

การปรับปรุงการเผาไหม้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้ก๊าซโอโซนช่วยในการเผาไหม้

อนุรักษ์ ปิติรักษสกุล* เบญจรัตน์ ผ่องสว่าง ศิริยากร ทามาตร และ ปิ่นสุภา ปิติรักษสกุล**

*รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8247 อีเมล : anurak.p@eng.kmutnb.ac.th

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง: Pinsupha@gmail.com

รับเมื่อ

ตอบรับเมื่อ

DOI:

King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

All Rights Reserved

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเติมโอโซนในปฏิกิริยาเผาไหม้ที่มีผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้และความเร็วการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่หัวเผาไหม้ ในการทดลองการเผาไหม้ชนิดทดสอบประกอบด้วยถังบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว ป้อนลม เครื่องกำเนิดโอโซนและหัวเผาไหม้ โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะถูกลดความดันให้เหมาะสมแล้วผสมเข้ากับอากาศและก๊าซโอโซนก่อนที่จะเข้าสู่หัวเผาไหม้ซึ่งออกแบบเป็นชนิดสล็อตสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3x25 มิลลิเมตร โดยการทดลองในส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนสมมูล (Φ) 6.31 ในระบบที่ไม่มีโอโซนและมีโอโซนในช่วงความเข้มข้นโอโซนที่ 0 ถึง 1,000 mg/hr ผลการทดลองพบว่าหากไม่มีการป้อนก๊าซโอโซน อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 705.5 °C และมีความเร็วในการเผาไหม้เท่ากับ และ 0.043 cm/s ส่วนที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 mg/hr ให้ค่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่ 885.5 °C และความเร็วในการเผาไหม้ 0.082 cm/s การทดลองในส่วนที่สองเป็นการเผาไหม้โดยลด Φ จาก 6.31 เป็น 3.31 โดยทดสอบการเผาไหม้ที่ไม่มีโอโซนและที่มีการป้อนโอโซนจนถึงความเข้มข้น 1,000 mg/hr พบว่าเมื่อไม่ใส่โอโซนจะให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 705.5 และ 790.8 °C ตามลำดับ แต่เมื่อมีการเติมโอโซนที่ 1,000 mg/hr อุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 890 °C ทั้งที่ Φ 6.31 และ 3.31 และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเผาไหม้กับความเข้มข้นของโอโซนแสดงเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 1,000 mg/hr

คำสำคัญ : การเผาไหม้, โอโซน, ความเร็วในการเผาไหม้, อัตราส่วนสมมูล

The combustion enhancement of LPG by ozone addition

Anurak Petiraksakul* Benjarat Pongsawang Siriyakron Thamat and Pinsupha Petiraksakul**

*Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 8247, E-mail: anurak.p@eng.kmutnb.ac.th

**Associate professor, Department of Material Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand

Received ; Accepted

DOI: King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved

Abstract

The purpose of this research was to study the effects of ozone addition in a combustion system on burning temperature and velocity of flame. The combustion system is consisted of a liquefied petroleum gas (LPG) container, an air pump, an ozone generator and a nozzle. The LPG was regulated using a pressure regulator and it was mixed with air and ozone gases before passing through the nozzle. The combustion nozzle was designed as a slot burner which size was 3x25 millimeter. The experiment of the first part is an experiment to compare the combustion efficiency with and without ozone gas in the concentration range of 0–1,000 mg/hr at the equivalence ratio of 6.311. Without the ozone gas, the highest of burning temperature and velocity are 705.5°C and 0.043 cm/s, respectively, while the combustion with ozone concentration of 1,000 mg/hr showed the highest temperature of 885.5°C and the burning velocity of 0.082 cm/s. In the second part, two equivalence ratios (Φ), namely 6.31 and 3.31, were performed under specific condition with and without ozone addition up to 1,000 mg/hr. The reduction of the Φ from 6.311 to 3.313 provided the highest temperature increasing from 705.5 to 790.8°C without ozone addition, respectively, and the highest temperature was nearly the same around 890°C with ozone concentration of 1,000 mg/hr. The burning velocity shows a linear equation with ozone concentration and the reduction of the Φ give the increasing of the burning velocity for the ozone concentration range of 0-1,000 mg/hr.

