



การปรับปรุงการเผาไหม้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้ก๊าซไอโซนช่วยในการเผาไหม้

อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล* เบญจรัตน์ ผ่องสว่าง และ ศิริยากร ทามาตร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 8247 อีเมล: anurak.p@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.05.001

รับเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2562 แก้ไขเมื่อ 9 ธันวาคม 2562 ตอรับเมื่อ 20 ธันวาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 1 พฤษภาคม 2563

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเติมไอโซนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้และความเร็วการเผาไหม้ ในการทดลองการเผาไหม้นี้ชุดทดสอบประกอบด้วยถังบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว ป้อนลม เครื่องกำเนิดไอโซน และหัวเผาไหม้ โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะถูกลดความดันแล้วผสมเข้ากับอากาศ และก๊าซไอโซนก่อนที่จะเข้าสู่หัวเผาไหม้ ซึ่งออกแบบเป็นชนิดสล็อตสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3x25 ตารางมิลลิเมตร โดยการทดลองในส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) 6.31 ในระบบที่มีไอโซนและไม่มีไอโซน ในช่วงความเข้มข้นไอโซนที่ 0 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า หากไม่มีการป้อนไอโซน อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 705.5 องศาเซลเซียส และมีความเร็วการเผาไหม้เท่ากับ 0.043 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนที่ความเข้มข้นไอโซน 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ให้ค่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่ 885.5 องศาเซลเซียส และความเร็วการเผาไหม้ 0.082 เซนติเมตรต่อวินาที การทดลองในส่วนที่สองเป็นการเผาไหม้โดยลด Φ จาก 6.31 เป็น 3.31 โดยทดสอบการเผาไหม้ที่ไม่มีไอโซนและที่มีการป้อนไอโซน จนถึงความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง พบว่า เมื่อไม่มีไอโซนจะให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 705.5 และ 790.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่เมื่อมีการเติมไอโซนที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 890 องศาเซลเซียส ทั้งที่ Φ 6.31 และ 3.31 และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเผาไหม้กับความเข้มข้นของไอโซนแสดงเป็นแบบเชิงเส้น โดยเมื่อ Φ มีค่าลดลงความเร็วการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

คำสำคัญ: การเผาไหม้ ไอโซน ความเร็วการเผาไหม้ อัตราส่วนสมมูล



The Combustion Enhancement of Liquefied Petroleum Gas by Ozone Addition

Anurak Petiraksakul*, Benjarat Pongsawang and Siriyakron Thamat

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

Pinsupha Petiraksakul

Department of Material Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 8247, E-mail: anurak.p@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.05.001

Received 20 November 2019; Revised 9 December 2019; Accepted 20 December 2019; Published online: 1 May 2020

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

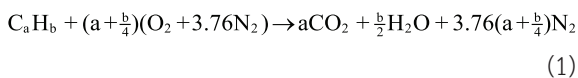
Abstract

The purpose of this research was to study the effects of ozone addition on combustion mechanism concerning burning temperature and velocity of flame. The combustion system was 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 gas before passing through the nozzle designed as a slot burner, having the slot dimension of 3 mm x 25 mm. In the first part, the experiment was intended 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 6.31. Without the ozone gas, the maximum burning temperature and maximum flame burning velocity were 705.5°C and 0.043 cm/s, respectively. Alternatively, 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. 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 in the second part. The reduction of the Φ from 6.31 to 3.31 provided the greatest temperature increase 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 showed a linear equation with ozone concentration and the reduction of the Φ gave an increase in burning velocity for the ozone concentration range of 0–1,000 mg/hr.

