

**การสร้างแบบจำลองและออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการลดมลพิษในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงร่วม**  
**A study of various parameters influencing emission reductions in a diesel oxidation catalyst (DOC) of diesel dual fuel engine by using design of experiment (DOE)**

ธเนศ ลิ้มภูริมงคล\* , เอกไท วิโรจน์สกุลชัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
\*ผู้ติดต่อ: E-mail: love\_freedom7@hotmail.com, โทรศัพท์: 02 942 8555 ต่อ 1839

### **บทคัดย่อ**

ปัจจุบันทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง และราคาน้ำมันที่ปรับตัวขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามค้นหาพลังงานทางเลือกอื่นมาใช้ทดแทน ซึ่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ได้มีการคิดค้นการใช้ น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมขึ้น ทำให้สามารถลดการใช้ น้ำมันดีเซลลง แต่มลพิษที่เกิดขึ้นอย่าง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์ในช่วงต่างๆมีระดับสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป โดยเฉพาะสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และหากปล่อยออกมาสู่บรรยากาศจะก่อให้เกิดมลภาวะเรือนกระจกอย่างรุนแรง ดังนั้นการควบคุมการปล่อยมลพิษให้อยู่ภายใต้กฎหมายกำหนดนั้น เป็นที่สนใจของนักวิจัยที่ศึกษาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกลุ่มต่างๆ เป็นอย่างมาก

ในการศึกษานี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งออกแบบการทดลองของระบบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยตามสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ อีกทั้งยังกำหนดและระบุค่าเหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับระบบได้ โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนี้ ในเบื้องต้นได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเพื่อหาค่าคิเนติกส์ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อโมเดล หลังจากนั้นจึงนำแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองไปศึกษาเพื่อดูแนวโน้มปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย จำนวนการทดลอง และระยะเวลาทดลองได้อย่างมาก โดยผลที่ได้พบว่า อัตราการไหล อุณหภูมิ ปริมาณของโพเพน ปริมาณของออกซิเจน และปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีอิทธิพลต่อการเกิดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

**คำหลัก:** เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม, เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา, ก๊าซไอเสียสังเคราะห์, การออกแบบการทดลอง

## **Abstract**

Nowadays, all over the world including Thailand are facing a shortage of fuel and rapid rising oil price. Currently, there are many attempts trying to find alternative fuels to replace fossil fuel usages. For diesel engine, the diesel fuel with natural gas called diesel dual fuel (DDF) is one of the recent techniques many researchers have paid attention to. However, the pollutions from DDF engines especially hydrocarbons and carbon monoxide higher than conventional diesel engines. Therefore, topics on reducing emissions from DDF engines are of great interest in the current research now.

In this study, an experimental design, modeling, and analysis on the catalytic convertor performance of DDF engines are investigated. To study the influence of various factors in reducing pollutions from the DDF engines, boundary conditions were firstly determined based on various exhaust conditions. Then DOE model was created and run in a cycle simulation software packages called AVL BOOST. Kinetic parameters on AVL's aftertreatment model were calibrated based on experiment data. Subsequently, two different DOE techniques have been employed to study the trend factors that relevant to the reduction of pollutions from DDF engines. The result showed that exhaust flow rate, temperature and the concentration of propane, oxygen and carbon monoxide strongly influence the catalytic converter performance.

**Keywords:** Diesel Dual Fuel, Diesel Oxidation Catalyst, Emissions, Design Of Experiment.

## **1. บทนำ**

ในปัจจุบันโลกของเรากำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งสาเหตุมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ออกมาสู่สิ่งแวดล้อม มีการศึกษาพบว่าต้นกำเนิดของก๊าซดังกล่าวส่วนหนึ่ง ถูกปล่อยออกมาจากรถยนต์ ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียอย่างยิ่งต่อสิ่งแวดล้อมของเรา ในปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีที่จะลดปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรือปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีอันตรายน้อยลง นอกจากนี้จะช่วยในเรื่องของสิ่งแวดล้อม ยังสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งมีราคาสูงในปัจจุบันได้อีกด้วย

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม คือเครื่องยนต์ที่นำก๊าซธรรมชาติมาผสมกับอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ แล้วจุดระเบิดด้วยน้ำมันดีเซล ด้วยเทคนิคนี้สามารถลดการใช้ปริมาณน้ำมันดีเซลได้มาก นอกจากนี้มลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมหากมีการปรับแต่งการทำงานของเครื่องยนต์ให้มีการทำงานที่

เหมาะสมจะมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และเขม่าน้อยลง แต่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป [1] หากต้องการลดมลพิษเหล่านี้ได้นั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปหลังเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วย

Diesel Oxidation Catalyst (DOC) เป็นเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยมีสารเร่งปฏิกิริยาช่วยในกระบวนการออกซิเดชันกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่ง DOC ที่ใช้กันทั่วไปมีโครงสร้างเป็นแบบรังผึ้ง โดยประสิทธิภาพของ DOC ในการออกซิไดซ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น อัตราการไหล ชนิดและความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ รวมถึงอุณหภูมิที่สามารถลดปริมาณมลพิษไอเสียลงได้ 50 เปอร์เซ็นต์ (Light-Off Temperature)

ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาตัวนั้นๆ โดยจะเห็นได้ว่า DOC ตัวหนึ่งๆ ถูกออกแบบมาให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งๆ ที่ผู้ผลิตออกแบบมาเท่านั้น ทั้งนี้หากเราต้องการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของ DOC ที่ติดอยู่กับเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งได้ทำการดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม จำเป็นต้องทำการทดลองเป็นจำนวนมากเพื่อทดสอบว่าประสิทธิภาพของ DOC ลูกนั้นๆ เหมาะสมต่อคุณลักษณะของไอเสียทำงาน และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำแนวคิดการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment : DOE) มาใช้ในการพัฒนาและประยุกต์ให้เหมาะกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น Khoo Daw Deeng et al. [2] ได้ทำการทดสอบ Catalyst ชนิดใหม่ๆ เพื่อนำมาลดไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งพบว่า ปริมาณไอเสียและอุณหภูมิมีอิทธิพลสูงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา Duncan et al. [3] ได้ใช้ DOE ในการออกแบบขนาดของหัวฉีดยูเรียที่ฉีดเข้าไปในท่อไอเสียเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการลด (NO) ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยเสียงที่เกิดขึ้นจากการฉีดยูเรียกระทบท่อไอเสียและขนาดของหัวฉีดนั้น ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เสนอแนวทางการออกแบบการทดลองโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองเพื่อสร้างผลทำนาย และศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยตามสภาวะเงื่อนไขที่ส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้

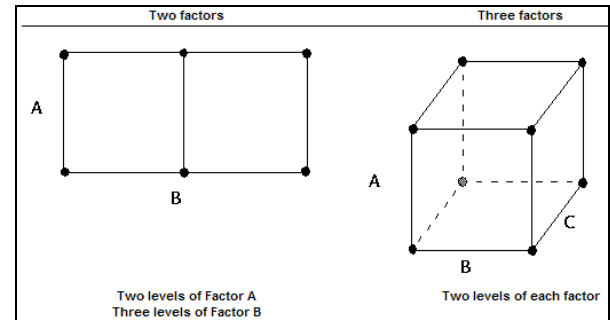
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

#### 2.1.1 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อม

กันได้ ซึ่งรูปที่ 1 แสดงสองและสามปัจจัยการออกแบบ โดยจุดที่อยู่ตรงมุมแสดงถึงค่าระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น การออกแบบสามปัจจัย ในแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับคือ ระดับ "ต่ำ" และ "สูง" ซึ่งจะแทนด้วยเครื่องหมาย "-" และ "+"



รูปที่ 1 การทดลองแฟคทอเรียล

#### 2.1.2 การทดลองแบบ Response Surface

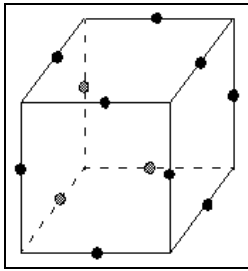
วิธีการหาพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรปัจจัยของกระบวนการที่ทำการทดลอง ซึ่งขั้นตอนนี้มักจะทำหลังจากที่หาได้แล้วว่าปัจจัยใดมีความสำคัญ และต้องการที่จะทำการหาค่าของปัจจัยนั้นที่ทำให้เกิดค่าตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

วิธี Response Surface อาจใช้ในการ

- หาค่าระดับปัจจัย ที่ทำให้ได้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด
- หาค่าระดับปัจจัย ที่สามารถทำให้ทำงานได้ตรงตามข้อกำหนดเฉพาะ
- หาเงื่อนไขปัจจัยในกระบวนการเพื่อให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น
- หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเชิงปริมาณกับตัวแปรตอบสนอง

### 2.1.3 การทดลองแบบ Box-Behnken

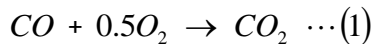
เป็นวิธีการหนึ่งของวิธีการหาพื้นผิวสะท้อน การออกแบบวิธีนี้เป็น การทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับตั้งรูปที่ 2 โดยผลของการออกแบบสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นโค้งได้



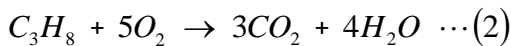
รูปที่ 2 การทดลองแบบ Box-Behnken

### 2.2. สมการเคมี

ในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยานั้น จำเป็นต้องใส่สารเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมีให้เกิดเร็วขึ้น โดยปฏิกิริยาทางเคมี [4,5] อ้างอิงจากทฤษฎีของ Langmuir Hinshelwood ดังสมการเคมี (1) และ (2)



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



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

$$r = \text{Reaction Rate} \left( \frac{kmol}{m^3 s} \right)$$

K = Term in reaction rate equation (variable)

E = Activation temperature of each reaction (K)

T = Temperature of solid (K)

y = Mole fraction of species (-)

### 3. แบบจำลอง

#### 3.1 แบบจำลองโมเดล

แบบจำลองของระบบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม AVL Boost แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นโปรแกรมแก้ปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์ ปัญหาในด้านเทอร์โมไดนามิกส์และปัญหาการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3 แบบจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม AVL Boost

#### 3.2 ลักษณะทางกายภาพ

เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลที่ได้นำมาทดสอบ มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของ DOC

Parameter	Original DOC
Designation	O
CPSI	300
Cell shape	Square
wall thickness (m)	0.0047
Length (m)	0.15
Diameter (m)	0.129
Substrate Volume ( $m^3$ )	0.002
Pt:Pd	1:0
PGM Loading ( $\frac{kg}{m^3}$ )	0.5

