



การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนของ
เจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน
Study of Flame Structure and Heat Transfer of Premixed
Swirling Flame Jet

ณัฐมาศ อุปถัมภ์
Nuttamas Uppatam

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง
แบบผสมก่อน

ผู้เขียน นางสาวณัฐมาศ อุปถัมภ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์)

.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
(ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวณัฐมาศ อุปถัมภ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวณัฐมาศ อุปถัมภ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุน ควงแบบผสมก่อน
ผู้เขียน	นางสาวณัฐมาศ อุปถัมภ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

การใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนเป็นวิธีการให้ความร้อนบนพื้นผิวที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงและสามารถเพิ่มอุณหภูมิบนพื้นผิวได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนนิยมใช้เจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อหรือแบบเจาะรูกลม ซึ่งเปลวไฟจะให้ความร้อนสูงเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟไหลปะทะพื้นผิวโดยตรงเท่านั้น ทำให้การกระจายความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ในงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบหมุนควง ซึ่งสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายความร้อนบนพื้นผิวและสามารถเพิ่มอัตราการให้ความร้อนบนพื้นผิวได้

ในงานวิจัยได้ใช้หัวฉีดที่มีห้องทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 20 mm สำหรับสร้างการไหลวน ซึ่งห้องทรงกระบอกมีทางเข้าในแนวสัมผัสจำนวน 2 ทาง โดยที่ทางเข้ามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส $D=5$ mm สำหรับป้อนส่วนผสมระหว่างแก๊ส LPG กับอากาศไหลเข้าสู่ห้องทรงกระบอกเพื่อสร้างเปลวไฟหมุนควง สำหรับเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อัตราส่วนสมมูลระหว่าง LPG กับอากาศเท่ากับ $\phi = 0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่เงื่อนไขค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000, 4,000$ และ $6,000$ และศึกษาผลของความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่มีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟ

ในการทดลองได้ศึกษาโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระโดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพและศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟอิสระโดยใช้เทคนิคถ่ายภาพ Schlieren อีกทั้งศึกษาการกระจายอุณหภูมิในเปลวไฟโดยใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B สำหรับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชน ได้ศึกษาที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิว $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ โดยแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน คือ การวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวโดยวัดทางอ้อมจากน้ำหล่อเย็นพื้นผิว และการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดโดยใช้เซ็นเซอร์ฟลักซ์ความร้อน และได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงเปรียบเทียบกับกรณีใช้เจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อที่เงื่อนไขค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$

จากผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระสามารถแบ่งได้เป็น 3 โซน ได้แก่ โซนใกล้ปากทางออก (Neck zone) โซนปฏิกิริยา (Reaction zone) และโซนหลังโซนปฏิกิริยา (Post combustion flame zone) ซึ่งโครงสร้างของเปลวไฟทั้ง 3 โซนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่เปลี่ยนไป อีกทั้งอัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อสีของโครงสร้างเปลวไฟ

และความยาวของเปลวไฟอีกด้วย ทั้งนี้ผลของความสูงของห้องสร้างเปลวไฟหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ พบว่าโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงมีการบานออกและลำเปลวไฟแยกออกเป็นสองส่วนทำมุมกับแกนเจ็ทเป็นมุมหมุนควงที่ 24.5° , 18.5° , 15.5° , 13.5° และ 10.15° ตามลำดับ การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้ความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายของเปลวไฟใกล้เคียงบริเวณปากทางออกหัวฉีด และเกิดการผสมกันระหว่างลำเปลวไฟและอากาศที่อยู่รอบๆ และพบว่าความสูงของห้องที่ $H=4.6D$ ให้การกระจายความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระที่ถูกบันทึกผลโดยกล้องดิจิตอลและผลการวัดการกระจายอุณหภูมิ

เมื่อเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวทำให้เปลวไฟบนพื้นผิวแผ่ขยายครอบคลุมเป็นวงกว้างและทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอ โดยเงื่อนไขที่ $H=4.6D$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงที่สุด และพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและให้ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนมากถึง 67% เนื่องจากการเหนี่ยวนำอากาศของเปลวไฟส่งผลให้การเผาไหม้ใกล้เคียงบริเวณพื้นผิวของแผ่นพุ่งชนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงและเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ พบว่า ที่เงื่อนไขระยะพุ่งชนที่น้อยกว่า $L=6D$ เจ็ทเปลวไฟหมุนควงให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเจ็ทเปลวไฟจากท่อทั้งกรณีการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งพื้นผิวและเฉพาะจุดกึ่งกลางของหัวฉีด แต่เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชนให้สูงขึ้นมากกว่า $L=6D$ ด้วยโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อให้ความร้อนได้ดีเฉพาะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดกึ่งกลางของหัวฉีดของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงต่ำกว่าเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อให้การถ่ายเทความร้อนต่ำถึง 30% ในทุกอัตราส่วนสมมูลและที่ระยะพุ่งชนมากกว่า $L=8D$ แต่ด้วยโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงบานออกเป็นวงกว้าง และไหลปะทะครอบคลุมบนพื้นผิวเป็นวงกว้าง จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวจากเปลวไฟหมุนควงสูงกว่ากรณีเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อในทุกอัตราส่วนสมมูลและทุกระยะพุ่งชนมีค่าสูงถึง 40%

Thesis Title	Study of Flame Structure and Heat Transfer of Premixed Swirling Flame Jet
Author	Nuttamas Uppatam
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2019

ABSTRACT

The impinging flame jet is the method for a heating surface with high heat transfer rate and can increase the temperature on the surface rapidly. In general, the impinging flame was mainly used for the flame jet from the pipe nozzle or orifice nozzle which the impinging flame provides a high heat transfer rate only the jet impingement area. This results in non-uniform heat distribution on the surface. In this research, the flame structure and heat transfer characteristics of swirling flame jet had been studied, which the swirling flame jet can improve the uniform heat distribution and can enhance heat transfer rate on the surface.

In the experiment, the nozzle with a cylindrical chamber of 20 mm in diameter was applied for swirl flow generation. The chamber was connected with double inlets tangentially. The inlet has a square cross-section with $D=5$ mm in height. The inlets were injected with a mixture of LPG and air into the chamber for generating swirling flame jet. In this study, the experimental parameters consisted of equivalence ratio between LPG and air at $\phi=0.8, 1.0, \text{ and } 1.2$ with Reynolds number $Re=2,000, 4,000, \text{ and } 6,000$. The effect of chamber height for swirling flame structure was studied at $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D \text{ and } 7.0D$.