Keywords: Combustion, Ozone, Burning Velocity, Equivalence Ratio

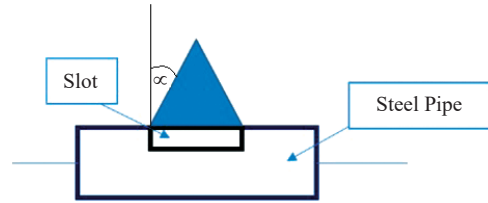
1. บทนำ

พลังงานเป็นทรัพยากรที่สำคัญในการดำรงชีพของมนุษย์ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นงานวิจัยที่สำคัญ เพื่อให้ยังคงมีแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้ยาวนานขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของภาคครัวเรือนและภาคการผลิตของอุตสาหกรรม พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนยังคงเป็นการใช้พลังงานที่มากที่สุด เช่น การเกิดปฏิกิริยาสันดาปภายในเครื่องยนต์ การเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) เป็นต้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ซึ่งส่วนใหญ่ คือออกซิเจนในอากาศ เช่น การเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_xH_y ด้วยออกซิเจน ถ้าปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์จะได้ CO_2 และ H_2O และการคายความร้อนจากปฏิกิริยา ตามสมการที่ (1)



การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถเพิ่มได้หลายวิธี เช่น การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air/Fuel Ratio) ให้เหมาะสม การใช้ออกซิเจนที่เข้มข้น หรือการใช้สารออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาได้รุนแรงกว่าออกซิเจน เช่น โอโซน [1], [2] รายงานผลการวิจัย การใช้โอโซนที่ 8,500 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสังเคราะห์ในสัดส่วน $H_2:CO:N_2$ เท่ากับ 15:15:70 โดยปริมาตร [1] พบว่า โอโซนช่วยเพิ่มค่าความเร็วการเผาไหม้ โดยให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.74 เมื่ออัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio; Φ) เท่ากับ 0.7 และมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.78 เมื่ออัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 2.0 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมโอโซน [1] เทอมอัตราส่วนสมมูลมีนิยามว่าเป็น อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาพอดี (Stoichiometry) ทหารด้วยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจริง ตามสมการที่ (2)

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



รูปที่ 1 การวัดมุมของเปลวไฟเพื่อหาค่ามุม α

(ค่าอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่า 1 เรียกอีกอย่างว่า A/F Ratio on Lean Side หมายถึงอากาศมีปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนที่ Stoichiometry และค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1 เรียกอีกอย่างว่า A/F Ratio on Rich Side หมายถึงอากาศมีปริมาณน้อยกว่าเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนที่ Stoichiometry) ความเร็วการเผาไหม้เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ การขยายตัวของก๊าซร้อนและการคายความร้อนของปฏิกิริยา ถ้ามีค่ามากแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาได้ดีและการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะมีความปั่นป่วน (Turbulent) มากขึ้น ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

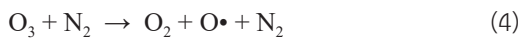
การหาค่าความเร็วการเผาไหม้มีหลายวิธี เช่น วิธีฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Method) [2] คำนวณจากรูปร่างการขยายตัวของเปลวไฟ (Expanding Flame Configuration) [3] และการวัดโดยใช้หัวเผาไหม้แบบสล็อต (Slot Burner) [4], [5] ซึ่งวิธีหลังจะสะดวกและง่ายกว่า ซึ่งความเร็วการเผาไหม้ผ่านหัวเผาไหม้แบบสล็อตสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

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

โดย U_B คือ ความเร็วการเผาไหม้ (เซนติเมตรต่อวินาที) u คือ ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซผสมที่ไหลผ่านสล็อต (เซนติเมตรต่อวินาที) และ α คือ มุมของเปลวไฟที่วัดในแนวตั้ง แสดงตามรูปที่ 1

นอกจากความเร็วการเผาไหม้แล้วอุณหภูมิของเปลวไฟในสภาวะคงตัวเป็นอีกตัวชี้วัดหนึ่งว่าปฏิกิริยาเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้นหรือไม่ เมื่อมีการเพิ่มโอโซนเข้าร่วมในการเผาไหม้ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน 1 โมล จะแตกตัวให้ออกซิเจน