#### 3.3 เงื่อนไขการสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองการจำลองนี้ เงื่อนไขของการทดลองอ้างอิงจากช่วงของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อไอเสียในเครื่องยนต์ แสดงดังตารางที่ 2 [6] โดยในการศึกษานี้ได้ใช้  $C_3H_8$  เป็นตัวแทนของ

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ใช่มีเทน (Non Methane Hydrocarbon, NMHC) ที่ออกมาจากไอเสีย อย่างไรก็ตาม ไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นจะมีปริมาณมีเทนรวมอยู่ด้วยในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาผลของการลดมลพิษดังกล่าว โดยคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาการลดปริมาณมีเทนต่อไปในอนาคต

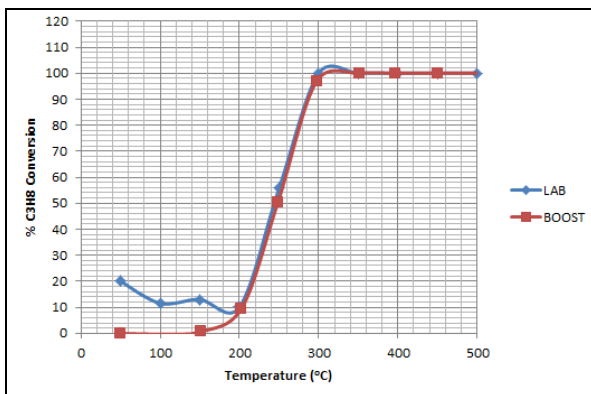
ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตของปัจจัย

Factor	Unit	Low level (-1)	High level (+1)
Flow Rate	$\frac{kg}{h}$	20	35
Temperature	$^{\circ}C$	300	400
CO	%	0.2	0.8
O <sub>2</sub>	%	2	14
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	ppm	2500	10000

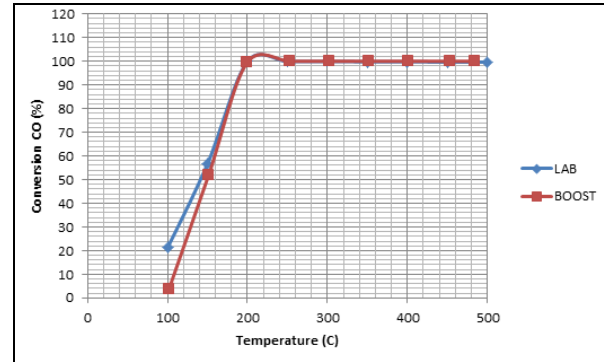
#### 4. ผลของแบบจำลอง

##### 4.1 การเทียบเคียงค่าแบบจำลอง

ในเบื้องต้นได้นำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Light-Off Temperature ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้น ได้ผลดังรูปที่ 4 และ 5 โดยค่าพารามิเตอร์ของก๊าซไอเสียที่เหมาะสมต่อแบบจำลองนั้น แสดงในข้อมูลดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 ค่าเปรียบเทียบของการลดปริมาณโพรเพน



รูปที่ 5 ค่าเปรียบเทียบของการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของก๊าซไอเสียที่สนใจศึกษา

Emissions	$K_1 \left( \frac{kmol \cdot K}{m^2 s} \right)$	$E_1 (deg C)$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	100000000	11800
CO	127037000	11000

#### 4.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ

##### 4.2.1 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล

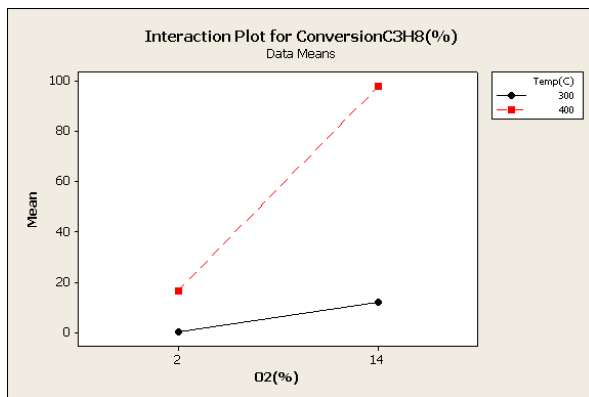
ในการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล ใช้โปรแกรม Minitab แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4 ทำการเลือกปัจจัยที่สนใจศึกษา 5 ตัว โดยแต่ละตัวมี 2 ระดับ ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดเป็น 32 การทดลอง

