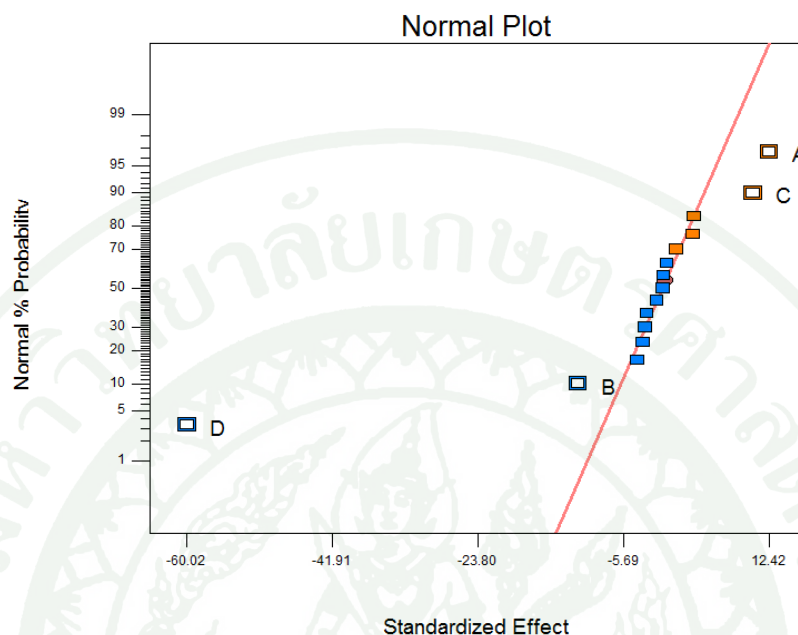
1.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลบางส่วนเมื่อระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้หลักการทางสถิติดังนี้

ก. การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนนั้น สามารถทำได้โดย การแจกแจงความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยค่าแกนนอนคือค่าผลกระทบปัจจัย ค่าแกนตั้งคือ ความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งกราฟที่ได้จะใช้พิจารณาความสำคัญของ

ปัจจัย โดยอาศัยการลากเส้นตรงผ่านจุดให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าจุดค่าผลกระทบปัจจัยใดอยู่ห่างจากเส้นตรงมาก ปัจจัยนั้นก็จะมีส่วนต่อค่าตอบสนองมาก ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 แสดงผลของความมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง

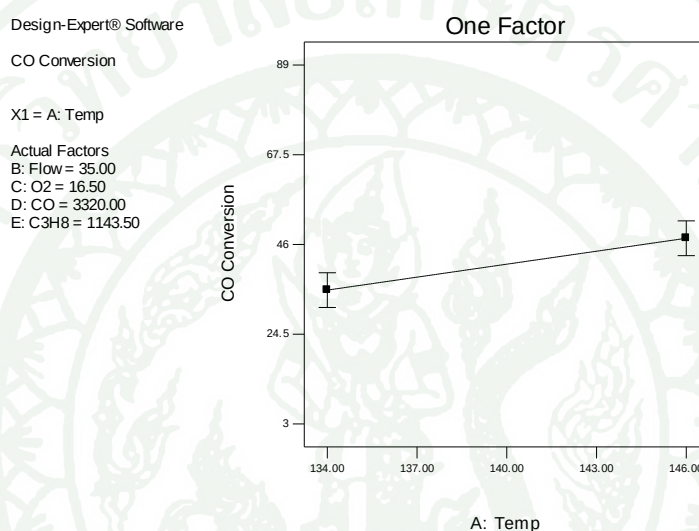
จากกราฟจะเห็นว่า จุดที่อยู่ห่างจากเส้นตรงมากที่สุด คือ ค่าผลกระทบปัจจัย A, B, D ซึ่งขั้นต่อไปคือทำการกำหนดค่าที่เหมาะสม โดยการใช้การสร้างกราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot)

ข. การวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot)

ในการพิจารณาผลกระทบหลักนั้น อาจพิจารณาได้โดยการใช้กราฟที่เรียกว่า Main Effect Plot เป็นเส้นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง ในกรณีที่ปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในข้อต่อไป

1) อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์

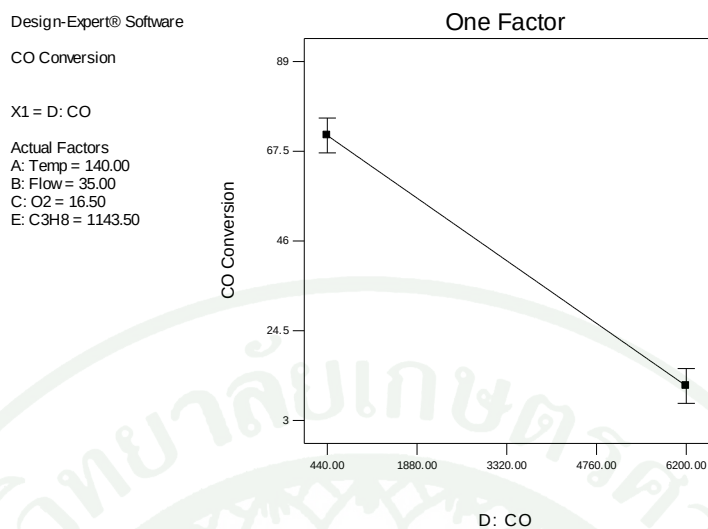
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ มีผลต่อค่า CO Conversion โดยอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (146°C) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean = 47.5) นั่นคือทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

2) ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

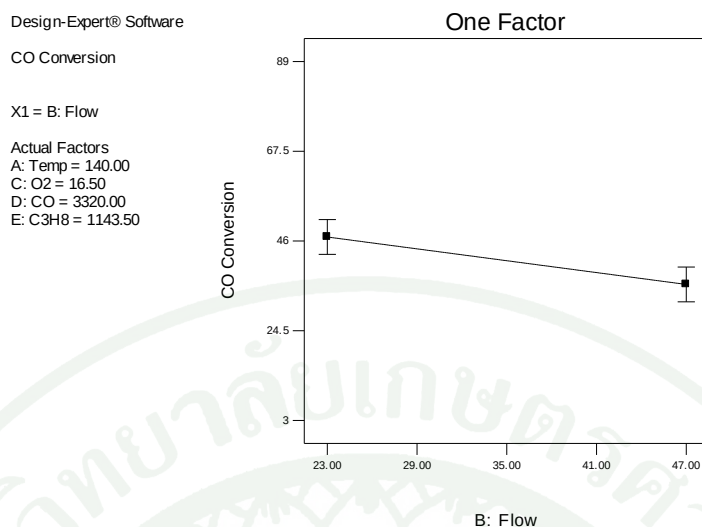
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีผลต่อค่า CO Conversion โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (440 ppm) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean = 70) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

3) อัตราการไหลเชิงมวล

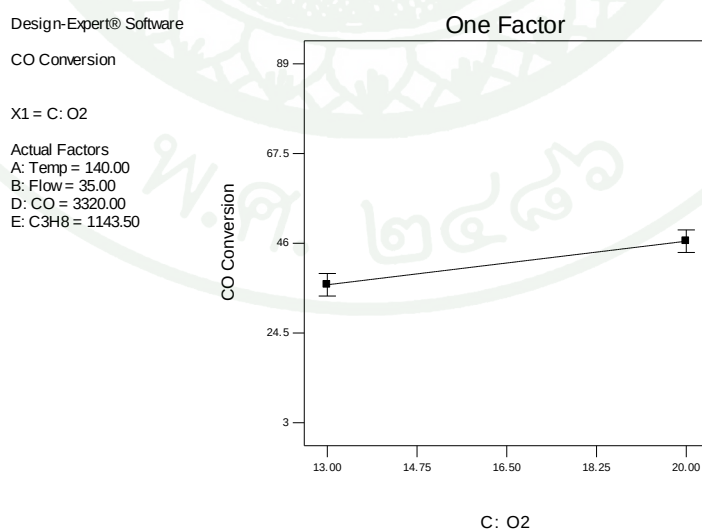
อัตราการไหลเชิงมวลมีผลต่อค่า CO Conversion โดยอัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (23 kg/h) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มสูงขึ้นได้ (Mean > 45) นั่นคือช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

4) ปริมาณออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจน มีผลต่อค่า CO Conversion โดยปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้น (20%) จะช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ (Mean = 46) นั่นคือทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 53



ภาพที่ 53 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ต่อตัวแปรตอบสนอง

จากผลการทดลองเบื้องต้น ในภาพรวมของช่วงการจำลองการขับแบบในตัวเมือง ทำให้ทราบว่า มี 4 ปัจจัยที่มีผลต่อ CO Conversion คือ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์, อัตราการไหลเชิงมวล, ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยนำปัจจัยที่ได้จากผลการทดลองเบื้องต้นไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะทำงานที่เหมาะสม ส่วนปริมาณความเข้มข้นของโพรเพนสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีผลต่อค่า CO Conversion อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการวิจัยนี้มีช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ จึงทำให้โพรเพนไม่มีอิทธิพลต่อการลดคาร์บอนมอนอกไซด์ (Light-Off Temperature ของ C_3H_8 สูงกว่า CO มาก) โดยผลจากการออกแบบการทดลองยังพบอีกว่า อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่มากขึ้น และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง จะช่วยทำให้การทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมใช้รูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยเลือกใช้แบบการทดลองสำหรับการทดลองที่มี 4 ปัจจัย และมีระดับปัจจัย 2 ระดับ โดยนำปัจจัย 4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า CO Conversion จากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งมีตัวแปรตามคือค่า CO Conversion โดยมีจำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งหมด 27 สภาวะที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดการทดลองดังตารางภาคผนวกที่ ข1

2.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางภาคผนวกที่ ค1 โดยระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ตัวแปร	ปัจจัย	-1	0	+1
A	อุณหภูมิไอเสียจากเครื่องยนต์ (°C)	125	162.5	200
B	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)	25	60.5	96
C	ปริมาณออกซิเจน (%)	8	12	16
D	ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	100	3150	6200

2.1.2 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

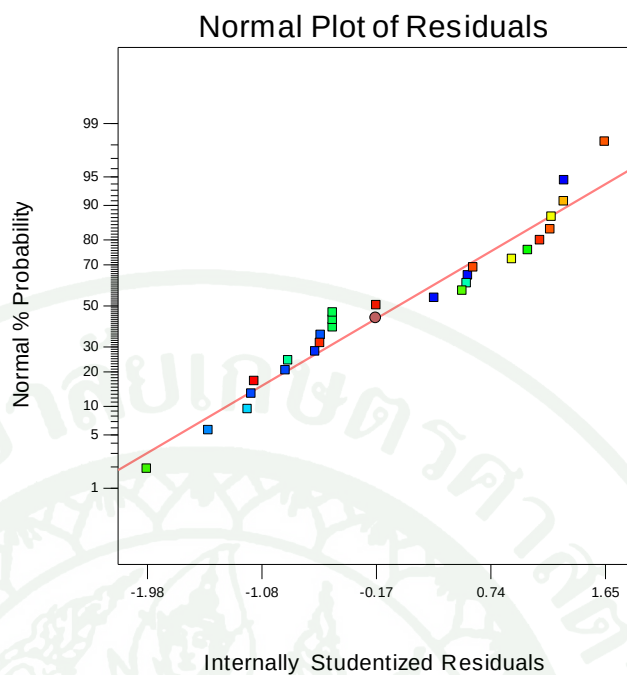
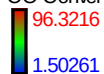
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลและความถูกต้องในการวิเคราะห์ โดยอาศัยค่า Residual ในการวิเคราะห์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมีดังนี้