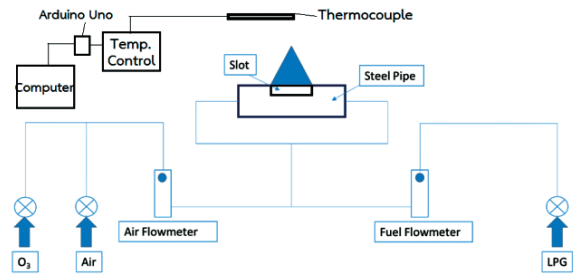
1.5 โมล และคายความร้อน 34 กิโลแคลอรีต่อโมล [6] อีกทั้งโอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอินเตอร์มีเดียท (Intermediate) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เช่น มีเทน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น การเติมโอโซนยังส่งผลให้เปลวไฟมีความเสถียร (Flame Stability) มากขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น นอกจากโอโซนเกิดการแตกตัวเป็นออกซิเจนแล้วโอโซนยังอาจเกิดปฏิกิริยากับไนโตรเจน [2] ดังนี้



จากปฏิกิริยาตามสมการที่ (4) จะพบว่า จำนวนโมลรวมทางขวามือของสมการมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าถ้าโอโซนมีการแตกตัวจะส่งผลให้ปริมาตรของก๊าซ และปริมาณก๊าซร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ย่อมส่งผลต่อความเร็วการเผาไหม้ให้มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากสารออกซิไดเซอร์แล้วความเร็วการเผาไหม้ยังขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิง การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์ ซึ่งทั้งหมดส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้นั่นเอง

ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 [7] มีการใช้อยู่ที่ระดับ 6,338 พันตัน ใช้ในภาคครัวเรือนเป็นก๊าซหุงต้มร้อยละ 34 ในภาคขนส่งร้อยละ 21 ที่เหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมพบว่า ก๊าซปิโตรเลียมเหลวประมาณ 3,500 พันตัน ถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดเซอร์ที่ดีมาก จัดหาง่าย และมีสถานะเป็นก๊าซ ซึ่งผสมได้ดีกับอากาศ โดยงานวิจัยจะพิจารณาผลของการเติมก๊าซโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน ลักษณะและสีของเปลวไฟ และความเร็วการเผาไหม้โดยศึกษาการเผาไหม้ระหว่างก๊าซปิโตรเลียมเหลวและอากาศที่มีและไม่มีก๊าซโอโซนผสม ซึ่งได้ติดตั้งระบบผสมอากาศกับก๊าซโอโซนและก๊าซปิโตรเลียมเหลวก่อนที่ก๊าซผสมจะไหลเข้าสู่หัวเผาไหม้แบบสล็อต ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเผาไหม้

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ เครื่องทดสอบการเผาไหม้แสดงตามรูปที่ 2 ประกอบด้วยถังก๊าซปิโตรเลียมเหลวขนาดบรรจุ 5 กิโลกรัม พร้อมอุปกรณ์ปรับแรงดันเพื่อลดแรงดัน ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ปตท., ประเทศไทย) ก่อนไหลผ่านโรตารีมิเตอร์ (Dwyer, USA) และผสมกับก๊าซโอโซนและอากาศ (การวัดอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว จะทำการสอบเทียบกับการใช้หลักแทนที่น้ำในกระบอกวัดปริมาตรและจับเวลา) เครื่องผลิตโอโซน (ECONOWATT EZG gas 1000, Thailand) ใช้หลักการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) [8] สามารถผลิตก๊าซโอโซนจากอากาศที่ความเข้มข้นสูงสุด 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยสามารถปรับความเข้มข้นโอโซนได้ครั้งละ 200 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนโดยการทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียม ไอโอดัด เครื่องปั๊มลม (HIBLOW HP200, Japan) จะป้อนอากาศเข้ามาผสมกับก๊าซโอโซนก่อนไหลผ่านโรตารีมิเตอร์ (Dwyer, RMB-53D-SSV-air, USA) เข้าผสมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว จากนั้นก๊าซผสมจะไหลเข้าหัวเผาไหม้ที่ออกแบบเป็นสล็อตสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3x25 ตารางมิลลิเมตร ส่วนชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิประกอบด้วยเทอร์มิสเตอร์ชนิด K และ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Monitoring and Control) (MAX THERMO, MC-2438, Taiwan) ซึ่งจะส่งสัญญาณเข้าบอร์ดอาร์ดูอิโน (Arduino Uno) และคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิอย่าง