The structure of swirling free flame jet was studied by the digital camera while the heat distribution in swirling flame jet using Schlieren imaging technique. In addition, the flame temperature distribution in the swirling flame structure was measured using a thermocouple type-B. For the heat transfer on the surface with swirl impinging flame jet, the nozzle to the impingement plate distance was studied at $L=4D, 6D, 8D, \text{ and } 10D$. The measurement can be divided into two parts; Including the overall average heat transfer measurement and local heat transfer measurement using the heat flux sensor, it can be known heating performance from the swirling flame. Also, the heat transfer

enhancement on the surface using swirling flame jet were compared with the flame jet from a pipe nozzle at a Reynolds number $Re=2,000$.

In the result, the swirling flame structure can be divided into three zones, including the neck zone near the chamber exit, the reaction zone, and the post-combustion flame zone. The flame structure for all zones changed with the increase of Reynolds number and the increase of equivalence ratio affected to the color in the flame and the flame length. The height of the swirl chamber at $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$, and $7.0D$ affected to the swirling flame structure. The flame spreading was changed and divided into two flames which the swirl angle of the flame to the jet axial was varied at swirl angle 24.5° , 18.5° , 15.5° , 13.5° , and 10.5° , respectively. Also, when increasing the height of the swirl chamber, the swirling velocity becomes and increasing the jet spreading rate near the chamber exit. The flame was mixed and entrained with the ambient air. It was found that the case of chamber height at $H=4.6D$ provided the heat distribution. This corresponded to the swirling flame structure recorded by the digital camera and agreed with the results of flame temperature measurement.

When the swirling flame impinges on the surface, the flame covered broadly on the impingement surface and resulted in uniform heat transfer on the surface. The case of chamber height $H=4.6D$ at impingement distance $L=4D$ provided the highest average heat transfer on the surface. It was found that the equivalence ratio at $\phi=1.2$ provided the highest heat transfer for all the cases and heating performance was increased up to 67%. This is due to the air entrainment providing the complete combustion near the impingement surface.

In this study, the heat transfer for swirling impinging jet and impinging jet from pipe nozzle was also compared. It was found that for the case of impingement distance less than $L=6D$, the swirling flame jet provided higher heat transfer rate than the impinging jet from pipe nozzle for average heat transfer and local heat flux at center of the nozzle. However, when increasing the impingement distance larger than $L=6D$, due to the flame structure from pipe nozzle, the heat transfer give highest heat transfer rate at the center point of impingement which makes the heat transfer is lower than swirling impinging flame jet about 30% for all equivalence ratio and for the case of impingement distance larger than $L=8D$. Since the flame structure of swirling impinging

jet spread broadly and impinged on the surface with a large flame covering the area. The average heat transfer for swirling impinging jet was higher than the case of the flame jet from pipe nozzle about 40% for all equivalence ratios and impingement distances.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยเสนอแนะแนวทางและเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.มักตาร์ แวหะยี และรองศาสตราจารย์ ดร.ประसान สถิตย์เรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษาและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ณัฐมาศ อุปถัมภ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(10)
สารบัญ	(11)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(21)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	3
2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้	4
2.2.1 ประเภทของเชื้อเพลิงแก๊ส	5
2.2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้	7
2.2.3 อัตราส่วนสมมูล	8
2.3 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนและแบบผสมภายหลัง	9
2.3.1 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน	10
2.3.2 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมภายหลัง	10
2.4 ชนิดของเปลวไฟ	11
2.4.1 เปลวไฟที่ไม่ผสมอากาศ	11
2.4.2 เปลวไฟที่ผสมอากาศบางส่วน	11
2.4.3 เปลวไฟที่ผสมอากาศพอดี	11
2.5 เปลวไฟแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน	11
2.6 อุณหภูมิของเปลวไฟ	12
2.7 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ	13
2.8.1 การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน	14
2.8.2 ปฏิกริยาการคายความร้อนทางเคมี	15
2.8.3 การแผ่รังสี	15
2.8.4 การควบแน่น	16
2.9 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	16
2.9.1 ความยาวของเปลวไฟ	16
2.9.2 ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน	17
2.9.3 อัตราส่วนสมมูล	17
2.9.4 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์	17
2.10 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	19
2.10.1 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน	19
2.10.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน	24
2.10.3 ลิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง	31
2.10.4 สรุปการทบทวนเอกสาร	33
2.10.5 ช่องว่างงานวิจัย	34
บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	35
3.1 โมเดลสร้างเปลวไฟหมุนควงและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	35
3.2 รายละเอียดของชุดทดลองและวิธีการทดลอง	38
3.2.1 ชุดทดลอง	38
3.2.2 วิธีการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟโดยกล้องดิจิตอล	39
3.2.3 วิธีการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren	40
3.2.4 วิธีการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง	42
3.2.5 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	43
บทที่ 4 ผลการศึกษา	49
4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟ	49
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบทอโดยกล้องดิจิตอล	49
4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยกล้องดิจิตอล	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren	73
4.3 ผลการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง	74
4.4 ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	82
4.4.1 ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว	82
4.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน	87
4.4.3 ผลการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	89
4.5 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควงกับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ	91
4.5.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟอิสระโดยใช้กล้องดิจิตอล	91
4.5.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชนโดยใช้กล้องดิจิตอล	93
4.5.3 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	94
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	97
5.1 สรุปผลการทดลอง	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สำหรับการศึกษาเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน	103
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของค่าน้ำซเซิลต์นัมเบอร์โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เป็นตัววัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควง	106
ภาคผนวก ค บทความที่เผยแพร่ 1	110
ภาคผนวก ง บทความที่เผยแพร่ 2	117
ภาคผนวก จ บทความที่เผยแพร่ 3	127
ภาคผนวก ฉ บทความที่เผยแพร่ 4	135
ประวัติผู้เขียน	150

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลว	6
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง	36
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควง	40
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการกระจายความร้อน	41
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขใช้ในการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ	43
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้วัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว	45
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้วัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	48