ก. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

โดยพิจารณาจากการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในภาพที่ 54 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

Design-Expert® Software
CO Conversion

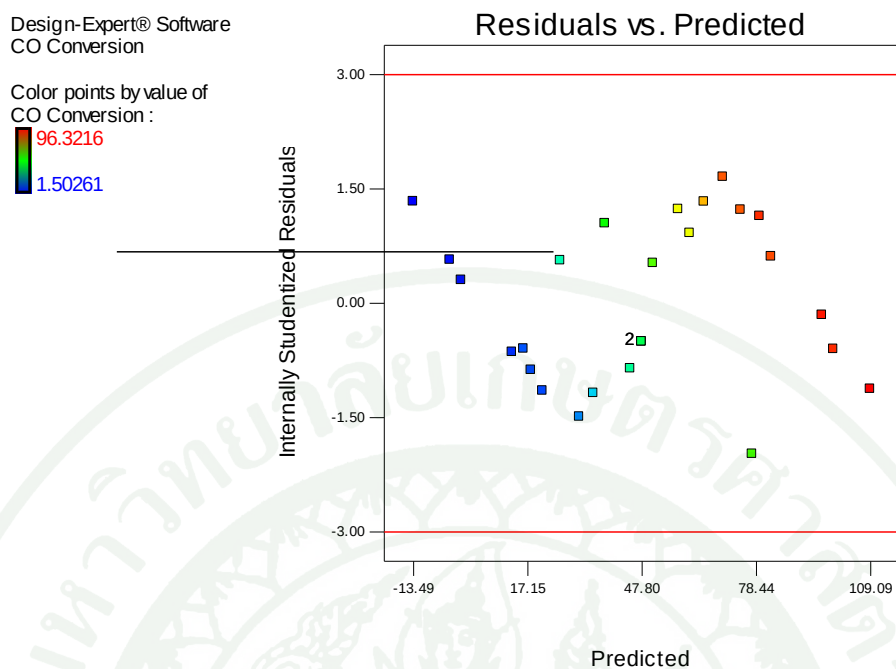
Color points by value of
CO Conversion :



ภาพที่ 54 กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken

ข. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

โดยใช้แผนภูมิการกระจายดังภาพที่ 55 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



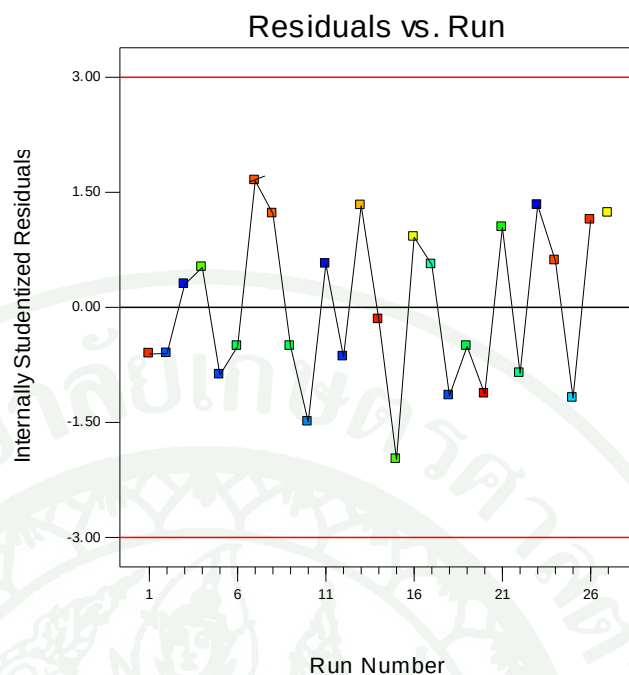
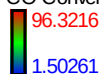
ภาพที่ 55 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนอง สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken

ค. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน

เป็นการตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากรูปที่ 56 พบว่า ค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) และความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

Design-Expert® Software
CO Conversion

Color points by value of
CO Conversion :



ภาพที่ 56 กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล สำหรับแผนการทดลองแบบ Box-Behnken

2.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

จากผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการในตารางที่ 16 พบว่า Linear vs Mean มีค่า P value < 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ค่าสถิติทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ความเหมาะสมของสมการเป็นแบบสมการเชิงเส้นตรง

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการ

source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Mean vs Total	61686.25	1	61686.25		
Linear vs Mean	27126.39	4	6781.60	42.40	< 0.0001
2FI vs Linear	983.95	6	163.99	1.04	0.4389
Quadratic vs 2FI	284.52	4	71.13	0.38	0.8192

จากการทดลองแบบ Box-Behnken เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่า CO Conversion มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการถดถอยและพยากรณ์ค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังแสดงตารางที่ 17 และได้สมการถดถอยเป็น $\text{CO Conversion (\%)} = 47.80 + 41.55A - 9.89B + 6.83C - 19.74D$ โดยกำหนดให้

อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ (A)	มีค่าอยู่ระหว่าง 125 - 200	°C
อัตราการไหลเชิงมวล (B)	มีค่าอยู่ระหว่าง 25 - 96	kg/h
ปริมาณออกซิเจน (C)	มีค่าอยู่ระหว่าง 8 - 16	%
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (D)	มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 6200	ppm