ตารางที่ 4 การทดลองแฟคทอเรียล

FlowRate(kg/h)	Temp(C)	C3H8(ppm)	CO(%)	O2(%)	ConversionC3H8(%)	ConversionCO(%)
35	400	10000	0.2	2	34.94947	71.19598
35	400	10000	0.8	2	1.66158	6.61114
20	400	10000	0.8	14	98.15973	98.4343
20	300	10000	0.8	2	0.08394	0.40023
20	400	2500	0.2	14	98.34817	99.06916
35	300	2500	0.8	2	0.0467	0.22777
35	300	10000	0.8	2	0.04729	0.2291
35	300	2500	0.2	14	2.49754	11.94258
35	300	10000	0.8	14	0.34272	1.70023
35	400	2500	0.8	14	94.82661	97.52568
20	400	10000	0.8	2	3.58728	13.60306
35	300	2500	0.8	14	0.32823	1.6502
20	300	10000	0.8	14	0.61963	3.08825
20	300	10000	0.2	2	0.55252	2.76402
20	400	2500	0.2	2	27.05806	67.21996
20	300	2500	0.2	2	0.53688	2.67073
20	400	2500	0.8	2	2.969	11.5429
35	400	2500	0.2	2	10.8404	36.05515
35	300	10000	0.2	14	3.34006	15.31596
20	300	2500	0.2	14	5.06093	22.59017
20	300	10000	0.2	14	82.82497	90.34658
35	400	2500	0.8	2	1.52129	6.11429
20	300	2500	0.8	14	0.58996	2.94552
35	400	10000	0.2	14	99.23223	99.42405
35	300	2500	0.2	2	0.30202	1.52659
35	400	10000	0.8	14	98.00829	98.45461
20	400	2500	0.8	14	97.18707	97.91549
20	300	2500	0.8	2	0.08386	0.39819
20	400	10000	0.2	2	49.69939	83.33337
35	300	10000	0.2	2	0.3076	1.55935
35	400	2500	0.2	14	96.71207	98.98661
20	400	10000	0.2	14	99.23284	99.39715

เมื่อระดับปัจจัยสูงขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในการลดปริมาณโพรเพนเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อระดับปัจจัยลดลง ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในการลดปริมาณโพรเพนลดน้อยลง ดังแสดงตามรูปที่ 6 ซึ่งจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นรูปแบบของสมการลำดับที่ 1 (First Order Model) ดังนี้

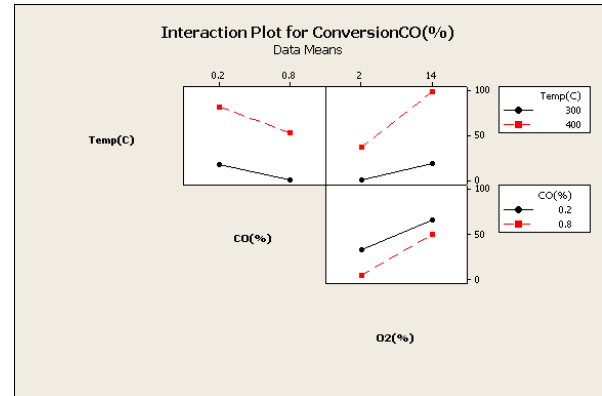
$$\text{Conversion } C_3H_8 (\%) = -88.183 + 0.337 \cdot \text{Temp} - 35.09 \cdot O_2 + 0.097 \cdot \text{Temp} \cdot O_2$$



รูปที่ 6 กราฟอิทธิพลร่วม (Interaction plot) ต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณโพรเพน

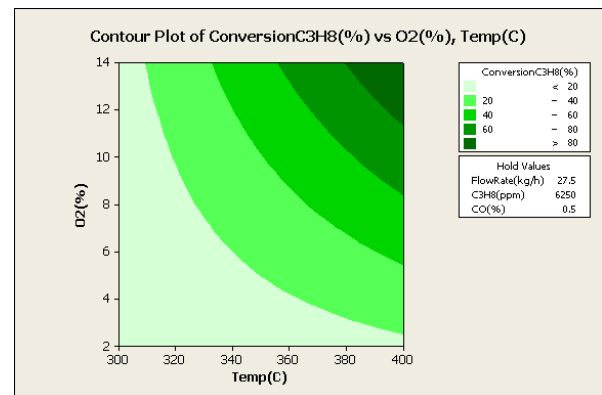
ส่วนประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาในการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกมากับไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิมากขึ้น ปริมาณออกซิเจนมากขึ้น และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง ดังแสดงตามรูปที่ 7 ซึ่งจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นรูปแบบของสมการลำดับที่ 1 (First Order Model) ดังนี้

$$\text{Conversion } CO (\%) = -413.427 + 1.41 \cdot \text{Temp} + 502.01 \cdot CO + 2.15 \cdot O_2 - 1.714 \cdot \text{Temp} \cdot CO - 0.015 \cdot \text{Temp} \cdot O_2 - 26.571 \cdot CO \cdot O_2$$



รูปที่ 7 กราฟอิทธิพลร่วม (Interaction plot) ต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

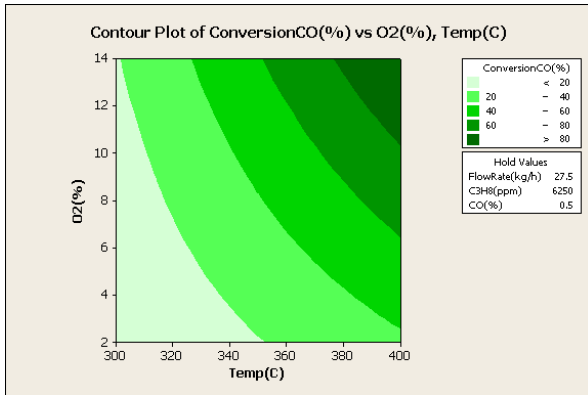
เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณโพรเพนที่ออกมากับไอเสียในเครื่องยนต์อย่างมีนัยสำคัญคือ อุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน โดยพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่ออุณหภูมิคือ 400 °C และปริมาณออกซิเจนคือ 14% หลังจากนั้นนำมาสร้างแผนภาพแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 8