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	4
รูปที่ 2.3 ลักษณะเชื้อเพลิงตามสภาพทางกายภาพ	5
รูปที่ 2.4 เจ็ทเปลวไฟ (ก) แบบผสมก่อน (ข) แบบผสมภายหลัง	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของเปลวไฟแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน	12
รูปที่ 2.6 อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากสีเปลวไฟ	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชน	13
รูปที่ 2.8 การพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวพุ่งชน	14
รูปที่ 2.9 การแผ่รังสีของเปลวไฟ	16
รูปที่ 2.10 เจ็ทเปลวไฟอิสระขณะปะทะแผ่นพุ่งชนในกรณีการศึกษาต่างๆ	20
รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนเจ็ทเปลวไฟเอียงขณะปะทะแผ่นพุ่งชน	21
รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของนัสเซิลันัมเบอร์ตามระยะ y/d	21
รูปที่ 2.13 แผ่นพุ่งชนติดครีป (ก) ครีปวงรี (ข) ครีปวงกลม (ค) ครีปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ง) ครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (จ) ครีปสามเหลี่ยม (ฉ) ครีปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว	22
รูปที่ 2.14 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	23
รูปที่ 2.15 เปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน 4D และ 6D	23
รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพทางความร้อนในแต่ละอัตราส่วนสมมูล	24
รูปที่ 2.17 ตัวกำเนิดการหมุนวนในแต่ละองศาของ Singh และ Chander	26
รูปที่ 2.18 เปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชน	26
รูปที่ 2.19 กราฟการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (ก) ที่ $H=4D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1 ใน ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ (ข) ที่ $H=4D$ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 5,000 ใน อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	26
รูปที่ 2.20 แผนผังชุดทดลองของ Singh และ Chander	27
รูปที่ 2.21 ลักษณะโครงสร้างตัวกำเนิดเปลวไฟที่ใช้ในการทดลองของ Singh และ Chander	27
รูปที่ 2.22 แผนผังจำลองการทดลองและหัวเจ็ทเปลวไฟที่ใช้ในการเกิด เปลวไฟหมุนวน ทิศทางตรงกันข้ามของ Mahesh และ Mishra	28

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 ลักษณะเปลวไฟหมุนควงในทิศทางตรงข้ามใน	28
รูปที่ 2.24 แผนผังชุดทดลองของ Hindasageri และคณะ	29
รูปที่ 2.25 ค่า Thermal performance ที่ $Re=500, 1,000$ และ $1,500$	30
รูปที่ 2.26 โมเดลห้องเผาไหม้แบบไซโคลนสร้างเปลวไฟหมุนควง	31
รูปที่ 2.27 โมเดลห้องเผาไหม้สร้างเปลวไฟหมุนควง	32
รูปที่ 2.28 โมเดลหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควง	33
รูปที่ 2.29 โมเดลด้านบนของหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควง	33
รูปที่ 3.1 โมเดลสร้างการไหลหมุนควง	36
รูปที่ 3.2 โมเดลเจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว	37
รูปที่ 3.3 เจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ	37
รูปที่ 3.4 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา	38
รูปที่ 3.5 โมเดลเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ	39
รูปที่ 3.6 การถ่ายภาพโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง	39
รูปที่ 3.7 ชุดทดลองสำหรับศึกษาการกระจายความร้อนโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren	41
รูปที่ 3.8 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B (Thermocouple Type-B)	42
รูปที่ 3.9 จุด A ถึง O เป็นจุดวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงอิสระ	42
รูปที่ 3.10 (ก) แผ่นพุ่งชนที่ใช้จริง และ (ข) โมเดลแผ่นพุ่งชน ที่ใช้ในการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว	44
รูปที่ 3.10 เซ็นเซอร์วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	47
รูปที่ 4.1 โครงสร้างเปลวไฟอิสระที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	50
รูปที่ 4.2 โครงสร้างเปลวไฟแบบท่อขณะปะทะแผ่นพุ่งชน	51
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ	52
รูปที่ 4.4 โครงสร้างเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชน (ก) ระยะต่ำ (ข) ระยะกลาง และ (ค) ระยะสูง	52

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วน สมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$	55
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วน สมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$	56
รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วน สมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$	57
รูปที่ 4.8 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$	59
รูปที่ 4.9 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$	59
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$	60
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$	60
รูปที่ 4.12 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$	62
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$	63
รูปที่ 4.15 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$	63
รูปที่ 4.16 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$	65
รูปที่ 4.17 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$	65
รูปที่ 4.18 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$	66
รูปที่ 4.19 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$	66
รูปที่ 4.20 การกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ อัตราส่วนสมมูล $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$	68
รูปที่ 4.21 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=2.2D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)	69
รูปที่ 4.22 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=2.2D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$	69
รูปที่ 4.23 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=3.4D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)	70

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=3.4D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$	71
รูปที่ 4.25 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)	72
รูปที่ 4.26 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$	72
รูปที่ 4.27 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=5.8D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)	73
รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=5.8D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$	74
รูปที่ 4.29 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=7.0D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)	75
รูปที่ 4.30 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=7.0D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$	75
รูปที่ 4.31 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	77
รูปที่ 4.32 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	79
รูปที่ 4.33 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	80
รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนบนพื้นผิว ($Re=2,000$)	81
รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนบนพื้นผิว ($Re=4,000$)	82

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($Re=6,000$)	83
รูปที่ 4.37 พลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่ อัตราส่วนสมมูลต่างๆ	84
รูปที่ 4.38 โครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท่อในกรณีอัตราส่วนสมมูลต่างๆ	86
รูปที่ 4.39 โครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบหมุนควงในกรณีอัตราส่วนสมมูลต่างๆ	87
รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชน (ก) หัวฉีดแบบท่อ (ข) หัวฉีดหมุนควง	88
รูปที่ 4.41 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควง กับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ ($Re=2,000$)	89
รูปที่ 4.42 ผลการวัดพลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟหมุนควงกับ เจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ ($Re=2,000$)	90

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

D	คือ	หน้าตัดจัสตรีสทางเข้าของส่วนผสมในหัวฉีด (m)
H	คือ	ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง (m)
ϕ	คือ	อัตราส่วนสมมูล
Re	คือ	เรย์โนลด์นัมเบอร์
\dot{q}	คือ	ฟลักซ์ความร้อน (kW/m^2)
\dot{m}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)
C_p	คือ	ความจุความร้อนของน้ำ ($\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
ΔT	คือ	ผลต่างอุณหภูมิของน้ำสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)
A	คือ	พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
T_f	คือ	อุณหภูมิของเปลวไฟ (K)
\dot{Q}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว (kW)
\dot{Q}_{fuel}	คือ	ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง LPG ที่ได้จากการเผาไหม้ (kW)
\dot{m}_{fuel}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง LPG (kg/s)
LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง LPG (kJ/kg)
η	คือ	ประสิทธิภาพทางความร้อน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโดยวิธีใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน (Impinging Flame Jet) บนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการให้ความร้อนแก่พื้นผิวที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมเช่น การผลิตโลหะ แก้ว และกระดาษ รวมถึงกระบวนการตัด เชื่อม หลอมเหลวโลหะเป็นต้น เนื่องจากการใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงโดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟพุ่งชนโดยตรง โดยวิธีดังกล่าวสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้อย่างเร็ว ส่งผลทำให้สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการให้ความร้อน เมื่อเทียบกับวิธีเดิมที่ใช้กลไกการแผ่รังสีความร้อน

สำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงจะขึ้นอยู่กับประเภทของเปลวไฟ เช่น เปลวไฟแบบผสมก่อน (Premixed flame) หรือ เปลวไฟแบบผสมภายหลัง (Diffusion flame) และระยะห่างระหว่างหัวเผาและพื้นผิวให้ความร้อน ชนิดของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีผลต่อโครงสร้างและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนบนพื้นผิวเรียบเป็นจำนวนมาก มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเปลวไฟ การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟบนพื้นผิวทั้งแบบเฉพาะจุดและแบบเฉลี่ยรวมไปถึงการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเปลวไฟ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่ใช้เปลวไฟมีอยู่เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารที่เริ่มใช้เปลวไฟเป็นหลัก ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดปัญหาการคาค้นทุนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยมีแนวคิดการนำเทคโนโลยีของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมาใช้ โดยการปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยการใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นและสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากการหมุนควงของเจ็ทได้เพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆ ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวที่เร็วและมีระดับความแปรปรวนในเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา และอาจทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณรอบๆ เจ็ทเพิ่มสูงขึ้น หรือในกรณีของการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว กลุ่มเจ็ทหมุนควงอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากมีการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงก่อนพุ่งชนพื้นผิวและมีการไหลแบบหมุนควงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง แต่อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการ

ถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพลาสมาความร้อนรวมถึงการกระจายความร้อนของเจ็ทพลาสมาความร้อนก่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟพลาสมาแบบผสมก่อน
- (2) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟพลาสมาแบบผสมก่อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

(1) ใช้หัวฉีดที่มีห้องทรงกระบอกสร้างเปลวไฟพลาสมาที่มีความสูงห้อง $H=2.0D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ และระยะพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับ และเปรียบเทียบเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อ

(2) ศึกษาเจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนและไม่มีการจ่ายอากาศทุติยภูมิ โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงและใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดเซอร์ที่ค่าสมมูล $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ

(3) ศึกษาลักษณะของเปลวไฟพลาสมากรณีเปลวไฟอิสระและเปลวไฟพุ่งชน

(4) ศึกษาลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟพลาสมาโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren

(5) ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากเจ็ทเปลวไฟพลาสมาโดยใช้ type-B Thermocouple เป็นตัววัด

(6) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการรับความร้อนในสภาวะคงที่และการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ฟลักซ์ความร้อนเป็นตัววัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมไหลและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพลาสมาแบบผสมก่อน

(2) ได้แนวทางในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนโดยการพัฒนาหัวฉีดแบบพลาสมา

(3) สามารถนำข้อมูลที่ได้ออกแบบระบบหรืออุปกรณ์การให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะกับการใช้งาน เช่น การให้ความร้อนหรือในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นโลหะและอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล เป็นต้น

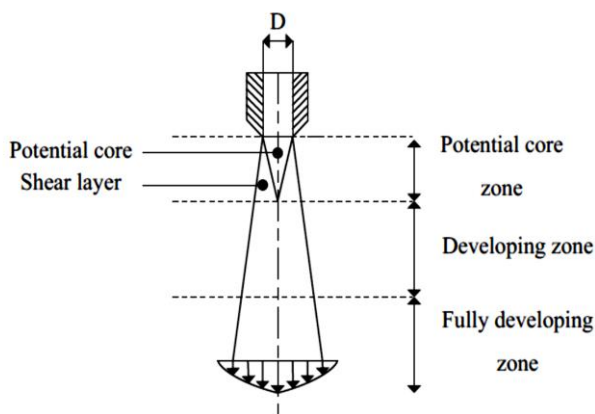
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่จะนำไปใช้ในงานวิจัย โดยมุ่งเน้นถึงหลักการของการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวเป็นหลัก รวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขณะเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว ทั้งนี้เพื่อทราบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง ต้องทราบถึงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงเป็นอันดับแรก รวมไปถึงสีของเปลวไฟที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรงอีกด้วย นอกจากนี้ได้มีการทบทวนเอกสารและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องสำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะพุ่งชนพื้นผิว

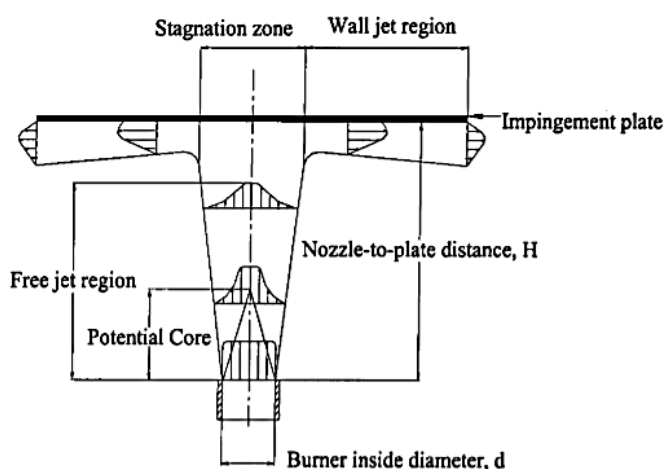
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

โดยทั่วไปในโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ Potential core zone, Developing zone และ Fully Developing zone ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ Potential core zone เป็นระยะที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด ของไหลมีความเร็วคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีดจะมีบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่หน้าตัดเจ็ทจาก Potential core zone จนถึงบริเวณที่ของไหลหยุดนิ่งอยู่กับที่เรียกว่า Shear layer และที่ระยะห่างจากปากทางออกของหัวฉีดความหนาของ Shear layer จะเพิ่มขึ้น บริเวณของ Potential core จะลดลง และมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวรัศมี ค่าความแปรปรวน (Turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ทจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงนี้หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วง Fully develop zone เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์ ซึ่งรูปทรงของหัวฉีดจะมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ [1, 2]

สำหรับกรณีของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวนั้น สามารถแบ่งโครงสร้างการไหลออกเป็น 3 ส่วนคือ Free jet zone, Stagnation zone และ Wall jet zone ดังในรูปที่ 2.2 โดยที่ Free jet zone จะเป็นช่วงการไหลก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเจ็ทที่ไหลออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วเท่ากับปากทางออก และ Stagnation zone เป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกับผนัง และมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลในแนวรัศมี และ Wall jet zone เป็นบริเวณที่ของไหลไหลบนผนัง ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระก่อนพุ่งชนพื้นผิวและระยะพุ่งชนของเจ็ท



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน [1, 2]

2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซึ่งวัสดุที่เผาไหม้ได้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนพร้อมกับปลดปล่อยความร้อนออกมาในขณะเดียวกัน จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไปโดยเปล่าประโยชน์และก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ดังนั้นการทราบหลักการของกระบวนการเผาไหม้และวิธีการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์จึงมีความสำคัญยิ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การทราบสาเหตุของการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบและอุปกรณ์ความร้อน พร้อมทั้งแนวทางในการป้องกันจะช่วยทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานความร้อนของระบบโดยรวมให้สูงขึ้นได้อีกด้วย