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P value
Model	27126.38596	4	6781.59649	42.39936	< 0.0001
A-Temp	20717.25547	1	20717.25547	129.5268	< 0.0001
B-Flow	1173.656192	1	1173.656192	7.337841	0.0128
C-O ₂	559.0035366	1	559.0035366	3.494958	0.0749
D-CO	4676.470758	1	4676.470758	29.23786	< 0.0001
Residual	3518.805731	22	159.945715		
Lack of Fit	3518.805731	20	175.9402866		
Pure Error	0	2	0		
Cor Total	30645.19169	26			

หมายเหตุ R-Sq = 0.8852, R-Sq(adj) = 0.8643

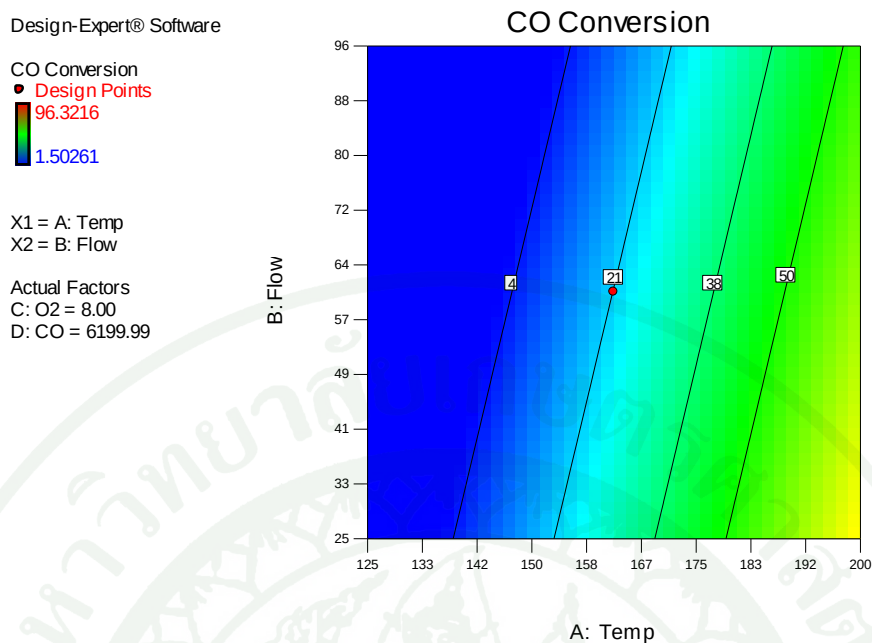
ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) = 0.8643 หมายความว่า ในความผันแปรของค่าประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 86.43% ซึ่งหากต้องการให้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากขึ้น สามารถทำได้โดยการกำหนดช่วงแต่ละปัจจัยให้แคบลง เพราะในงานวิจัยนี้เลือกช่วงที่กว้าง เนื่องจากต้องการเห็นภาพรวมของช่วงการทำงานที่เกิดขึ้นจริงของเครื่องยนต์ทดสอบ

2.1.4 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการหาสภาวะทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50% และ 90% ตามลำดับ โดยมีปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าว จึงทำการวิเคราะห์ Optimization ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (Design Expert 7) ได้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้

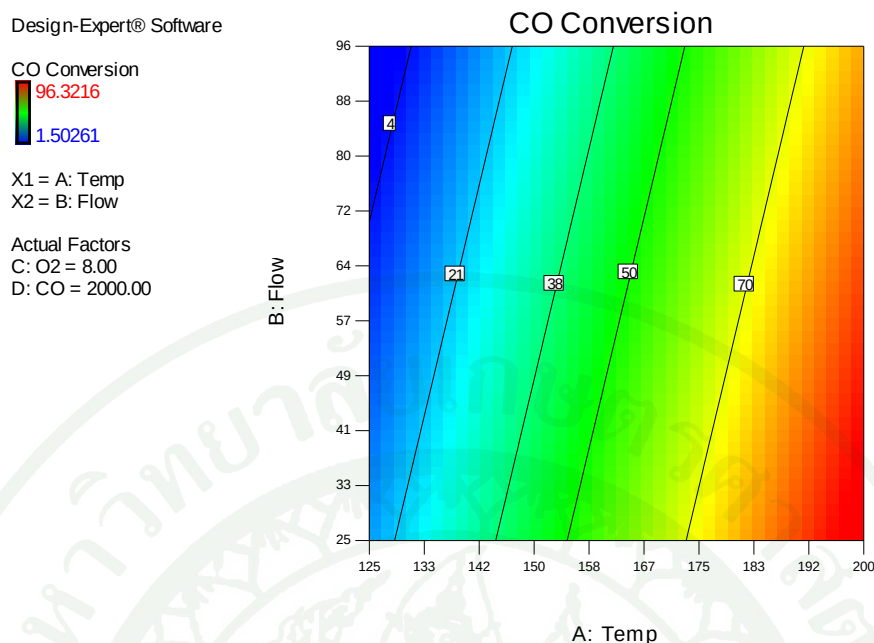
ก. กรณีลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50%

มลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะการทำงานภาระต่ำของเครื่องยนต์มากที่สุด นั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 8% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ 180°C โดยประมาณ จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50% แสดงดังภาพที่ 57 และข้อมูลตารางภาคผนวกที่ ง1



ภาพที่ 57 แสดงสถานะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50%

สำหรับปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบโดยเฉลี่ยนั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 8% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 154°C โดยประมาณ จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ 50% แสดงดังภาพที่ 58 และข้อมูลตารางภาคผนวกที่ 2