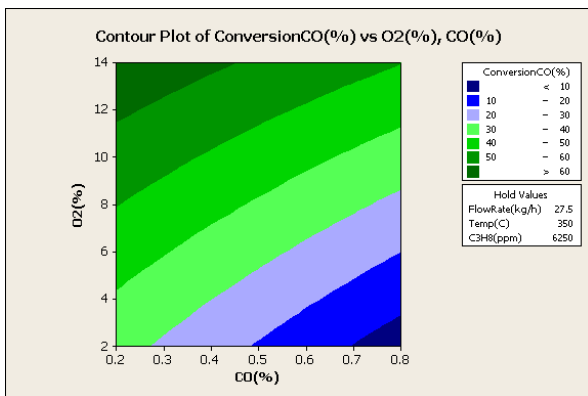
รูปที่ 8 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณโพรเพน

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกมากับไอเสียในเครื่องยนต์อย่างมีนัยสำคัญคือ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยพบว่า ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่ออุณหภูมิคือ 400 °C ออกซิเจน 14% และคาร์บอนมอนอกไซด์ 0.2%

หลังจากนั้นนำมาสร้างแผนภาพแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 10 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์กับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

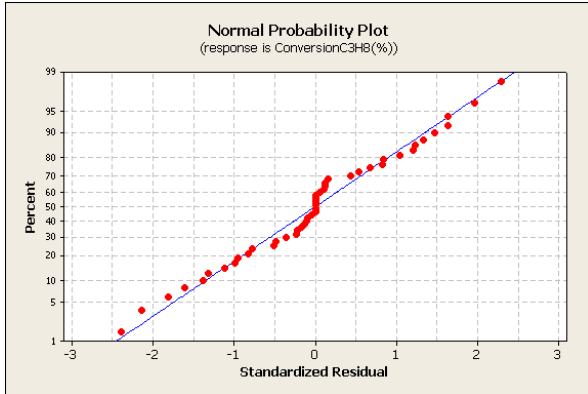
#### 4.2.2 ผลการทดลองแบบ Box-Behnken

การออกแบบการทดลองด้วยพื้นผิวตอบสนอง ใช้โปรแกรม Minitab แสดงข้อมูลดังตารางที่ 5 ทำการเลือกปัจจัยที่สนใจศึกษา 5 ตัว โดยแต่ละตัวมี 2 ระดับ ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดเป็น 46 การทดลอง

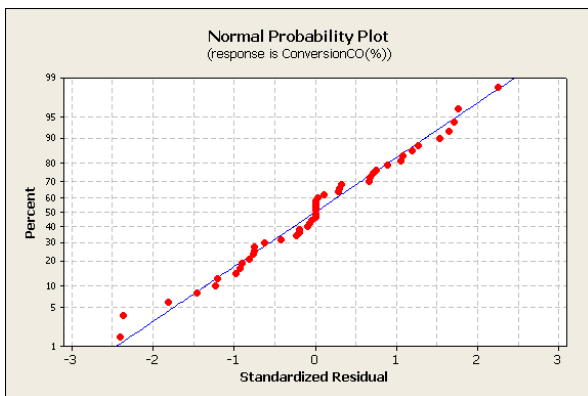
ตารางที่ 5 การทดลองแบบ Box-behnken

FlowRate(kg/h)	Temp(C)	C3H8(ppm)	CO(%)	O2(%)	ConversionC3H8(%)	ConversionCO(%)
27.5	350	10000	0.5	2	0.80319	3.57862
20	350	6250	0.5	14	94.68186	96.26959
27.5	300	10000	0.5	8	0.51726	2.58802
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573
20	350	6250	0.2	8	95.12947	96.90212
27.5	350	6250	0.2	14	96.85597	98.06337
20	350	6250	0.8	8	2.95102	12.41599
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573
35	350	2500	0.5	8	2.97331	12.59648
20	400	6250	0.5	8	97.5088	98.08708
27.5	400	6250	0.5	14	98.42569	98.81644
35	400	6250	0.5	8	96.55954	97.97356
27.5	350	2500	0.5	2	0.76518	3.42324
27.5	350	6250	0.8	14	4.97502	19.74446
27.5	350	2500	0.5	14	14.07736	45.51977
27.5	350	2500	0.8	8	1.75161	7.64313
35	350	6250	0.8	8	1.38738	6.08829
35	300	6250	0.5	8	0.39204	1.97459
27.5	300	6250	0.8	8	0.23899	1.1901
35	350	6250	0.5	14	68.04972	83.42792
27.5	350	10000	0.8	8	2.03801	8.75148
27.5	350	10000	0.2	8	96.03494	97.39044
35	350	6250	0.5	2	0.60576	2.72019
27.5	400	2500	0.5	8	91.75454	97.12219
27.5	350	10000	0.5	14	95.02363	96.65302
27.5	400	6250	0.8	8	94.97087	96.86446
27.5	350	6250	0.2	2	2.61188	11.1799
27.5	300	6250	0.5	14	0.95073	4.71284
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573
20	350	6250	0.5	2	1.10651	4.90221
27.5	400	10000	0.5	8	97.90393	98.36339
27.5	400	6250	0.5	2	5.09623	18.22409
35	350	6250	0.2	8	72.88228	89.70855
27.5	300	2500	0.5	8	0.49472	2.48694
27.5	300	6250	0.2	8	1.8261	8.85266
27.5	400	6250	0.2	8	98.33522	98.90731
20	300	6250	0.5	8	0.71124	3.54498
27.5	350	6250	0.8	2	0.37572	1.88888
35	350	10000	0.5	8	4.07883	16.54329
27.5	300	6250	0.5	2	0.12003	0.60237
20	350	10000	0.5	8	89.8439	93.69668
27.5	350	2500	0.2	8	19.62301	57.74775
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573
20	350	2500	0.5	8	6.84283	26.46367
27.5	350	6250	0.5	8	5.09434	20.30573