ในการเผาไหม้จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงซึ่งเป็นสารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่าย เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือออกซิเจน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้งานอย่างคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการนำสิ่งใดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้น จำเป็นต้องสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก สามารถจัดหาใช้ได้สะดวก และสามารถเก็บรักษาขณะขนส่งและใช้งานได้ง่าย

นอกจากนี้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ (เช่น ไอเสียซีเอ็นเอ เป็นต้น) ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่นทางอากาศ ทางน้ำ โดยเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพดังรูปที่ 2.3 เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เชื้อเพลิงแก๊สเป็นหลัก



(ก) เชื้อเพลิงแก๊ส

(ข) เชื้อเพลิงเหลว

(ค) เชื้อเพลิงแข็ง

รูปที่ 2.3 ลักษณะเชื้อเพลิงตามสภาพทางกายภาพ

(ก) เชื้อเพลิงแก๊ส (ข) เชื้อเพลิงเหลว (ค) เชื้อเพลิงแข็ง [3]

2.2.1 ประเภทของเชื้อเพลิงแก๊ส

เชื้อเพลิงแก๊สเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะแก๊สภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ แบ่งออกเป็น แก๊สธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและแก๊สที่ผลิตขึ้นจากการแยกเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวชนิดอื่น เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สแอลพีจี และแก๊สหุงต้ม เป็นต้น

(1) แก๊สธรรมชาติ

แก๊สที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นหลักมีทั้งแก๊สที่ได้จากบ่อน้ำมันซึ่งเป็นแก๊สที่เกิดขึ้นพร้อมกับน้ำมันและแก๊สที่ได้จากบ่อก๊าซซึ่งไม่มีน้ำมันนอกจากนี้สภาพของก๊าซแบ่งออกได้เป็นก๊าซแห้งและแก๊สชื้นสำหรับแก๊สแห้งจะมีแก๊สมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่า 95% ส่วนแก๊สชื้นนอกจากจะมีแก๊สมีเทน และอีเทน (C_2H_6) แล้วยังมีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนตั้งแต่โพรเพน (C_3H_8) เป็นองค์ประกอบก๊าซธรรมชาติมีค่าความร้อนสูง (36-48 MJ/Nm³) เผาไหม้ได้ง่ายและไอเสียจากการเผาไหม้จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุดเทียบกับเชื้อเพลิงทุกชนิด สำหรับการขนส่งแก๊สในทางบกจะขนส่งแก๊สตามท่อแก๊ส (Pipeline) ในสภาพแก๊ส การขนส่งทางน้ำจะขนส่งในสภาพของเหลวโดยใส่เรือแท็งก์เกอร์ห้องเย็นแล้วถ่ายใส่ถังแก๊สเหนือพื้นดินหรือใต้ดินในสภาพของเหลว โดยทั่วไปแก๊สธรรมชาติที่ลดอุณหภูมิเหลือ $-162\text{ }^\circ\text{C}$ จนเป็นของเหลวจะเรียกว่าแก๊สธรรมชาติเหลว (Liquefied Natural Gas หรือแก๊ส LNG)

(2) แก๊สปิโตรเลียมเหลว

แก๊สที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวกปิโตรเลียม ซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิและความดันปกติ แต่เมื่อเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิจะกลายเป็นของเหลวได้ง่าย โดยทั่วไปจะเป็นแก๊สผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน มีชื่อเรียกย่อทั่วไปว่า แก๊ส LPG (Liquefied

Petroleum Gas) มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในบ่อน้ำมันและที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลวแสดงดังตารางที่ 2.1 มีค่าความร้อนสูงและเป็นแก๊สที่สะอาด ขนส่งสะดวก ปรับระดับการเผาไหม้สะดวก จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมและในครัวเรือน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลว [4]

LPG ATTRIBUTES	PROPANE (70%)	BUTANE (30%)
Chemical Formula	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Energy Content: MJ/m ³	95.8	111.4
Boiling Temp: C°	-42	-0.4
Pressure @ 21°C: kPa	858.7	215.1
Flame Temp: C°	1967	1970
Expansion: m ³ /L	0.27	0.235
Gas Volume: m ³ /kg	0.54	0.405
Relative Density: H ₂ O	0.51	0.58
Relative Density: air	1.53	2
Specific Gravity @ 25°C	1.55	2.07
Density @ 15°C: kg/m ³	1.899	2.544

(3) แก๊สหุงต้ม

แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงแก๊สที่ส่งผ่านมาตามท่อแก๊สจ่ายให้แก่โรงงาน อาคาร และครัวเรือน แต่เดิมใช้แก๊สถ่ายหินเป็นหลัก แต่ปัจจุบันมีการใช้แก๊สธรรมชาติมากขึ้น ซึ่งแก๊สหุงต้มเป็นแก๊สที่สะอาด มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ปรับระดับการเผาไหม้ได้สะดวก มีปริมาณสำรองที่สามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน จึงมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงในอุดมคติ อย่างไรก็ตาม แก๊สหุงต้มมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่นำไปใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เผาไหม้เหมาะสมกับชนิดของแก๊ส

(4) แก๊สที่ได้จากการแยกสลายน้ำมัน

แก๊สที่ได้จากการแยกสลายน้ำมัน หมายถึงแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำสารไฮโดรคาร์บอนมาแยกสลายความร้อนด้วยการเผาไหม้บางส่วน ด้วยการปรับสภาพด้วยไอน้ำ หรือด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเพื่อทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง วัตถุประสงค์ในการผลิตที่ใช้กันมากได้แก่ Off-oil จากโรงกลั่นน้ำมัน น้ำมันก๊าด น้ำมันหนัก ฯลฯ

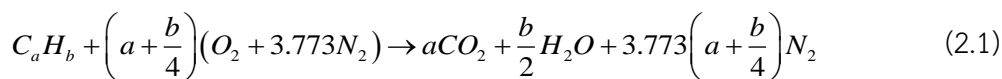
(5) แก๊สเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

แก๊สถ่านหิน (แก๊สจากเตาถ่านโค้ก) เป็นแก๊สที่เป็นผลพลอยได้จากการนำถ่านหินมากลั่นแห้ง (Dry distillation) เพื่อผลิตเป็นถ่านโค้ก ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรคาร์บอนมอนอกไซด์ ฯลฯ มีค่าความร้อนไม่เกิน 22 MJ/Nm^3 ใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ และเป็นวัตถุประสงค์ในการทำแก๊สหุงต้ม (Town gas) เป็นต้น แก๊สจากเตาหลอมเหล็ก เป็นแก๊สที่ได้จากส่วนบนสุดของเตาในกระบวนการผลิตเหล็ก เรียกว่า แก๊ส Blast furnace หรือแก๊ส B (ย่อมาจาก Blast furnace gas) เป็นแก๊สที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถติดไฟได้ มีค่าความร้อนไม่เกิน 3.8 MJ/Nm^3 แก๊สทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมัน (Off gas) เป็นแก๊สที่ปล่อยจากกระบวนการกลั่นน้ำมันต่างๆ ในโรงกลั่น องค์ประกอบขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องจักร ลักษณะของน้ำมันดิบ เงื่อนไขการเดินเครื่อง ฯลฯ จะมีไฮโดรคาร์บอน เช่น C_3 และ C_4 อยู่มาก