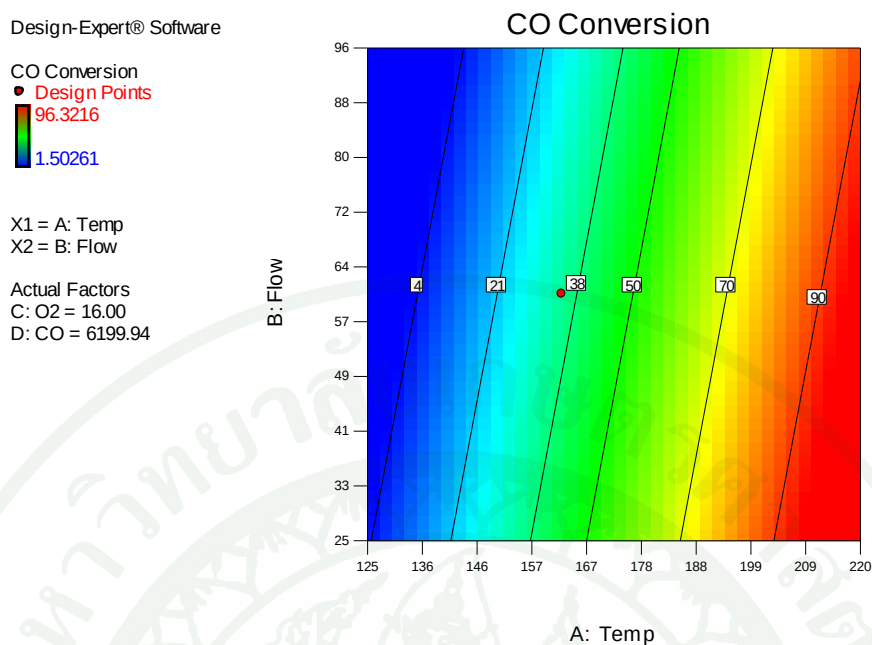


ภาพที่ 58 แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50%

นอกจากนี้ได้ทำการแสดงข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50% ดังตารางภาคผนวกที่ ง3 ในกรณีที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ อยู่ในช่วงของการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน

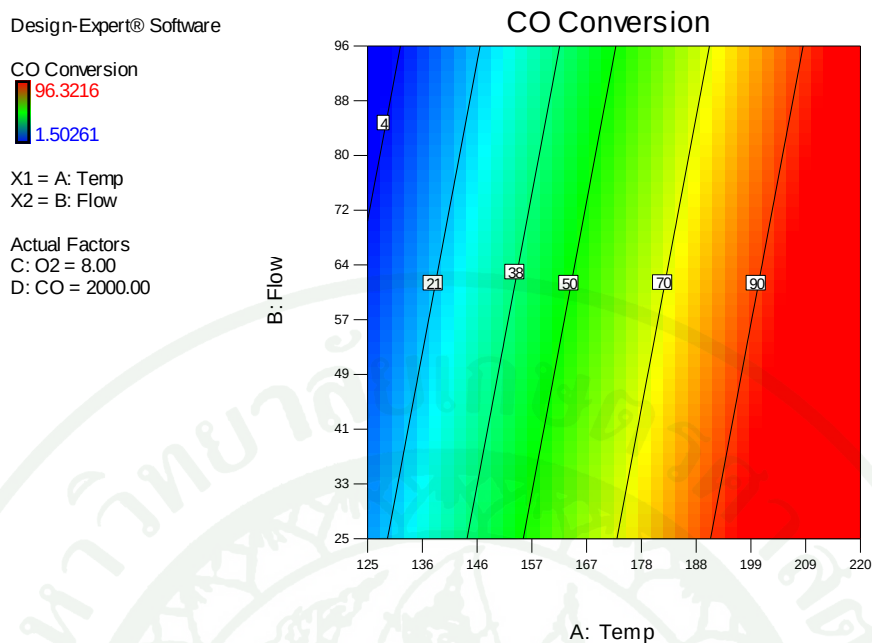
ข. กรณีลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90%

มลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะการทำงานภาระต่ำของเครื่องยนต์มากที่สุดนั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์สูงถึง 200°C อัตราการไหลเชิงมวล 25 kg/h และปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 16% จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90% โดยประมาณ แสดงดังภาพที่ 59 และข้อมูลตารางภาคผนวกที่ ง4



ภาพที่ 59 แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90%

สำหรับปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบโดยเฉลี่ยนั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 8% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 190°C อัตราการไหลเชิงมวล 25 kg/h โดยประมาณ จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90% แสดงดังภาพที่ 60 และข้อมูลตารางภาคผนวกที่ 5



ภาพที่ 60 แสดงสภาวะทำงานที่เหมาะสมในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ถึง 90%

นอกจากนี้ได้ทำการแสดงข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ถึง 90% ดังตารางภาคผนวกที่ 6 ในกรณีที่อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ อยู่ในช่วงของการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งสามารถหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50% และ 90% ตามลำดับ โดยในขั้นตอนแรกของการทำวิจัยคือ ทำการสำรวจเอกสาร เพื่อทำความเข้าใจของปัญหาในเบื้องต้นก่อน ซึ่งจากการสำรวจเอกสารพบว่า อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์, อัตราการไหลเชิงมวล, ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน, ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณความเข้มข้นของโพรเพน อาจส่งผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

จากนั้นทำการพิจารณาที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ในเบื้องต้นและตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยได้นำหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติเข้ามาช่วยในงานวิจัย ใช้เทคนิคการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน ได้ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่า CO Conversion ได้แก่ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์, อัตราการไหลเชิงมวล, ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนปริมาณความเข้มข้นของโพรเพนสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีผลต่อค่า CO Conversion ซึ่งปัจจัยทั้ง 4 ข้างต้นนี้ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงาน โดยใช้หลักการทดลองแบบ Box-Behnken ได้รูปแบบสมการถดถอยเป็นแบบเส้นตรงคือ $CO\ Conversion\ (\%) = 47.80 + 41.55 * Temp - 9.89 * Flow + 6.83 * O_2 - 19.74 * CO$ ซึ่งสมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 86% และสามารถสรุปผลต่างๆที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. พฤติกรรมและปัจจัยที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะการทำงานต่างๆ