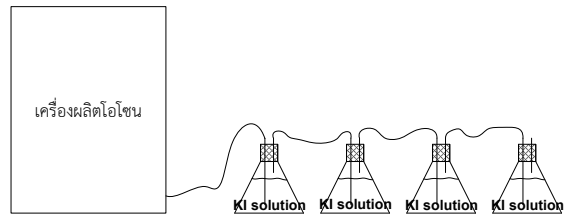
ต่อเนืองทุกๆ 1 วินาที ในการทดลองแต่ละครั้งจะลดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำ

การตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซไอโซนใช้หลักการดูดซับไอโซนด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide; KI) ร้อยละ 1 ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.1 โมลาร์ (เตรียมโดยผสมโพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen Phosphate; KH_2PO_4) 13.61 กรัม ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Phosphate; Na_2HPO_4) 14.20 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 10.00 กรัม เข้าด้วยกันแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรในขวดวัดปริมาตร ถ่ายสารละลายลงในขวดสีชา และตั้งทิ้งไว้ 1 วัน ในที่มีดก่อนนำสารละลายไปใช้งาน

ในการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซไอโซนจะใช้ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) 4 ขวด มาต่อเรียงกันแบบอนุกรม โดยที่ด้านบนของขวดจะติดตั้งท่อนำก๊าซ 2 ท่อ ประกอบด้วยท่อยาวและท่อสั้นที่เสียบผ่านจุกยาง เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 1 ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.1 โมลาร์ ในขวดรูปชมพู่ โดยให้หลอดแก้วยาวจุ่มในสารละลายให้อุ่นเครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยให้ก๊าซไหลทิ้งที่ตู้ดูดควัน (Fume Hood) เมื่อแน่ใจว่าเครื่องผลิตไอโซนทำงานคงที่ให้ต่อท่อจ่ายก๊าซเข้ากับขวดรูปชมพู่ ให้ก๊าซไอโซนไหลเข้าสู่ขวดรูปชมพู่ แสดงตามรูปที่ 3 พร้อมทั้งจับเวลา 1–3 นาที แล้วแต่ความเข้มข้นไอโซนที่ตรวจวัด เมื่อหยุดเครื่องแล้วให้นำขวดรูปชมพู่ขวดสุดท้ายมาตรวจวัดค่าไอโอดีนต้องไม่พบการเกิดปฏิกิริยา (สีของสารละลายจะใสเนื่องจากไม่เกิดไอโอดีน) จึงนำสารละลายทั้ง 3 ขวดที่เหลือมารวมกันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร และเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Standard Iodine Solution ที่ 0.025 โมลาร์

2.2 การทดสอบการเผาไหม้

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการเผาไหม้จะติดตั้งในตู้ดูดควัน ก่อนทดลองทุกครั้งจะเปิดเครื่องผลิตไอโซน โดยทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที ยกเว้นการทดลองที่ไม่ใช้ก๊าซไอโซน อัตราการไหล



รูปที่ 3 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไอโซน

ของอากาศที่ผ่านเครื่องไอโซนคงที่ที่ 3.3 ลิตรต่อนาที ทุกการทดลอง อากาศในส่วนนี้จะผ่านเข้าเครื่องผลิตไอโซน (ในกรณีที่ไม่มีไอโซนยังคงเปิดให้ปั๊มลมของเครื่องทำงานแต่ไม่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าหน่วยผลิตไอโซน ส่วนในกรณีที่มีการจ่ายไอโซนจะปรับให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องตามคู่มือการใช้งาน [8]) และอัตราการไหลของอากาศที่ผสมกับก๊าซไอโซนจะตรวจวัดค่าที่โรตาริเตอร์ก่อนผสมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (โดยสมมติว่าความเข้มข้นของไอโซนในการทดลองไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอากาศที่ผสมกับก๊าซไอโซน และสอบเทียบอัตราการไหลด้วยวิธีแทนที่น้ำในกระบอกตวงและจับเวลา) ก๊าซปิโตรเลียมเหลวก่อนใช้งานจะเปิดทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างอากาศ ไอโซนกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว จากนั้นทำการจุดไฟที่บริเวณรูสล็อต สังเกตสีของเปลวไฟ และทำการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ นำเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเหนือรูสล็อตขึ้นไปเป็นระยะ 3 เซนติเมตร ตรงกึ่งกลางสล็อต ค่าอุณหภูมิจะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ ความเร็วการเผาไหม้คำนวณตามสมการที่ (3) โดยมุมของเปลวไฟ (α) หาค่าจากค่าเฉลี่ยการวัดมุมจากภาพถ่ายหยุดนิ่งในขณะทดลอง โดยใช้ไม้บรรทัดวัดมุม