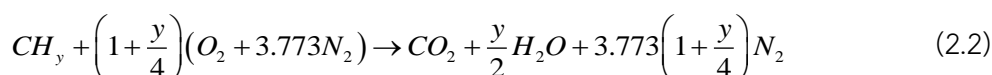
2.2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาเผาไหม้มีลักษณะเด่นคือเป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอะตอมและอนุมูลอิสระรวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลทางพลศาสตร์ของแก๊ส กล่าวคือ ปฏิกิริยาเผาไหม้ทั่วไปหากไม่สนใจกระบวนการระหว่างทางแล้ว ผลลัพธ์สุดท้ายแล้วจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะแก๊ส ไม่ว่าเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็งหรือของเหลว เมื่อเริ่มเผาไหม้จะเกิดการกลายเป็นไอก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะแก๊สระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชันซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นสารออกซิเดชัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสารทำปฏิกิริยาและสารที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกกำหนดโดยสมการเคมี

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์พอดีหรือที่เรียกว่าการเผาไหม้ทางทฤษฎี (Theoretical combustion) ซึ่งการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนก็คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่มีออกซิเจนเพียงพอที่จะออกซิไดส์คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิไดส์ไฮโดรเจนในน้ำทั้งหมด สำหรับการเผาไหม้ทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตรเป็น C_xH_y กับอากาศที่สามารถเขียนเป็นสมการเคมีที่ (2.1)



ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนโดยโมลของสารทำปฏิกิริยาและสารที่ได้จากการเผาไหม้ ดังนั้นสูตรหรือส่วนประกอบของเชื้อเพลิงสามารถเขียนได้เป็น CH_y โดยที่ $y = b/a$ สำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์พอดีจะแสดงดังสมการที่ (2.2)



จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎีคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}\right)_{stoch} &= \frac{\left(a + \frac{b}{4}\right)(32 + 3.773(28.16))}{a(12.011) + b(1.008)} \\ &= \frac{34.56(4 + y)}{12.011 + 1.008y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

การเผาไหม้สารผสมบาง (Fuel-lean combustion) อากาศที่มากเกินไปเมื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และการเผาไหม้สารผสมหนา (Fuel-rich combustion) จะมีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะออกซิไดส์เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้เต็มที่ เนื่องจากส่วนประกอบของสารที่ได้จากการเผาไหม้ในสารผสมบางและสารผสมหนาจะแตกต่างกัน และอัตราส่วนเชื้อเพลิง/อากาศพอดี จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีการกำหนดส่วนประกอบของสารผสมเรียกว่า “อัตราส่วนสมมูล”

2.2.3 อัตราส่วนสมมูล

อัตราส่วนสมมูลเป็นปริมาณไร้หน่วยที่นิยมใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์ที่ต้องใช้จริง เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้นโดยส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นไปตามอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ฉะนั้นจึงมีการนิยามอัตราส่วนสมมูล จึงมีการกำหนดส่วนประกอบของสารผสมในรูปของอัตราส่วนของ “อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่อ

อากาศที่ใช้จริง” ต่อ “ อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศพอทางทฤษฎี” ดังแสดงในสมการที่ (2.4) อัตราส่วนสมมูลสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี คือ

(1) ส่วนผสมบาง (Fuel-lean mixture)

เป็นส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่มีค่าน้อยกว่า 1 คือมีเชื้อเพลิงน้อยหรือมีอากาศเกินกว่าค่าพอดี ซึ่งอาจระบุเป็นร้อยละของอากาศเกิน ตัวอย่างเช่น ร้อยละ 25 ของอากาศเกิน การผสมก็จะมีอากาศเป็น 1.25 เท่าของอากาศพอดี

(2) ส่วนผสมพอดี (Stoichiometric mixture)

เป็นส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่มีค่าเท่ากับ 1 กล่าวคือมีเชื้อเพลิงพอดีที่จะถูกออกซิไดส์โดยออกซิเจนในอากาศได้หมด

(3) ส่วนผสมหนา (Fuel-rich mixture)

เป็นส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่มีค่ามากกว่า 1 มีเชื้อเพลิงมากเกินไปหรือมีออกซิเจนน้อยเกินไปที่จะออกซิไดส์เชื้อเพลิงได้ทั้งหมด

$$\phi = \frac{\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_{actual}}{\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_{stoich}} \quad (2.4)$$

โดยที่

ϕ คือ อัตราส่วนสมมูล

$\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_{actual}$ คือ อัตราส่วนผสมระหว่างมวลเชื้อเพลิง-ออกซิเจนที่ใช้จริง

$\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_{stoich}$ คือ อัตราส่วนผสมระหว่างมวลเชื้อเพลิง-ออกซิเจนทางทฤษฎีที่เผาไหม้สมบูรณ์

2.3 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนและแบบผสมภายหลัง

โดยปกติเจ็ทเปลวไฟแบบพุ่งชนถูกใช้ในกระบวนการให้ความร้อน เพราะสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ โดยเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบมีการผสมก่อนระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศ และแบบเกิดการผสมกันภายหลังระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน

2.3.1 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน

กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดจากการผสมระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สกับออกซิเจนในอากาศก่อนจะมีการจุดระเบิด ซึ่งพบว่ากระบวนการเผาไหม้นี้ได้จากการทำงานในกระบอกสูบของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยเมื่อมีการจุดระเบิดซึ่งเป็นการเผาไหม้ในปริมาตรจำกัดทำให้เกิดความดันในกระบอกสูบนั่นสูงขึ้นกะทันหัน เนื่องจากการระเบิดของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากบริเวณจุดระเบิดนั่นเอง

2.3.2 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมภายหลัง

กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊ส (Fuel Gas) แพร่หาออกซิเจนเพื่อไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงและออกซิเจนอยู่คนละด้านของเปลวไฟ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองต่างกัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทเชิงมวลในลักษณะการแพร่ของเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สและออกซิเจนเข้าสู่เปลวไฟ ซึ่งทั้งนี้จะต้องมีส่วนการผสมและปริมาณพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาพอเหมาะ ดังในรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของเปลวไฟเมื่อแบ่งประเภทเปลวไฟตามพฤติกรรมการผสมของเชื้อเพลิง และตัวออกซิได