Keywords: combustion, ozone, burning velocity, equivalence ratio

1. บทนำ

พลังงานเป็นทรัพยากรที่สำคัญในการดำรงชีพของมนุษย์ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นงานวิจัยที่สำคัญเพื่อให้ยังคงมีแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้ยาวนานขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของภาคครัวเรือนและในการผลิตของภาคอุตสาหกรรม พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ยังคงเป็นการใช้พลังงานที่มากที่สุด เช่น การเกิดปฏิกิริยาสันดาปภายในเครื่องยนต์ การเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) เป็นต้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิไดเซอร์ (oxidizer) ซึ่งส่วนใหญ่คือออกซิเจนในอากาศ ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_xH_y ด้วยออกซิเจน ถ้าปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์จะได้ CO_2 และ H_2O และการคายความร้อนจากปฏิกิริยา ตามสมการ(1)



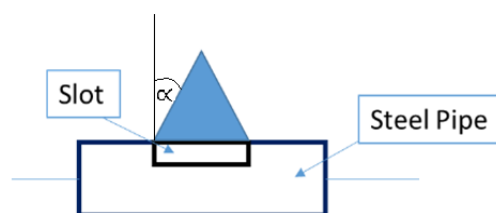
การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถเพิ่มได้หลายวิธี ได้แก่ การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air/fuel ratio) ให้เหมาะสม การใช้ออกซิเจนที่เข้มข้นหรือการใช้สารออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาได้รุนแรงกว่าออกซิเจน เช่น โอโซนเข้าร่วมในการเกิดปฏิกิริยา [1-2] เป็นต้น รายงานผลการวิจัย [1] ใช้โอโซนที่ 8,500 ppm ช่วยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ $H_2/CO/N_2$ ที่อัตราส่วน 15%/15%/70% โดยปริมาตร พบว่าโอโซนช่วยเพิ่มค่าความเร็วในการเผาไหม้ (burning velocity) โดยให้ค่าเพิ่มขึ้น 18.74% เมื่ออัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ) เท่ากับ 0.7 และมีค่าเพิ่มขึ้น 15.78% เมื่ออัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 2.0 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมโอโซน [1] เทอมอัตราส่วนสมมูลมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาพอดี (stoichiometry) พหารด้วยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจริง ตามสมการ (2)

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoi}}{(A/F)_{actual}} \quad (2)$$

(ค่าอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่า 1 เรียกอีกอย่างว่า A/F ratio on lean side หมายถึงอากาศมีปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิง เมื่อเทียบที่อัตราส่วนที่ stoichiometry และ ค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1 เรียกอีกอย่างว่า A/F ratio on rich side หมายถึงอากาศมีปริมาณน้อยกว่าเชื้อเพลิงเมื่อเทียบที่อัตราส่วนที่ stoichiometry) ความเร็วในการเผาไหม้เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ การขยายตัวของก๊าซร้อนและการคายความร้อนของปฏิกิริยา ถ้ามีค่ามากแสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาดีและการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะมีความปั่นป่วน (turbulent) ที่มากขึ้นส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ในการหาค่าความเร็วในการเผาไหม้มีหลายวิธีวิธี เช่น วิธีฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux method) [2] คำนวณจากรูปร่างการขยายตัวของเปลว (expanding flame configuration) [3] และการวัดโดยใช้หัวเผาไหม้แบบสล็อต (slot burner) [4, 5] ซึ่งวิธีหลังจะสะดวกและง่ายกว่า โดย ความเร็วในการเผาไหม้ผ่านหัวเผาไหม้แบบสล็อตสามารถคำนวณได้ตามสมการ (3)

$$U_B = u \sin \alpha \quad (3)$$

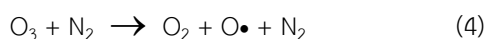
โดย U_B คือความเร็วในการเผาไหม้ (cm/s) u คือความเร็วเฉลี่ยของก๊าซผสมที่ไหลผ่านสล็อต (cm/s) และ α คือมุมของเปลวที่วัดในแนวดิ่ง แสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวัดมุมของเปลวเพื่อหาค่ามุม α