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของความเข้มข้นไอโซนต่อลักษณะของเปลวไฟ

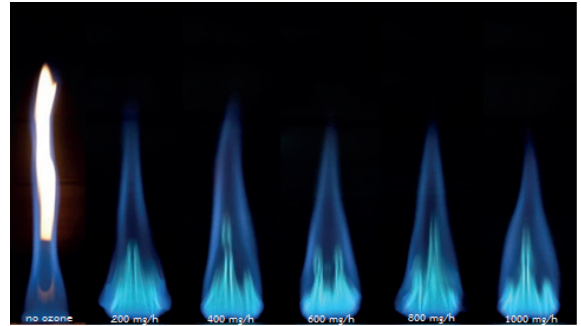
เมื่อป้อนก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่อัตราการไหล 0.52 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศและไอโซน 10.5 ลิตรต่อนาที A/F Ratio Actual 2.46 โดยมวล และอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 6.31 ที่ความเข้มข้นไอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ได้ลักษณะเปลวไฟ ดังรูปที่ 4 พบว่า เมื่อ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับเวลาที่ความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.52 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 ลิตรต่อนาที A/F Ratio Actual ร้อยละ 2.46 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนสมมูล 6.31

ไม่เติมโอโซนเปลวไฟมีลักษณะสีฟ้าด้านล่าง และมีสีส้มแดงด้านบน เนื่องจากที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทดสอบนี้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี (A/F Ratio = 15.5 สำหรับก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่มีอัตราส่วนโพรเพนร้อยละ 0.4 และบิวเทน ร้อยละ 0.6 โดยโมล) หรือกล่าวอีกนัยคือ ที่สภาวะนี้มีการป้อนเชื้อเพลิงในระบบมากกว่าอากาศ เมื่อมีการป้อนโอโซนเพิ่มมากขึ้นจะพบว่า สีส้มแดงของเปลวไฟจะค่อยๆ ลดลงและความสูงเปลวไฟก็ลดลงด้วยเช่นกัน โดยสีแดงของเปลวไฟลดลงจนสังเกตไม่พบที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง แสดงว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้นเมื่อป้อนโอโซนมากขึ้น แต่เนื่องจากที่สภาวะอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 6.31 นี้ ปริมาณอากาศมีสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณอากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดี (Stoichiometry) มาก รูปร่างของเปลวไฟพบว่า ไม่มีความเสถียรมีลักษณะที่ไม่คงตัว สังเกตพบว่า บริเวณด้านบนของเปลวไฟมีการสับดับขึ้นลงเป็นระยะ

เมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 แสดงตามรูปที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนสีส้มแดงของเปลวไฟจะลดลงจนหายไป เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนความสูง

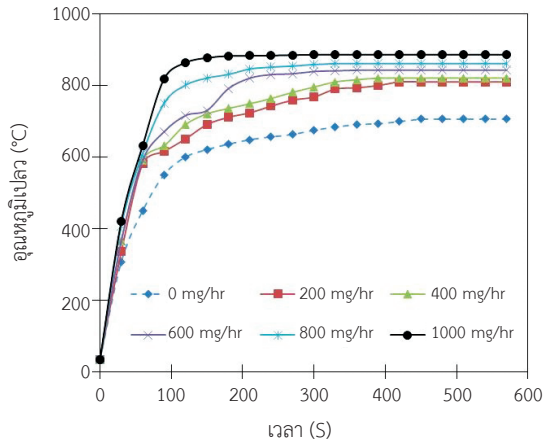


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับเวลาที่ความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.34 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 13.0 ลิตรต่อนาที A/F Ratio Actual ร้อยละ 4.68 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนสมมูล 3.31