เมื่อได้กำหนดระดับการทดลองแล้ว นำระดับปัจจัยดังกล่าวไปทดลองเพื่อรวบรวมและวิเคราะห์ผลสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสม แต่ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการพล็อตกราฟ (Normal Probability Plot) ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง หลังการตรวจสอบพบว่า ข้อมูลของการลดปริมาณโพรเพน และการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ดังแสดงผลตามรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 การแจกแจงแบบปกติของค่า Residual ของ การลดปริมาณโพรเพน



รูปที่ 12 การแจกแจงแบบปกติของค่า Residual ของ การลดปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดูได้จาก ค่า P-value < 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลด ปริมาณโพรเพนที่ออกมากับไอเสียอย่างมีนัยสำคัญ นั้นคือ อัตราการไหล อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ปริมาณโพรเพน และปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ ส่วนปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลด ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกมากับไอเสียอย่างมี นัยสำคัญนั้นคือ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ปริมาณ โพรเพน และปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังแสดงใน รูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์หา ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้ เป็นรูปแบบของสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Conversion } C_3H_8 (\%) &= 1299.02 \\ &- 6.562 \cdot \text{Temp} + 0.013 \cdot C_3H_8 \\ &- 107.118 \cdot CO - 20.855 \cdot O_2 \\ &+ 0.355 \cdot \text{Flowrate}^2 + 0.01 \cdot \text{Temp}^2 \\ &+ 181.577 \cdot CO^2 - 7.28E^{-4} \cdot \text{Flowrate} \cdot C_3H_8 \\ &+ 0.077 \cdot \text{Temp} \cdot O_2 + 0.001 \cdot C_3H_8 \cdot O_2 \\ &- 12.451 \cdot CO \cdot O_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Conversion } CO (\%) &= 806.109 \\ &- 3.895 \cdot \text{Temp} + 0.009 \cdot C_3H_8 - 138.10 \cdot CO \\ &- 15.476 \cdot O_2 + 0.006 \cdot \text{Temp}^2 \\ &+ 148.423 \cdot CO^2 + 0.086 \cdot O_2^2 \\ &+ 0.063 \cdot \text{Temp} \cdot O_2 - 9.559 \cdot CO \cdot O_2 \end{aligned}$$

Analysis of Variance for ConversionC3H8(%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	72253.4	72253.4	3612.7	9.89	0.000
Linear	5	55687.9	55687.9	11137.6	30.48	0.000
FlowRate (kg/h)	1	1257.5	1257.5	1257.5	3.44	0.075
Temp (C)	1	28502.2	28502.2	28502.2	78.01	0.000
C3H8 (ppm)	1	3842.8	3842.8	3842.8	10.52	0.003
CO (%)	1	8770.8	8770.8	8770.8	24.01	0.000
O2 (%)	1	13314.6	13314.6	13314.6	36.44	0.000
Square	5	7367.5	7367.5	1473.5	4.03	0.008
FlowRate (kg/h)*FlowRate (kg/h)	1	1307.5	3485.7	3485.7	9.54	0.005
Temp (C)*Temp (C)	1	3334.6	5094.2	5094.2	13.94	0.001
C3H8 (ppm)*C3H8 (ppm)	1	313.8	1002.9	1002.9	2.75	0.110
CO (%)*CO (%)	1	1935.4	2330.7	2330.7	6.38	0.018
O2 (%)*O2 (%)	1	476.2	476.2	476.2	1.30	0.264
Interaction	10	9198.0	9198.0	919.8	2.52	0.030
FlowRate (kg/h)*Temp (C)	1	0.1	0.1	0.1	0.00	0.987
FlowRate (kg/h)*C3H8 (ppm)	1	1676.7	1676.7	1676.7	4.59	0.042
FlowRate (kg/h)*CO (%)	1	107.0	107.0	107.0	0.29	0.593
FlowRate (kg/h)*O2 (%)	1	170.7	170.7	170.7	0.47	0.501
Temp (C)*C3H8 (ppm)	1	9.4	9.4	9.4	0.03	0.874
Temp (C)*CO (%)	1	0.8	0.8	0.8	0.00	0.963
Temp (C)*O2 (%)	1	2139.0	2139.0	2139.0	5.85	0.023
C3H8 (ppm)*CO (%)	1	1448.8	1448.8	1448.8	3.97	0.057
C3H8 (ppm)*O2 (%)	1	1636.5	1636.5	1636.5	4.48	0.044
CO (%)*O2 (%)	1	2009.0	2009.0	2009.0	5.50	0.027