นอกจากความเร็วในการเผาไหม้แล้วอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟในสภาวะคงตัวเป็นอีกตัวชี้วัดหนึ่งว่าปฏิกิริยาเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้นหรือไม่ เมื่อมีการเพิ่มโอโซนเข้าร่วมในการเผาไหม้ ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน 1 โมลจะแตก

ตัวให้ออกซิเจน 1.5 โมล และคายความร้อน 34 kcal/mol [6] อีกทั้งโอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และอินเตอมีเดียท (intermediate) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เช่น มีเทน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น [2] การเติมโอโซนยังส่งผลให้เปลวไฟมีความเสถียร (flame stability) มากขึ้น นอกจากนี้โอโซนเกิดการแตกตัวเป็นออกซิเจนแล้วยังอาจเกิดปฏิกิริยากับไนโตรเจน ดังนี้



จากปฏิกิริยาตามสมการ (4) จะพบว่าจำนวนโมลรวมทางขวามือของสมการมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าถ้าโอโซนมีการแตกตัวจะส่งผลให้ปริมาตรของก๊าซและปริมาณก๊าซร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ย่อมส่งผลต่อความเร็วในการเผาไหม้ให้มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยพิจารณาจากผลของการเติมก๊าซโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน ลักษณะและสีของเปลวไฟ และความเร็วของการเผาไหม้ โดยศึกษาการเผาไหม้ระหว่างก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และอากาศที่มีและไม่มีก๊าซโอโซนผสม ซึ่งได้ติดตั้งระบบผสมอากาศกับก๊าซโอโซนและก๊าซปิโตรเลียมเหลวก่อนที่ก๊าซผสมจะไหลเข้าสู่หัวเผาไหม้แบบสล็อต ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

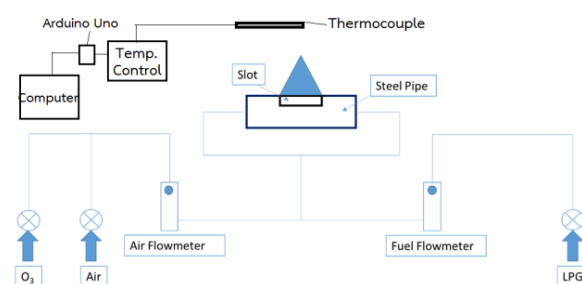
2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ เครื่องทดสอบการเผาไหม้แสดงตามรูปที่ 2 ประกอบด้วยถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ขนาดบรรจุ 5 kg พร้อมอุปกรณ์ปรับแรงดันเพื่อลดแรงดันก๊าซ LPG (ปตท., ประเทศไทย) ก่อนไหลผ่านโรตารีมิเตอร์ (Dwyer, USA) และผสมกับก๊าซโอโซนและอากาศ (การวัดอัตราการไหลของก๊าซ LPG จะทำการสอบเทียบกับการใช้หลักแทนที่น้ำในกระบอกวัดปริมาตรและจับเวลา) เครื่องผลิตโอโซน (ECONOWATT EZG gas 1000, Thailand) ใช้หลักการ

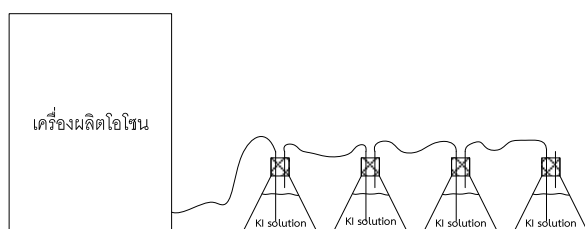
โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) [7] ผลิตก๊าซโอโซนจากอากาศที่ความเข้มข้นสูงสุด 1,000 mg/h โดยสามารถปรับความเข้มข้นโอโซนได้ครั้งละ 200 mg/h ในการทดลองได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนโดยการทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ เครื่องเป่าลม (HIBLOW HP200, Japan) จะป้อนอากาศเข้ามาผสมกับก๊าซโอโซนก่อนไหลผ่านโรตารีมิเตอร์ (Dwyer® RMB-53D-SSV-air, USA) เข้าผสมกับก๊าซ LPG จากนั้นก๊าซผสมจะไหลเข้าหัวเผาไหม้ที่ออกแบบเป็นสล็อตสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3x25 mm. ส่วนชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K และ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Monitoring and Control) (MAX THERMO® MC-2438, Taiwan) ซึ่งจะส่งสัญญาณเข้าบอร์ดอาร์ดูโน (Arduino Uno) และคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 วินาที ในการทดลองแต่ละครั้งจะลดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำ

การตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซโอโซนใช้หลักการดูดซับโอโซนด้วยสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI) 1% ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (เตรียมโดยผสมโพแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) 13.61 กรัม ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (disodium hydrogen phosphate, Na_2HPO_4) 14.20 กรัม และ โพแตสเซียมไอโอไดด์ 10.00 กรัมเข้าด้วยกันแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรในขวดวัดปริมาตร ถ่ายใส่ขวดสีชา และตั้งทิ้งไว้ 1 วันในที่มืด ก่อนนำสารละลายไปใช้งาน



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเผาไหม้

ในการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซโอโซนจะใช้ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) 4 ขวดมาต่อเรียงกันแบบอนุกรม โดยที่ด้านบนของขวดจะติดตั้งท่อนำก๊าซ 2 ท่อ ท่อยาวและท่อสั้นที่เสียบผ่านจุกยาง เติมสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ 1% ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้าในขวดรูปชมพู่ โดยให้หลอดแก้วยาวจุ่มในสารละลายให้อุ่นเครื่องผลิตก๊าซโอโซนโดยให้ก๊าซไหลออกเข้าสู่ตู้ดูดควัน (fume hood) เมื่อแน่ใจว่าเครื่องผลิตโอโซนทำงานคงที่ให้ต่อท่อจ่ายก๊าซเข้ากับขวดรูปชมพู่ ให้ก๊าซโอโซนไหลเข้าสู่ขวดรูปชมพู่ แสดงตามรูปที่ 3 พร้อมทั้งจับเวลา 1-3 นาที แล้วแต่ความเข้มข้นโอโซนที่ตรวจวัด เมื่อหยุดเครื่องแล้วให้นำขวดรูปชมพู่ขวดสุดท้ายมาตรวจวัดค่าไอโอดีน ต้องไม่พบการเกิดปฏิกิริยา (สีของสารละลายจะใสเนื่องจากไม่เกิดไอโอดีน) จึงนำสารละลายทั้ง 3 ขวดที่เหลือไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 352 nm เทียบกับกราฟมาตรฐานของ Standard Iodine Solution 0.025M



รูปที่ 3 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซน

2.2 การทดสอบการเผาไหม้

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเผาไหม้จะติดตั้งในตู้ดูดควัน ก่อนทดลองทุกครั้งจะเปิดเครื่องผลิตโอโซน โดยทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที ยกเว้นการทดลองที่ไม่ใช้ก๊าซโอโซน อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องโอโซนคงที่ที่ 3.3 L/min ทุกการทดลอง อากาศในส่วนนี้จะผ่านเข้าเครื่องผลิตโอโซน (ในกรณีที่ไม่มีโอโซนยังคงเปิดให้ป้อนลมของเครื่องทำงานแต่ไม่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าหน่วยผลิตโอโซน ส่วนในกรณีที่มีการจ่ายโอโซนจะปรับให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องตามคู่มือ