เปลวไฟยังคงมีแนวโน้มลดลง ลักษณะของเปลวไฟค่อนข้างสมมาตร มีความเสถียรมากกว่าที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 สีส้มแดงของเปลวไฟตรวจพบเฉพาะกรณีที่ไม่มีการป้อนก๊าซโอโซน บริเวณด้านบนของเปลวไฟ มีการสับดับไปมาเพียงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เปลวไฟมีสีฟ้าค่อนข้างเสถียร สรุปได้ว่าการเพิ่มโอโซนเข้าร่วมในการเผาไหม้เพียงเล็กน้อย จะช่วยเสริมให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก โดยที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ผลที่ชัดเจนกว่าที่อัตราส่วนสมมูล 6.31

3.2 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลวไฟ

เมื่อป้อนก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่อัตราการไหล 0.52 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศและโอโซน 10.5 ลิตรต่อนาที A/F Ratio Actual 2.46 โดยมวล และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 6.31 ที่ความเข้มข้นโอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 6 โดยช่วงเวลา 0-300 วินาที จะเป็นช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลามากกว่า 300 วินาทีเป็นต้นไป พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มสูงขึ้น

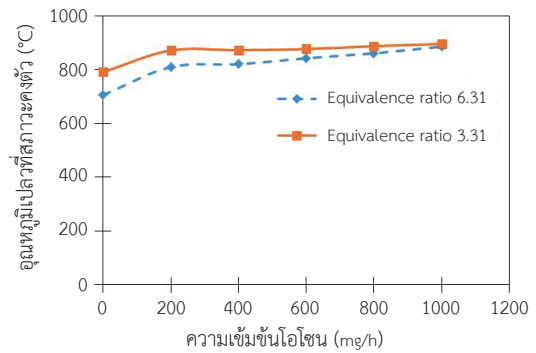


รูปที่ 6 อุณหภูมิเปลวไฟกับเวลาที่ความเข้มข้นไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ทดสอบที่อัตราการไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.52 ลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของอากาศและไอโซน 10.5 ลิตรต่ออนาที A/F Ratio Actual ร้อยละ 2.46 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนสมมูล 6.31

และกราฟเข้าสู่ช่วงคงที่เร็วขึ้น ในสภาวะที่มีการเผาไหม้ร่วมกับก๊าซไอโซนเพียงเล็กน้อยส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก๊าซร้อนที่สภาวะคงตัวสูงขึ้นประมาณร้อยละ 14 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไอโซนเป็น 200 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

3.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลวไฟและความเร็วการเผาไหม้

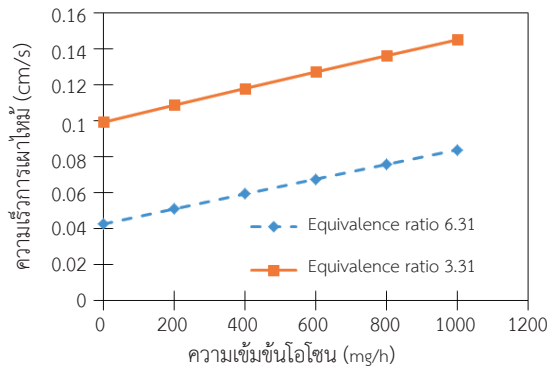
เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 โดยปรับอัตราการป้อนก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.52 ลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของอากาศและไอโซน 10.5 ลิตรต่ออนาที หรือ A/F Ratio Actual 2.46 โดยมีผลเป็นอัตราการป้อนก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.34 ลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของอากาศและไอโซน 13.0 ลิตรต่ออนาที A/F Ratio Actual 4.68 โดยมีผลที่ความเข้มข้นไอโซนในช่วง 0 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัวมาเขียนกราฟแสดงผลดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัวที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 มีค่าสูงกว่าที่ความเข้มข้นไอโซนต่ำ และมีแนวโน้มให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 7 อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัวกับความเข้มข้นไอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31