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลด ปริมาณโพรเพน

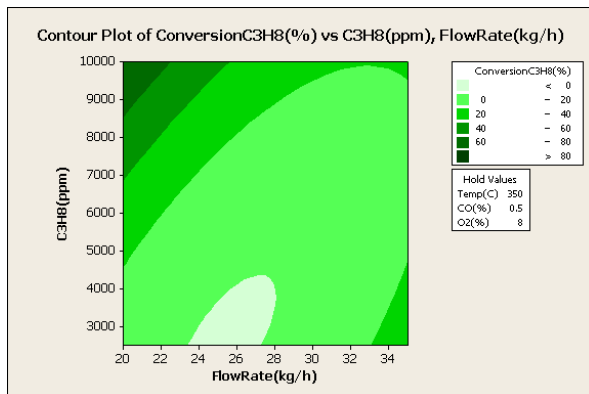
Analysis of Variance for ConversionCO(%)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	65718.5	65718.5	3285.9	9.38	0.000
Linear	5	57040.5	57040.5	11408.1	32.57	0.000
FlowRate (kg/h)	1	918.8	918.8	918.8	2.62	0.118
Temp (C)	1	28815.6	28815.6	28815.6	82.26	0.000
C3H8 (ppm)	1	1692.6	1692.6	1692.6	4.83	0.037
CO (%)	1	10219.6	10219.6	10219.6	29.18	0.000
O2 (%)	1	15393.8	15393.8	15393.8	43.95	0.000
Square	5	3994.7	3994.7	798.9	2.28	0.077
FlowRate (kg/h)*FlowRate (kg/h)	1	983.0	2198.8	2198.8	6.28	0.019
Temp (C)*Temp (C)	1	1061.7	1921.8	1921.8	5.49	0.027
C3H8 (ppm)*C3H8 (ppm)	1	390.0	839.9	839.9	2.40	0.134
CO (%)*CO (%)	1	1475.7	1557.3	1557.3	4.45	0.045
O2 (%)*O2 (%)	1	84.2	84.2	84.2	0.24	0.628
Interaction	10	4683.4	4683.4	468.3	1.34	0.265
FlowRate (kg/h)*Temp (C)	1	0.5	0.5	0.5	0.00	0.969
FlowRate (kg/h)*C3H8 (ppm)	1	1001.3	1001.3	1001.3	2.86	0.103
FlowRate (kg/h)*CO (%)	1	0.2	0.2	0.2	0.00	0.982
FlowRate (kg/h)*O2 (%)	1	28.4	28.4	28.4	0.08	0.778
Temp (C)*C3H8 (ppm)	1	0.3	0.3	0.3	0.00	0.976
Temp (C)*CO (%)	1	7.9	7.9	7.9	0.02	0.882
Temp (C)*O2 (%)	1	1439.5	1439.5	1439.5	4.11	0.053
C3H8 (ppm)*CO (%)	1	371.2	371.2	371.2	1.06	0.313
C3H8 (ppm)*O2 (%)	1	649.8	649.8	649.8	1.85	0.185
CO (%)*O2 (%)	1	1184.3	1184.3	1184.3	3.38	0.078

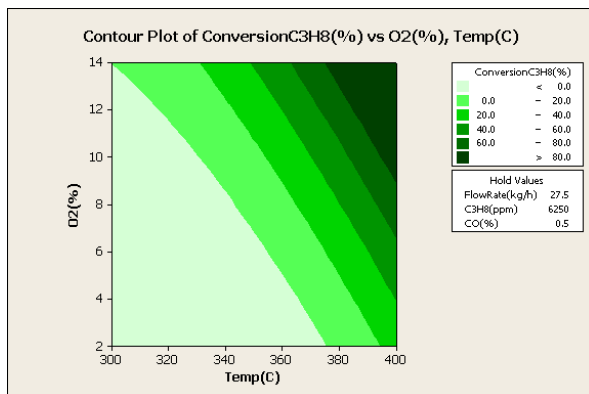
รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลด ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์



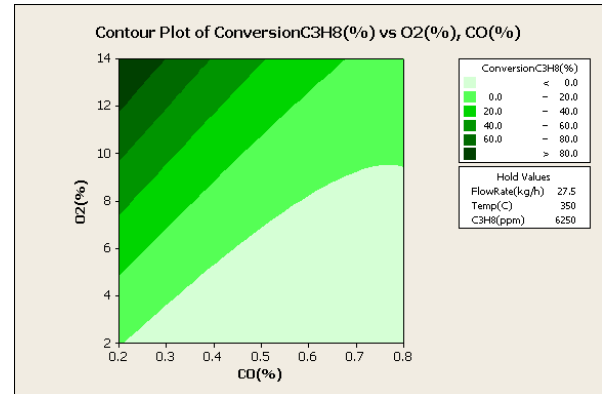
เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตปริมาณโพเพนที่ออกมากับไอเสียอย่างมีนัยสำคัญพบว่า เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ปริมาณออกซิเจนมากขึ้น และปริมาณโพเพนมากขึ้น แต่อัตราการไหลน้อยลง และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง จะทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมาก ดังแสดงตามรูปที่ 15, 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอัตราการไหลกับปริมาณโพเพนต่อการลดปริมาณโพเพน