ก. ในช่วงความเร็วรอบคงที่

ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์กับอัตราการไหลเชิงมวลมีอิทธิพลต่อสภาวะการทำงานในช่วงความเร็วรอบคงที่อย่างชัดเจน โดยพฤติกรรมของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (139°C) อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (24 kg/h) ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่มากขึ้น (18%) และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (360 ppm) ช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ถึง 80%

ข. ในช่วงเร่งความเร็ว

ผลกระทบหลักของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองในช่วงเร่งความเร็วมากที่สุด โดยพฤติกรรมของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (173°C) อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (24 kg/h) ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (530 ppm) ช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ถึง 60% โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนไม่มีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion อย่างมีนัยสำคัญ

ค. ในช่วงลดความเร็ว

ผลกระทบหลักของปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองในช่วงลดความเร็วมากที่สุด โดยพฤติกรรมของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ที่มากขึ้น (146°C) ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยลง (440 ppm) อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยลง (23 kg/h) ช่วยให้ค่า CO Conversion เพิ่มขึ้นได้ถึง 50% โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนไม่มีอิทธิพลต่อค่า CO Conversion อย่างมีนัยสำคัญ

2. สถานะทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

ก. กรณีลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50%

อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 180°C สามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50% โดยที่อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วงของการออกแบบการทดลอง และสำหรับปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบโดยเจลี่ยนั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 8% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 154°C โดยประมาณ จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 50%

ข. กรณีลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90%

ในการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่ออกมาสูงสุดในระบบ ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์มากถึง 200°C อัตราการไหลเชิงมวล 25 kg/h และปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 16% และสำหรับปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบโดยเจลี่ยนั้น กำหนดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 8% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm พบว่า ต้องใช้อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเครื่องยนต์ 190°C อัตราการไหลเชิงมวล 25 kg/h โดยประมาณ จึงสามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาลงได้ 90%

ข้อเสนอแนะ

1. การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค่า CO Conversion ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น เนื่องจาก CO Conversion กำลังประสบปัญหาในการกำจัดอยู่แต่ในความเป็นจริงแล้วยังมีมลพิษไอเสียตัวอื่นๆด้วย เช่น ปริมาณไฮโดรคาร์บอน ปริมาณไนโตริกออกไซด์ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจึงควรทำการศึกษาตัวแปรตอบสนองเหล่านี้ด้วย เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการในการลดปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบได้

2. ในการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่า CO Conversion ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ยังมีปัจจัยที่น่าสนใจอีกหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำที่ออกจากเครื่องยนต์ ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น (Deeng *et al.*, 2004) แต่ในการวิจัยในครั้งนี้ไม่สามารถศึกษาปัจจัยนี้ได้เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเก็บรวบรวมข้อมูลและการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ควรหาวิธีการศึกษาปัจจัยที่น่าสนใจเหล่านี้ด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. บริษัท สำนักพิมพ์ ท้อป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปรเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิรัช พานิชวงค์. 2546. การวิเคราะห์การถดถอย. ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- Arrowsmith, D., A. Bott and P. Bush. 2006. Development of a Compact Urea-SCR+CRT System for Heavy-Duty Diesel using a Design of Experiments Approach. **SAE Paper**, 2006-01-0636.
- Deeng, K. D., A. R. Mohamed and S. Bhatia. 2004. Process optimization studies of structured Cu-ZSM-5 zeolite catalyst for the removal of NO using design of experiments (DOE). **Chemical Engineering Journal**. 103: 147-157.
- Grace, T. W. and F. W. Platt. 1981. Subacute poisoning. **Journal of the American Medical Association**. 246: 1698-1700.
- Gulati, S. T. 2006. Ceramic catalyst supports for gasoline fuel, pp. 21-70. In A. Cybulski and J. A. Moulijn., eds. **Structured Catalysts and Reactors**. 2nd Edition. CRC Press. United States of America.
- Health Effects Institute. 2002. Understanding the health effects of components of the particulate matter mix: progress and next steps. Health Effects Institute Perspectives Series. **Health Effects Institute**. Massachusetts.

- Heywood, J.B. 1988. **Internal Combustion Engine Fundamental**. 2nd ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Hurtado, P., S. Ordonez, H. Sastre and F. V. Diez. 2004. Development of a kinetic model for the oxidation of methane over Pd/Al₂O₃ at dry and wet conditions. **Applied Catalysis B**. 51: 229-238
- Koltsakis G. C. and Stamatelos, A. M. “Modeling dynamic phenomena in 3-way catalytic converters”, **Chemical Engineering Science** 54, 1999, 4567-4578
- Koltsakis G. C., Konstantinidis, P.A. and Stamatelos A. M.. “Development and application range of mathematical models for 3-way catalysts”, **Applied Catalysis B. Environmental** 12, 1997, 161-191
- Korakianitis, T., A. M. Namasivayam and R. J. Crookes. 2011. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**. 37: 89-112.
- Montgomery, D. C. 2009. **Design and Analysis of Experiments**. 7th ed. John Wiley and Sons, Inc. Singapore.
- Ronald, M. H. and R. J. Farrauto. 2002. **Catalytic air Pollution Control**. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Semin., Awang Idris and Rosli Abu Bakar. 2009. An Overview of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel and Malaysian Scenario. **European Journal of Scientific Research** (34): 6-15.
- Sjoblom, J., K. Papadakis, and D. Creaser. 2005. Use of experimental design in development of a catalyst system. **Catalysis Today**. 100: 243-248.

Stein, H.J. 1996. Diesel Oxidation Catalysts for Commercial Vehicle Engines: Strategies on Their Application for Controlling Particulate Emissions. **Applied Catalysis B: Environmental** (10): 69-82.