ที่ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นไอโซน 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ในกรณีที่ยังไม่เติมไอโซนพบว่า ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัวให้ผลที่ต่างกันมากที่สุด ทั้งนี้ เกิดจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยสุทธิที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 จะน้อยกว่าที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ทำให้ปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 เกิดขึ้นมากกว่า ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาสุทธิจึงน้อยกว่าส่งผลให้อุณหภูมิเผาไหม้ต่ำกว่านั่นเอง ในขณะที่การเติมไอโซนส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศที่ผสมก๊าซไอโซน การทำปฏิกิริยาระหว่างไอโซนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีกลไกที่ซับซ้อน แต่ผลการศึกษาที่ผ่านมา [6] พบว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมากและมีการคายพลังงานสูง

เมื่อคำนวณความเร็วการเผาไหม้ตามสมการที่ (3) และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงผลดังรูปที่ 8 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเผาไหม้กับความเข้มข้นไอโซนเป็นเส้นตรง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานของ Liang และคณะ [1] โดยเมื่อความเข้มข้นไอโซนเพิ่มขึ้นความเร็วการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่ไอโซนเข้าทำปฏิกิริยาช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นและจากปฏิกิริยาตามสมการที่ (4) พบว่า จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์รวมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าก๊าซมีการขยายตัวนั่นเอง และงานวิจัยของ Wang และคณะ [2] ซึ่งทดลองใช้ไอโซนกับการเผาไหม้มีเทนให้ผลสรุปว่า



รูปที่ 8 ความเร็วการเผาไหม้กับความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31

โอโซนที่ 7,000 ส่วนในล้านส่วน สามารถเพิ่มความเร็วการเผาไหม้ขึ้นร้อยละ 9.8 และ 9.0 ที่อัตราส่วนสมมูล 1.4 และ 1.45 ตามลำดับ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเผาไหม้และความเข้มข้นโอโซนมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เช่นเดียวกับผลการทดลองนี้ รายงานของ Wang และคณะ [2] ยังสรุปว่าเมื่อลดความเข้มข้นโอโซนลงมาที่ 3,730 ส่วนในล้านส่วน ความเร็วการเผาไหม้ลดเหลือประมาณร้อยละ 8

รูปที่ 8 เมื่อลดอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 ความเร็วการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นทั้งในกรณีที่เติมโอโซนและไม่ได้เติมโอโซน เนื่องจากปฏิกิริยาที่ทำปฏิกิริยาพอดี (Stoichiometry) จะให้ค่าความเร็วการเผาไหม้สูงที่สุดและมีค่าลดลงทั้งกรณีที่มีอัตราส่วนสมมูลมีค่าต่ำกว่า 1 (A/F Ratio on Lean Side) และ อัตราส่วนสมมูลมีค่าสูงกว่า 1 (A/F Ratio on Rich Side) ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ทดลองกับเชื้อเพลิงหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน มีเทน เอทานอล บิวทานอล เป็นต้น ให้ผลว่าบริเวณที่มีอัตราส่วนสมมูลมีค่าประมาณ 1 จะให้ค่าความเร็วการเผาไหม้สูงที่สุด [9], [10] เนื่องจากสภาวะที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าต่ำกว่า 1 (Lean Side) การเกิดปฏิกิริยาถึงจะสมบูรณ์แต่ต้องเสียความร้อนสัมผัสไปกับกระแสอากาศที่เข้ามาช่วยในการเผาไหม้ ในขณะที่อัตราส่วนสมมูลมีค่าสูงกว่า 1 (Rich Side) ความเร็วการเผาไหม้จะลดลงเนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ การเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้จึงเกิดไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ตามสมการ $Y = aX + b$ โดยที่ a คือ ค่าความชัน และ b คือ จุดตัดแกน พบว่า ความชันทั้งสองอัตราส่วนสมมูลให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนจุดตัดแกนที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 ให้ค่าสูงกว่าอัตราส่วนสมมูล 6.31 ประมาณ 2 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน [9], [10]

ตารางที่ 1 ค่าคงที่จากการทำ Linear Regression ระหว่างความเร็วการเผาไหม้กับความเข้มข้นโอโซนที่อัตราส่วนสมมูล 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 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อลักษณะของเปลวไฟและอุณหภูมิเปลวไฟ