การใช้งาน [7]) และอัตราการไหลของอากาศที่ผสมกับก๊าซโอโซนจะตรวจวัดค่าที่โรตาริเตอร์ก่อนผสมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) (โดยสมมติว่าความเข้มข้นของโอโซนในการทดลองไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอากาศที่ผสมกับก๊าซโอโซน และสอบเทียบอัตราการไหลด้วยวิธีแทนที่น้ำในกระบอกตวงและจับเวลา) ก๊าซLPG ก่อนใช้งานจะเปิดทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างอากาศ โอโซนกับก๊าซ LPG จากนั้นทำการจุดไฟที่บริเวณรูสล็อต สังเกตสีของเปลวไฟและทำการบันทึกภาพนำเทอมัลคัมเปิลวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ โดยทำการติดตั้งเทอมัลคัมเปิลเหนือรูสล็อตขึ้นไปเป็นระยะ 3 เซนติเมตร ตรงกึ่งกลางสล็อต ค่าอุณหภูมิจะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ ความเร็วในการเผาไหม้คำนวณตามสมการ (3) โดยมุมของเปลว (α) หาค่าจากค่าเฉลี่ยการวัดมุมจากภาพถ่ายหยุดนิ่งในขณะทดลอง

3.ผลการทดลอง

3.1 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อลักษณะของเปลวไฟ

เมื่อป้อนก๊าซ LPG ที่อัตราการไหล 0.52 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 L/min. A/F ratio actual 2.46 โดยมวล และอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 6.31 ที่ความเข้มข้นโอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 mg/h ได้ลักษณะเปลวไฟ ดังรูปที่ 4 พบว่าเมื่อไม่เติมโอโซนเปลวไฟมีลักษณะสีฟ้าด้านล่างและมีสีส้มแดงด้านบน เนื่องจากที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทดสอบนี้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี (A/F ratio = 15.5 สำหรับก๊าซ LPG ที่มีอัตราส่วนโพเทน 0.4% และบิวเทน 0.6% โดยโมล) หรือกล่าวอีกนัยคือที่สภาวะนี้มีการป้อนเชื้อเพลิงในระบบมากกว่าอากาศ เมื่อมีการป้อนโอโซนเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าสีส้มแดงของเปลวไฟจะค่อยๆลดลงและความสูงเปลวไฟลดลงด้วยเช่นกัน โดยสีแดงของเปลวไฟลดลงจนสังเกตไม่พบที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 mg/h แสดงว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้นเมื่อป้อนโอโซนมากขึ้น แต่เนื่องจากที่สภาวะอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 6.31 นี้ ปริมาณอากาศมีสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณอากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดี (stoichiometry) มาก รูปร่างของเปลวไฟพบว่าไม่มีความ

เสถียรมีลักษณะที่ไม่คงตัว สังเกตพบว่าบริเวณด้านบนของเปลวมีการสับัดขึ้นลงเป็นระยะ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวกับเวลาที่ความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหลก๊าซ LPG 0.52 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 L/min. A/F ratio actual 2.46 %wt และอัตราส่วนสมมูล 6.31

เมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 แสดงตามรูปที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนสีส้มแดงของเปลวไฟจะลดลงจนหายไป เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนความสูงเปลวไฟยังคงมีแนวโน้มลดลง ลักษณะของเปลวค่อนข้างสมมาตร มีความเสถียรมากกว่าที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 สีส้มแดงของเปลวไฟตรงขอบเฉพาะกรณีที่ไม่มีการป้อนก๊าซโอโซน บริเวณด้านบนของเปลวไฟ มีการสับัดไปมาเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 mg/h เปลวมีสีฟ้าค่อนข้างเสถียร สรุปได้ว่าการเพิ่มโอโซนเข้าร่วมในการเผาไหม้เพียงเล็กน้อย จะช่วยเสริมให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก โดยที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ผลที่ชัดเจนกว่าที่ อัตราส่วนสมมูล 6.31

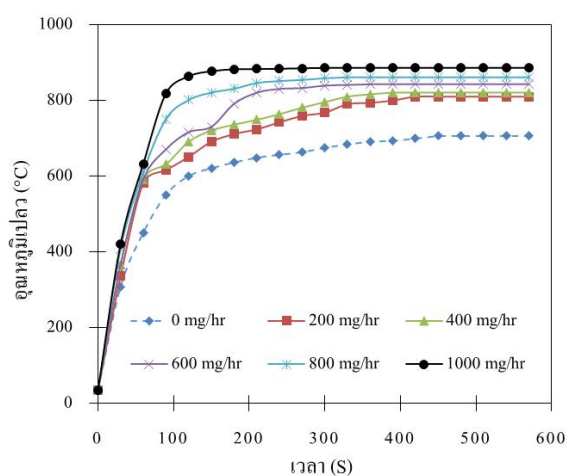


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวกับเวลาที่ความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหล

ก๊าซ LPG 0.34 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 13.0 L/min. A/F ratio actual 4.68 %wt และอัตราส่วนสมมูล 3.31

3.2 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลวไฟ

เมื่อป้อนก๊าซ LPG ที่อัตราการไหล 0.52 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 L/min. A/F ratio actual 2.46 โดยมวล และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 6.31 ที่ความเข้มข้นโอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 mg/h แสดงผลดังรูปที่ 6 โดยช่วงเวลา 0-300 วินาที จะเป็นช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลามากกว่า 300 วินาทีเป็นต้นไป พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเปลวเพิ่มสูงขึ้นและกราฟเข้าสู่ช่วงคงที่เร็วขึ้น ในสถานะที่มีการเผาไหม้ร่วมกับก๊าซโอโซนเพียงเล็กน้อยส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก๊าซร้อนที่สถานะคงตัวสูงขึ้นประมาณร้อยละ 14 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนเป็น 200 mg/h

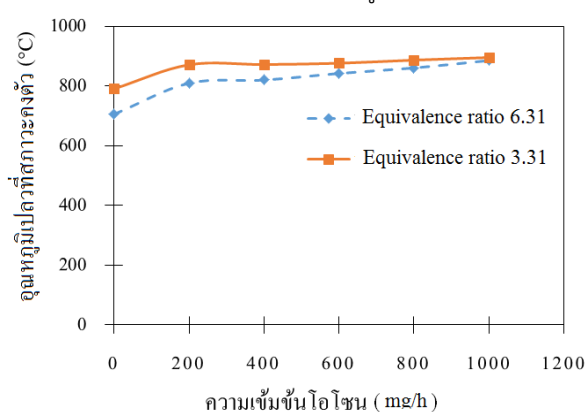


รูปที่ 6 อุณหภูมิเปลวกับเวลาที่ความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหลก๊าซ LPG 0.52 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 L/min. A/F ratio actual 2.46 %wt และอัตราส่วนสมมูล 6.31

3.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลวไฟและความเร็วในการเผาไหม้

เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 โดยปรับอัตราการป้อนก๊าซ LPG ที่ 0.52 L/min. อัตราการไหลของ

อากาศและโอโซน 10.5 L/min. หรือ A/F ratio actual 2.46 โดยมีมวล เป็นอัตราการป้อนก๊าซ LPG ที่ 0.34 L/min. อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 13.0 L/min. A/F ratio actual 4.68 โดยมีมวล ที่ความเข้มข้นโอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 mg/h โดยนำค่าอุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวมาเขียนกราฟแสดงผลดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 อุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 มีค่าสูงกว่าที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำ และมีแนวโน้มให้ค่าอุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวที่ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 mg/h ในกรณีที่ยังไม่เติมโอโซน พบว่าผลต่างของอุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวให้ผลที่ต่างกันมากที่สุด ทั้งนี้เกิดจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยสุทธิที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 จะน้อยกว่าที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ทำให้ปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 เกิดขึ้นมากกว่า ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาสุทธิจึงน้อยกว่าย่อมส่งผลให้อุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเกิดจากพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศที่ผสมก๊าซโอโซน การทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีกลไกที่ซับซ้อน แต่ผลการศึกษาที่ผ่านมา [6] พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมากและมีการคายพลังงานสูง



รูปที่ 7 อุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวกับความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31