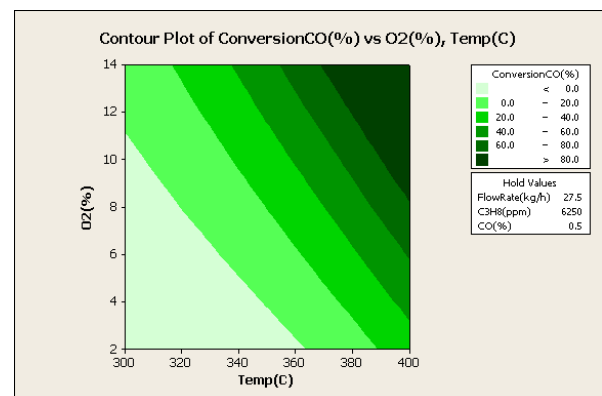


รูปที่ 16 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณโพเพน

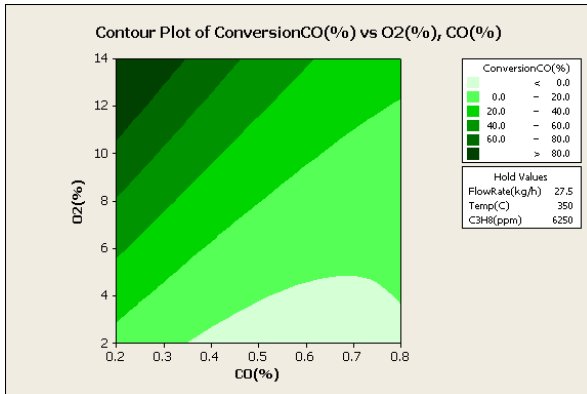


รูปที่ 17 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์กับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณโพเพน

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกมากับไอเสียอย่างมีนัยสำคัญพบว่า เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น และปริมาณออกซิเจนมากขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง จะทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมาก ดังแสดงตามรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ



รูปที่ 18 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 19 กราฟแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์กับปริมาณออกซิเจนต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

### 4.3 ตรวจสอบผลที่ได้

ตารางที่ 6 ผลจากการสอบเทียบ

Boundary Condition		Mintab		AVL Boost	
Temperature (C)	O2 (%)	ConversionC3H8(%)	ConversionCO(%)	ConversionC3H8(%)	ConversionCO(%)
320	4	< 20	< 20	0.545	2.591
340	10	< 20	< 40	4.286	17.772
380	4	< 20	20 - 40	7.27	26.223
380	12	> 60	> 60	96.983	97.917

หลังจากนำผลทำนายมาเทียบเคียงแบบจำลอง แสดงข้อมูลดังตารางที่ 6 พบว่า ผลวิเคราะห์ที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบของสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model) จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดลองแบบ Box – Behnken มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากกว่าการทดลองแบบแฟคทอเรียล แต่ทั้งนี้ผลที่ได้อาจไม่อยู่ในทุกโซน เนื่องจากการออกแบบการทดลองเป็นเพียงการทำนายเพื่อดูแนวโน้มที่อาจเกิดขึ้นเท่านั้น ไม่ได้เกิดจากการเก็บค่าทุกการทดลองจริง

### 5. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติ ออกแบบการทดลองพร้อมทั้งทำการสร้างแบบจำลองของระบบเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยตามสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ โดยผลที่ได้มีลักษณะดังต่อไปนี้

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณโพรเพนที่ออกมาคือไอเสียอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ปริมาณออกซิเจนมากขึ้น และปริมาณโพรเพนมากขึ้น แต่อัตราการไหลน้อยลง และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง จะทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีประสิทธิภาพมาก

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกมาคือไอเสียอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น และปริมาณออกซิเจนมากขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง จะทำให้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีประสิทธิภาพมาก

- ความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างค่าปัจจัยกับค่าตอบสนองนั้น มีลักษณะเป็นรูปแบบของสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model) ซึ่งค่าเหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะเงื่อนไขในงานวิจัยนี้ คืออุณหภูมิ 400 °C ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน 14% และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 0.2%

## 6. เอกสารอ้างอิง

### 6.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Hountalas D.T. and Papagiannakis R.G., "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas", Energy Conversion and Management, 2004.
- [2] Khoo Daw Deeng, Abdul Rahman Mohamed, Subhash Bhatia, "Process optimization studies of structured Cu-ZSM-5 zeolite catalyst for the removal of NO using design of experiments (DOE)", Chemical Engineering Journal, 2004.
- [3] Arrowsmith. D., Bott. A., and Bush. P., "Development of a Compact Urea-SCR+CRT System for Heavy-Duty Diesel using a Design of Experiments Approach", SAE International, 2006-01-0636, 2006.

- [4] Koltsakis G. C. and Stamatelos, A. M. "Modeling dynamic phenomena in 3-way catalytic converters", *Chemical Engineering Science* 54, 1999, 4567-4578
- [5] 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
- [6] Noipeng A., Waitayapat N., Aroonsrisopon T. and Wirojsakunchai E., "*Experimental Investigation of Applying Raw Fuel Injection Technique for Reducing Methane in Aftertreatment of Diesel Dual Fuel Engines Operating under Medium Load Conditions*", *JSAE* 20119131, 2011.

## 6.2 หนังสือ

- [1] Heywood, J.B. "*Internal Combustion Engine Fundamentals*", McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [2] Douglas C. Montgomery. "*Design and Analysis of Experiments*", John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [3] Ronald M. Heck and Robert J. Farrauto. "*Catalytic air Pollution Control*", John Wiley & Sons, Inc. 2002.
- [4] G.E.P. Box, W.G. Hunter, and J.S. Hunter (1978). "*Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*". New York: John Wiley & Sons.