(ก) เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน

(Premixed flame jet)

(ข) เจ็ทเปลวไฟแบบผสมภายหลัง

(Diffusion flame jet)

รูปที่ 2.4 เจ็ทเปลวไฟ (ก) แบบผสมก่อน (ข) แบบผสมภายหลัง [5]

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบเปลวไฟแบบผสมก่อนและเปลวไฟแบบแพร่แล้ว เปลวไฟแบบแพร่ไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์ได้อย่างง่ายดาย เช่น ความเร็วในการเผาไหม้เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการ กำหนดพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการศึกษาลักษณะเปลวไฟ นอกจากนี้เปลวไฟแบบแพร่ให้ความเสถียรน้อยกว่าและยังก่อให้เกิดมลพิษมากกว่าเปลวไฟแบบผสมก่อน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่วิจัยส่วนใหญ่ไม่นิยมศึกษาเปลวไฟลักษณะแบบแพร่

สำหรับการใช้ประโยชน์เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน (Premixed Flame Jet) มีการใช้ในห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็ก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงโหมมการเผาไหม้ การผสมเชื้อเพลิงแก๊สกับตัวออกซิไดเพื่อที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ความร้อน อีกทั้งลดมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้

2.4 ชนิดของเปลวไฟ

การจัดชนิดของเปลวไฟจะแบ่งตามวิธีการของการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ [6] โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

2.4.1 เปลวไฟที่ไม่ผสมอากาศ

เปลวไฟที่ไม่ผสมอากาศ (Non-aerated Flames) เป็นเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้โดยได้รับอากาศจากบรรยากาศโดยรอบของเปลวไฟ โดยกระบวนการแทรกซึมและแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเปลวไฟ

2.4.2 เปลวไฟที่ผสมอากาศบางส่วน

เปลวไฟที่มีอากาศบางส่วน (Partially Aerated Flames) เป็นเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยกำหนดปริมาณของอากาศประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้ ทั้งนี้ ปริมาณอากาศครึ่งหนึ่งจะถูกผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการสันดาป (เรียกอากาศชุดนี้ว่า Primary Air) เปลวไฟลักษณะนี้จะมีโครงสร้างเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นรูปกรวยภายใน (Inner cone) และชั้นนอก (Outer cone) ในช่วง Preheat ส่วนผสมของแก๊สและอากาศจะถูกเผาไหม้ได้สูงถึง 700 K ถึง 1,000 K ช่วง Primary เป็นส่วนของปฏิกิริยาทางเคมีของส่วนผสม (แก๊สและอากาศ) ซึ่งอุณหภูมิจะสูงได้ถึงกว่า 2,000 K

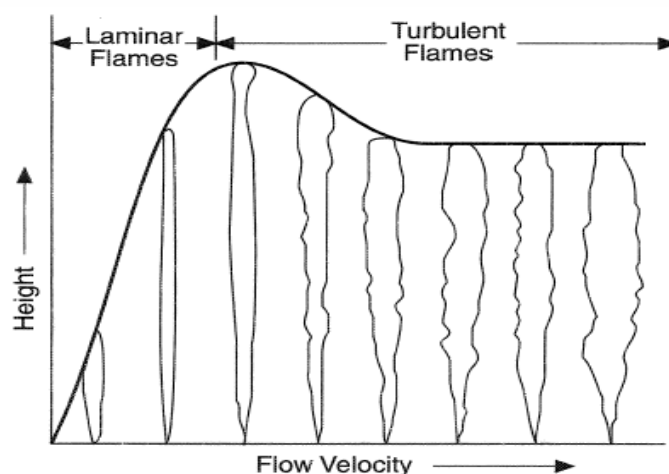
2.4.3 เปลวไฟที่ผสมอากาศพอดี

เปลวไฟที่ผสมอากาศพอดี (Fully Aerated Flames) ลักษณะของเปลวไฟชนิดนี้จะไม่มีส่วนของ Outer Mantle ของเปลวไฟ Secondary Combustion Zone เนื่องจากปริมาณอากาศที่จำเป็นต้องใช้ในการเผาไหม้ ทั้งหมดได้ถูกผสมเข้ากับเชื้อเพลิงก่อนสันดาปแล้ว และไม่จำเป็นต้องอาศัยอากาศโดยรอบเปลวไฟ

2.5 เปลวไฟแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน

เปลวไฟประเภทต่างๆ อาจเป็นผลมาจากวิธีการผสมเชื้อเพลิงและสารออกซิไดเซอร์ เปลวไฟแบบผสมก่อนสามารถเกิดขึ้นได้จากแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันก่อน (Premixed Flame) ที่ จะเข้าสู่หัวฉีดหรืออาจเกิดการผสมหลังจากออกจากฉีดพวกเขาจะเรียกว่าเปลวไฟแบบผสม ภายหลัง (Diffusion Flame) ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สอาจค่อนข้างต่ำ ในกรณีนี้การไหลของแก๊ส ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเป็นแบบราบเรียบ เช่นเดียวกันคือ เปลวไฟที่ได้จะเป็นเปลวไฟแบบราบเรียบ (Laminar Flame) เมื่อเชื้อเพลิงมีความเร็วสูงเกินค่าหนึ่ง ที่ปลายเปลวไฟจะเกิดการปั่นป่วนขึ้น จุด Transition point ที่เริ่มเกิดการปั่นป่วน (แสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.5) จะค่อยๆ เลื่อนต่ำลงเข้าหาฐานของเปลวไฟ จนเชื้อเพลิงมีความเร็วอยู่ในช่วงปั่นป่วน ซึ่งเปลวไฟเกือบทั้งลำ

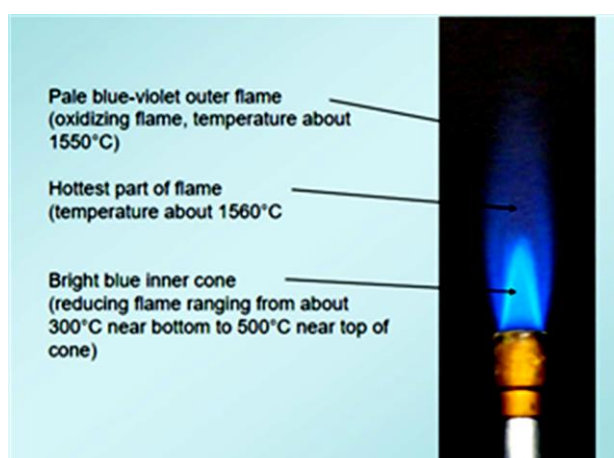
เปลวไฟจะเปลี่ยนเป็นเปลวไฟแบบปั่นป่วน (Turbulent Flame) ดังนั้นจากการเปลี่ยนรูปของเปลวไฟแบบราบเรียบเป็นเปลวไฟปั่นป่วนส่งผลมาจากการเพิ่มความเร็วของของไหล (Flow Velocity)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของเปลวไฟแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน [7]