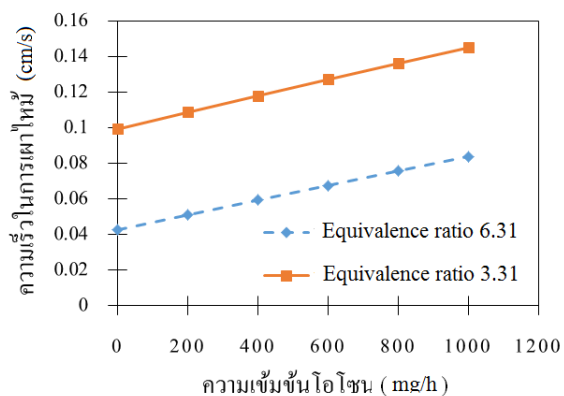
เมื่อคำนวณความเร็วในการเผาไหม้ตามสมการ (3) และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงผลดังรูปที่ 8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเผาไหม้กับความเข้มข้นโอโซนเป็นเส้นตรง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานของ

Liang และคณะ [1] โดยเมื่อความเข้มข้นโอโซนเพิ่มขึ้นความเร็วในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นและจากปฏิกิริยาตามสมการ (4) พบว่าจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์รวมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าก๊าซมีการขยายตัวนั่นเอง และงานวิจัยของ Wang และคณะ [2] ซึ่งทดลองใช้โอโซนกับการเผาไหม้มีเทนให้ผลสรุปว่าโอโซนที่ 7,000 ppm สามารถเพิ่มความเร็วในการเผาไหม้ขึ้นร้อยละ 9.8 และ 9.0 ที่อัตราส่วนสมมูล 1.4 และ 1.45 ตามลำดับ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเผาไหม้และความเข้มข้นโอโซนมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เช่นเดียวกับผลการทดลองนี้ รายงานของ Wang และคณะ [2] ยังสรุปว่าเมื่อลดความเข้มข้นโอโซนลงมาที่ 3,730 ppm ความเร็วในการเผาไหม้ลดเหลือประมาณร้อยละ 8

รูปที่ 8 เมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 ความเร็วในการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นทั้งในกรณีที่เติมโอโซนและไม่ได้เติมโอโซน เนื่องจากปฏิกิริยาที่ทำปฏิกิริยาพอดี (stoichiometry) จะให้ค่าความเร็วในการเผาไหม้สูงสุดและมีค่าลดลงทั้งกรณีที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าต่ำกว่า 1 (A/F ratio on lean side) และ อัตราส่วนสมมูลมีค่าสูงกว่า 1 (A/F ratio on rich side) ในงานวิจัยก่อนหน้าที่ทดลองกับเชื้อเพลิงหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน มีเทน เอทานอล บิวทานอล เป็นต้น ให้ผลว่าบริเวณที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าประมาณ 1 จะให้ค่าความเร็วในการเผาไหม้สูงสุด [7, 8] เนื่องจากสภาวะที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าต่ำกว่า 1 (lean side) การเกิดปฏิกิริยาถึงจะสมบูรณ์แต่ต้องเสียความร้อนสัมผัสไปกับกระแสอากาศที่เข้ามาช่วยในการเผาไหม้ ในขณะที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าสูงกว่า 1 (rich side) ความเร็วในการเผาไหม้จะลดลงเนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้จึงเกิดไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ตามสมการ $Y = aX + b$ โดยที่ a คือค่าความชัน และ b คือจุดตัดแกน พบว่า ความชันทั้งสองอัตราส่วนสมมูลให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนจุดตัดแกนที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ค่าสูงกว่าอัตราส่วนสมมูล 6.31

ประมาณ 2 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน [8, 9]



รูปที่ 8 ความเร็วในการเผาไหม้กับความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31

ตารางที่ 1 ค่าคงที่จากการทำ linear regression ระหว่างความเร็วในการเผาไหม้กับความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31

อัตราส่วนสมมูล (-)	a	b	R ²
3.31	4.58E-5	0.0994	0.99
6.31	4.12E-5	0.0426	1.0

4.อภิปรายและสรุป

4.1 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อลักษณะของเปลวไฟและอุณหภูมิเปลว

โอโซนช่วยให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้สมบูรณ์ขึ้น โดยลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนสีเปลวไฟจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมส้มมาเป็นสีฟ้า และที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 (เข้าใกล้ 1) ลักษณะของเปลวไฟและสีของเปลวไฟมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตอย่างใกล้ชิดพร้อมกับภาพถ่าย พบว่าทั้งสีเปลวและความสูงเปลวมีขนาดที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซน

อัตราส่วนสมมูล 6.31 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สภาวะคงตัวที่ให้ค่าเฉลี่ย 705.5 °C และมีความเร็วในการเผาไหม้เท่ากับ และ 0.043 cm/s ส่วนที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000

mg/hr ให้ค่าอุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ยที่ 885.5 °C และความเร็วในการเผาไหม้ 0.082 cm/s ดังนั้นการเพิ่มโอโซนเข้าไปในระบบเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูลนี้ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.5 และความเร็วการเผาไหม้เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 95

4.2 ผลของการลดอัตราส่วนสมมูล

การลดลงของอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น โดยรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะพบว่าสีของเปลวไฟจะมีโซนสีส้มที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำแสดงว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไม่มีการป้อนโอโซนที่อัตราส่วนสมมูลทั้งสองให้เปลวสีฟ้าอมส้มอย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนไปที่ 1,000 mg/h ที่อัตราส่วนสมมูลทั้งสองให้ลักษณะของเปลวที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 ที่ไม่มีการป้อนโอโซน พบว่าอุณหภูมิเปลวที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 705.5 เป็น 790.8 °C แต่เมื่อมีการเติมโอโซนที่ 1,000 mg/hr อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดมีแนวโน้มให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมีค่าประมาณ 890 °C ทั้งที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31 ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นและความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเผาไหม้กับความเข้มข้นของโอโซนแสดงเป็นแบบเชิงเส้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ บริษัท ไทยเอ็นเนอร์ยี่คอนเซอร์เวชั่น จำกัด สำหรับเครื่องผลิตโอโซน

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Liang, Z. Wang, W. Weng, Z. Zhou, Z. Huang, J. Zhou, K. Cen "Study of ozone-enhanced combustion in H₂/CO/N₂/air premixed flames by laminar burning velocity measurements

- and kinetic modeling” *International Journal of hydrogen energy*, Vol. 38, pp. 1177 -1188, 2013.
- [2] Z.H. Wang, L. Yang, B. Li b, Z.S. Li, Z.W. Sun, M. Alden, K.F. Cen, A.A. Konnov, “Investigation of combustion enhancement by ozone additive in CH₄/air flames using direct laminar burning velocity measurements and kinetic simulations” *Combustion and Flame*, Vol.159, pp. 120–129, 2012.
- [3] E. Varea, J. Beeckmann, H. Pitsch, Z. Chen, B. Renou, “Determination of burning velocities from spherically expanding H₂/air flames” *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.35, pp. 711–719, 2015.
- [4] T. Boushaki, Y. Dhué, L. Selle, B. Ferret, T. Poinsot “Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: Experimental and numerical analysis” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 9412-9422, 2012.
- [5] J. Buffam, K. Cox, H. Schiess “Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner”, A Major Qualifying Project, Faculty of the Worcester Polytechnic Institute, USA, 2008, [Online] cited on 27 Sep. 2019 at https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042308-085413/unrestricted/Laminar_Burning_Velocity_of_Methane-Air_Mixtures.pdf
- [6] W. Sun, X. Gao, B. Wu, T. Ombrello “The effect of ozone addition on combustion: Kinetics and dynamics” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.73, pp. 1–25, 2019.
- [7] Operation Manual of Ozone Generator, Thai Energy Conservation Co.,LTD.
- [8] G. Broustail, P. Seers, F. Halter, G. Moréac, C. Mounaim-Rousselle, “Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends” *Fuel*, Vol.90, pp. 1–6, 2011.
- [9] K. Coudoro, N. Chaumeix, B. Ahmed, C-E Paillard “Laminar flame velocities and fundamental properties for two methane based mixtures: G27 and G22” 23rd ICDERS, July 24-29, 2011, Irvine, USA, cited on 27/9/2019 at <http://www.icders.org/ICDERS2011/Papers/ICDERS2011/ICDERS2011-0215.pdf>.