Sumiya, S., H. Oyamada, T. Fujita, K. Nakamura, K. Osumi and Y. Tashiro. 2009. Highly Robust Diesel Oxidation Catalyst for Dual Mode Combustion System. **SAE Technical Paper** 2009-01-0280.

Tan, P. Q., K. Deng and J. X. Lu. 2004. Analysis of particulate matter composition from a heavy-duty diesel engine. **Automobile Engineering**. 218 (11): 1325-1331.

Tan, P. Q., Z. Y. Hu, K. Y. Deng, J. X. Lu, D. M. Lou and G. Wan. 2007. Particulate matter emission modeling based on soot and SOF from direct injection diesel engines. **Energy Conversion and Management**. 48: 510-518.

World Health Organization. 2003. Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Oxide. **World Health Organization Press**. Bonn.

Yang, S., A. M. Valiente, M. B. Gonzalez, I. R. Ramos and A. G. Ruiz. 2000. Methane combustion over supported palladium catalysts I. Reactivity and active phase. **Applied Catalysis B: Environmental**. 28: 223-233.





ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken สำหรับเปรียบเทียบ
ผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง Box-Behnken ใน
เครื่องยนต์ดีเซล

Case	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	O ₂ (%)	CO (ppm)	Experiment	Simulation
1	120	13	200	99	43
2	120	16	600	26	39
3	120	13	1000	12	24
4	120	10	600	15	25
5	185	13	600	99	94
6	185	10	1000	99	92
7	185	10	200	99	94
8	185	13	600	99	94
9	185	16	200	99	96
10	185	13	600	99	94
11	185	16	1000	99	95
12	250	10	600	99	98
13	250	13	1000	99	98
14	250	16	600	99	99
15	250	13	200	99	99

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง Box-Behnken ใน
เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

Case	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	CO (ppm)	O ₂ (%)	Experiment	Simulation
1	120	1000	13	9	24
2	120	4250	16	5	5
3	120	7500	13	2	2
4	120	4250	10	2	3
5	185	1000	10	100	92
6	185	4250	13	19	86
7	185	7500	10	9	72
8	185	4250	13	22	86
9	185	7500	16	12	81
10	185	4250	13	19	86
11	185	1000	16	100	95
12	250	7500	13	100	97
13	250	1000	13	100	98
14	250	4250	10	100	97
15	250	4250	16	100	98

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

แสดงข้อมูลและผลการวิเคราะห์สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น
ด้วยการออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Resolution VI) แบบไม่มีการทำซ้ำ

พ.ศ. ๒๕๕๖

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ
เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงความเร็วคงที่

Temperature (°C)	Flow Rate (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)	CO Conversion (%)
139	24	18	440	344	81
139	24	16	440	2054	78
139	34	18	360	344	77
122	24	16	440	344	43
122	24	18	440	2054	47
139	24	18	360	2054	82
122	34	18	360	2054	50
139	34	18	440	2054	76
122	34	18	440	344	47
122	34	16	440	2054	43
139	34	16	440	344	72
122	24	18	360	344	50
139	34	16	360	2054	73
122	24	16	360	2054	45
139	24	16	360	344	79
122	34	16	360	344	45

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ
เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงเร่งความเร็ว

Temperature (°C)	Flow Rate (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)	CO Conversion (%)
122	93	17	5780	1567	1
122	24	8	530	7533	27
173	24	17	530	7533	94
173	24	8	530	1567	87
173	93	17	530	1567	89
173	93	8	5780	1567	11
173	93	8	530	7533	67
122	93	8	5780	7533	1
173	24	8	5780	7533	56
122	24	17	5780	7533	5
173	93	17	5780	7533	33
122	24	17	530	1567	53
173	24	17	5780	1567	78
122	24	8	5780	1567	2
122	93	17	530	7533	19
122	93	8	530	1567	9

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design (Resolution VI) ของ
เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (DDF) ในช่วงลดความเร็ว

Temperature (°C)	Flow Rate (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)	CO Conversion (%)
146	23	20	6200	445	31
146	23	13	440	445	80
146	47	13	6200	445	7
134	47	13	440	445	46
146	47	13	440	1842	66
146	47	20	440	445	81
134	23	20	6200	1842	11
134	47	20	6200	445	6
134	47	13	6200	1842	3
146	23	13	6200	1842	14
134	23	20	440	445	80
134	47	20	440	1842	63
146	23	20	440	1842	89
134	23	13	440	1842	65
134	23	13	6200	445	6
146	47	20	6200	1842	12



ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบ Box – Behnken

Run	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	200	25	12	3150	92
2	125	25	12	3150	9
3	125	60.5	8	3150	3
4	162.5	25	8	3150	57
5	162.5	96	12	6200	8
6	162.5	60.5	12	3150	41
7	200	60.5	12	6200	88
8	162.5	60.5	16	100	88
9	162.5	60.5	12	3150	41
10	162.5	96	8	3150	14
11	125	96	12	3150	3
12	125	60.5	16	3150	6
13	162.5	25	16	3150	79
14	200	60.5	16	3150	94
15	162.5	25	12	100	55
16	162.5	60.5	8	100	71
17	125	60.5	12	100	32
18	162.5	60.5	8	6200	8
19	162.5	60.5	12	3150	41
20	200	60.5	12	100	96
21	162.5	25	12	6200	50
22	162.5	96	16	3150	35
23	125	60.5	12	6200	2
24	200	60.5	8	3150	89
25	162.5	60.5	16	6200	22
26	200	96	12	3150	92
27	162.5	96	12	100	72