โอโซนช่วยให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้สมบูรณ์ขึ้น โดยลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนสีเปลวไฟจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมส้มมาเป็นสีฟ้า และที่อัตราส่วนสมมูล 3.31 (เข้าใกล้ 1) ลักษณะของเปลวไฟและสีของเปลวไฟมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตอย่างใกล้ชิดพร้อมกับภาพถ่ายพบว่า ทั้งสีเปลวไฟและความสูงเปลวไฟมีขนาดที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซน

อัตราส่วนสมมูล 6.31 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สภาวะคงตัวที่ให้ค่าเฉลี่ย 705.5 องศาเซลเซียส และมีความเร็วการเผาไหม้เท่ากับ และ 0.043 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนที่ความเข้มข้นโอโซน 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ให้ค่าอุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ยที่ 885.5 องศาเซลเซียส และความเร็วการเผาไหม้ 0.082 เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นการเพิ่มโอโซนเข้าไปในระบบเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูลนี้ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.5 และความเร็วการเผาไหม้เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 95



4.2 ผลของการลดอัตราส่วนสมมูล

การลดลงของอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น โดยรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะพบว่า สีของเปลวไฟจะมีโซนสีส้มที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำแสดงว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไม่มีการป้อนโอโซนที่อัตราส่วนสมมูลทั้งสองให้เปลวไฟสีฟ้าอมส้มอย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโอโซนไปที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงที่อัตราส่วนสมมูลทั้งสองให้ลักษณะของเปลวไฟที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลจาก 6.31 เป็น 3.31 ที่ไม่มีการป้อนโอโซนพบว่า อุณหภูมิเปลวไฟที่สถานะคงตัวเฉลี่ย เพิ่มขึ้นจาก 705.5 เป็น 790.8 องศาเซลเซียส แต่เมื่อมีการเติมโอโซนที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดมีแนวโน้มให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมีค่าประมาณ 890 องศาเซลเซียส ทั้งที่อัตราส่วนสมมูล 6.31 และ 3.31 ทั้งนี้ อาจเกิดขึ้นจากการที่โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นและความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเผาไหม้กับความเข้มข้นของโอโซนแสดงเป็นแบบเชิงเส้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัท ไทยเอ็นเนอร์ยี่คอนเซอร์เวชัน จำกัด สำหรับเครื่องผลิตโอโซน

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Liang, Z. Wang, W. Weng, Z. Zhou, Z. Huang, J. Zhou, and K. Cen, "Study of ozone-enhanced combustion in $H_2/CO/N_2$ /air premixed flames by laminar burning velocity measurements and kinetic modeling," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 2, pp. 1177–1188, 2013.
- [2] Z. H. Wang, L. Yang, B. Li b, Z. S. Li, Z. W. Sun, M. Alden, K. F. Cen, and A. A. Konnov, "Investigation of combustion enhancement by ozone additive in CH_4 /air flames using direct laminar burning velocity measurements and kinetic simulations," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 1, pp. 120–129, 2012.
- [3] E. Varea, J. Beeckmann, H. Pitsch, Z. Chen, and B. Renou, "Determination of burning velocities from spherically expanding H_2 /air flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 1, pp. 711–719, 2015.
- [4] T. Boushaki, Y. Dhué, L. Selle, B. Ferret, and T. Poinso, "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, no. 11, pp. 9412–9422, 2012.
- [5] J. Buffam, K. Cox, and H. Schiess, (2019, September). *Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner*. [Online]. Available: 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, and 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] Energy Policy and Planning Office. (2018, October). *Energy Statistics of Thailand 2018*, EPPO, Ministry of Energy. Bangkok, Thailand [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/14166-energy-statistics-2561>
- [8] Thai Energy Conservation, "Operation Manual of Ozone Generator," Thai Energy Conservation Co.,LTD.



- [9] G. Broustail, P. Seers, F. Halter, G. Moréac, and C. Mounaim-Rousselle, "Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends," *Fuel*, vol. 90, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [10] K. Coudoro, N. Chaumeix, B. Ahmed, and C-E Paillard, "Laminar flame velocities and fundamental properties for two methane based mixtures: G27 and G222," presented at the 23rd ICDERS, Irvine, USA, July 24–29, 2011,