ตารางผนวกที่ ง1 แสดงสถานะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% กรณีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	191	70	8	6,200	50
2	197	94	8	6,200	50
3	190	65	8	6,200	50
4	184	43	8	6,200	50
5	193	80	8	6,200	50
6	192	75	8	6,200	50
7	195	87	8	6,200	50
8	191	72	8	6,200	50
9	197	96	8	6,200	50
10	196	89	8	6,200	50
11	186	51	8	6,200	50
12	185	46	8	6,200	50
13	180	27	8	6,200	50
14	186	50	8	6,200	50
15	188	58	8	6,200	50
16	191	69	8	6,200	50
17	197	95	8	6,200	50
18	185	49	8	6,200	50
19	187	54	8	6,200	50
20	180	25	8	6,187	50
21	197	96	8	6,175	50
22	185	48	8	6,163	50
23	197	95	8	6,200	50
24	180	28	8	6,153	50
25	182	39	9	6,199	50

ตารางผนวกที่ ง2 แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% กรณีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	169	81	8	2,000	50
2	159	41	8	2,000	50
3	167	73	8	2,000	50
4	169	79	8	2,000	50
5	159	40	8	2,000	50
6	158	36	8	2,000	50
7	160	47	8	2,000	50
8	157	33	8	2,000	50
9	158	36	8	2,000	50
10	165	64	8	2,000	50
11	160	44	8	2,000	50
12	161	48	8	2,000	50
13	169	82	8	2,000	50
14	163	56	8	2,000	50
15	172	95	8	2,000	50
16	166	71	8	2,000	50
17	156	29	8	2,000	50
18	161	50	8	2,000	50
19	157	32	8	2,000	50
20	156	28	8	2,000	50
21	155	25	8	2,000	50
22	169	80	8	2,000	50
23	170	86	8	2,000	50
24	159	42	8	2,000	50
25	155	25	8	2,000	50

ตารางผนวกที่ ๓ แสดงสถานะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50% ในกรณีที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และ
ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เปลี่ยนแปลงไป

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	153	60	12	1,218	50
2	173	62	15	5,327	50
3	144	34	12	725	50
4	153	35	9	1,646	50
5	170	73	9	2,668	50
6	174	90	10	2,976	50
7	169	86	15	3,673	50
8	161	32	10	3,439	50
9	154	74	10	290	50
10	154	31	11	2,506	50
11	171	44	15	5,741	50
12	170	88	12	2,962	50
13	170	91	16	3,645	50
14	174	47	15	6,051	50
15	136	32	15	206	50
16	161	45	12	3,041	50
17	158	38	8	2,008	50
18	160	90	12	1,079	50
19	171	40	12	5,119	50
20	141	37	15	1,055	50
21	157	88	11	324	50
22	168	80	16	3,970	50
23	155	50	9	1,295	50
24	173	73	15	4,888	50
25	159	39	11	2,795	50

ตารางผนวกที่ 4 แสดงสถานะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับการลดปริมาณความเข้มข้นของ
คาร์บอนมอนอกไซด์ 6200 ppm

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	200	25	16	6,200	86
2	200	25	16	6,161	87
3	200	27	16	6,200	86
4	200	29	16	6,200	85
5	200	31	16	6,200	85
6	200	34	16	6,197	84
7	200	33	16	6,200	84
8	200	36	16	6,200	83
9	197	25	16	6,189	83
10	200	25	16	6,025	87
11	200	38	16	6,168	83
12	198	34	16	6,200	82
13	200	25	16	6,200	86
14	200	25	16	5,785	89
15	200	44	16	6,200	81
16	200	46	16	6,191	80
17	200	48	16	6,200	80
18	200	50	16	6,200	79
19	200	25	16	5,575	90
20	200	65	16	6,197	75
21	200	72	16	6,200	73
22	200	77	16	6,200	72
23	196	25	16	4,941	90
24	200	89	16	6,200	68
25	200	60	16	5,003	84

ตารางผนวกที่ ๖ แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับการลดปริมาณความเข้มข้นของ
คาร์บอนมอนอกไซด์ 2000 ppm

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	196	46	8	2,000	90
2	198	53	8	2,000	90
3	199	56	8	2,000	90
4	193	31	8	2,000	90
5	193	31	8	2,000	90
6	197	48	8	2,000	90
7	199	56	8	2,000	90
8	193	32	8	2,000	90
9	194	37	8	2,000	90
10	196	46	8	2,000	90
11	194	36	8	2,000	90
12	200	59	8	2,000	90
13	192	28	8	2,000	90
14	194	36	8	2,000	90
15	200	61	8	2,000	90
16	191	25	8	2,000	90
17	194	35	8	2,000	90
18	197	48	8	2,000	90
19	195	40	8	2,022	90
20	191	25	8	2,000	90
21	190	25	8	2,000	89
22	200	71	8	1,651	89
23	189	25	9	2,000	90
24	192	32	8	2,000	90
25	200	66	8	2,000	88

ตารางผนวกที่ ๖ แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการลดปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 90% สำหรับสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน

Number	Temp (°C)	Flow (kg/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO Conversion (%)
1	198	81	10	1,124	90
2	183	43	10	389	90
3	179	63	16	352	90
4	200	91	11	1,376	90
5	188	31	9	1,470	90
6	198	27	12	4,151	90
7	199	84	13	2,200	90
8	196	44	13	3,355	90
9	193	47	13	2,793	90
10	195	88	11	827	90
11	196	68	12	2,044	90
12	200	71	8	1,517	90
13	199	60	9	2,205	90
14	190	80	12	383	90
15	187	67	10	140	90
16	200	71	8	1,538	90
17	196	82	15	2,375	90
18	177	38	13	307	90
19	190	49	15	2,678	90
20	190	28	8	1,689	90
21	199	80	14	2,668	90
22	184	67	13	363	90
23	190	61	13	1,549	90
24	183	27	9	787	90
25	196	84	16	2,236	90

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายชนนศ ลิ้มภูริมงคล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 ตุลาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) พ.ศ. 2552