2.6 อุณหภูมิของเปลวไฟ

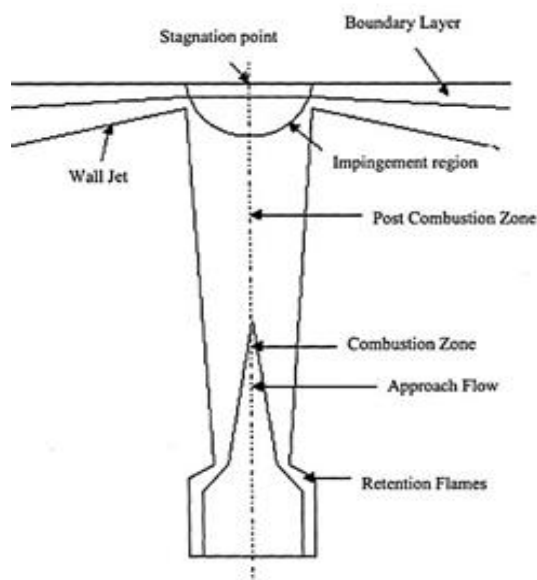
อุณหภูมิของเปลวไฟจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ระหว่างการเผาไหม้และเปลวไฟที่เกิดขึ้น [8] เมื่อถึงจุดที่อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเกิดการระเหยและรวมตัวกับออกซิไดเซอร์อุณหภูมิประมาณ 500°C สร้างแสงสีแดงอุณหภูมิระหว่าง 600°C ถึง $1,000^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดเปลวไฟสีแดงสว่าง อุณหภูมิระหว่าง $1,000^{\circ}\text{C}$ ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ เปลวไฟเปลี่ยนเป็นสีส้ม อุณหภูมิระหว่าง $1,200^{\circ}\text{C}$ ถึง $1,400^{\circ}\text{C}$ เปลวไฟเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และตั้งแต่อุณหภูมิ $1,400^{\circ}\text{C}$ เปลวไฟเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมม่วงแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากสีเปลวไฟ [8]

2.7 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน

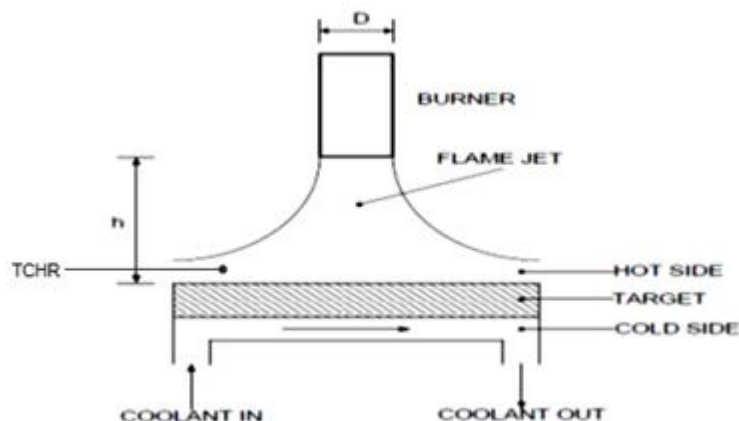
Hemson [9] ได้กล่าวว่า ขณะที่เปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชน เปลวไฟจะเกิดการแบ่งแยกออกเป็น 4 โซน ตามคุณสมบัติและลักษณะของเปลวไฟรูปที่ 2.7 ดังต่อไปนี้ เปลวไฟที่อยู่ใกล้ปากทางออก (Retention Flames) เป็นเปลวไฟมีลักษณะเป็นเปลวไฟเล็กๆ รอบหัวฉีด เพื่อรักษาเปลวไฟตรงกลางให้คงที่ซึ่งมีผลกระทบน้อยมากขณะที่เปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชน แกนกลางของเปลวไฟ (Approach Flow) ซึ่งความยาวในโซนนี้จะแปรผันตามความเร็วของการเผาไหม้ที่เกิดจากการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โซนปฏิกิริยาของการเผาไหม้ (Combustion Zone) เป็นโซนที่ล้อมรอบการไหลจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงส่วนผสมของเชื้อเพลิงต่อออกซิไดเซอร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ และโซนนอกเขตการเผาไหม้ (Post-combustion zone) เป็นเปลวไฟที่เกิดขึ้นในส่วนนี้เป็นการไหลแบบสมบูรณ์ (Fully develop)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน [9]

2.8 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ

การฟุ้งชนของเจ็ทเปลวไฟได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เพราะมีความสำคัญอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นการฟุ้งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวที่ฟุ้งชนซึ่งด้านหลังของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีการใช้น้ำในการระบายความร้อนด้านหลังพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน การฟุ้งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้น ได้แก่ การพาความร้อน (Convection) ปฏิกิริยาการคายความร้อนทางเคมี (Thermo-chemical heat release) การแผ่รังสี (Radiation) และการควบแน่น (Condensation)



รูปที่ 2.8 การพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวพุ่งชน [10]

2.8.1 การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน

การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบผสม (Mixed convection) ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับเป็นการพาความร้อนที่สำคัญต่อการพาความร้อนบนพื้นผิว ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเจ็ทเปลวไฟที่ผ่านมาให้ความสนใจการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟเป็นอย่างมาก เพราะโมเมนต์และมวลในสภาวะความเข้มข้นที่สูง ทำให้การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนระหว่างเปลวไฟไปยังพื้นผิวที่พุ่งชนเป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วและดีกว่าเดิม โดยปกติการถ่ายเทความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวกว่า 80% เป็นการพาความร้อนแบบบังคับ และวิธีการที่สำคัญในการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับเจ็ทเปลวไฟพุ่งชน โดยปกติในโหมดของการถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งไปยังพื้นผิวที่พุ่งชน ดังนั้นเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวจึงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและได้รับความสนใจอย่างมากในการศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน เมื่อความร้อนไหลด้วยการนำในชั้นที่ความเร็วของของไหลเท่ากับศูนย์ จะสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา โดยที่ผลต่างของอุณหภูมิในชั้นนี้จะขึ้นกับความเร็วของของไหล ยิ่งความเร็วของของไหลมีค่ามาก เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่มาก ผลจากการพาทั้งหมดพิจารณาโดยใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ในสมการที่ (2.5)

การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาได้จากสมการ

$$Q = A\bar{h}\Delta T \quad (2.5)$$

โดยที่ \bar{h} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว ($\text{kW/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิของเจ็ทเปลวไฟ – อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)

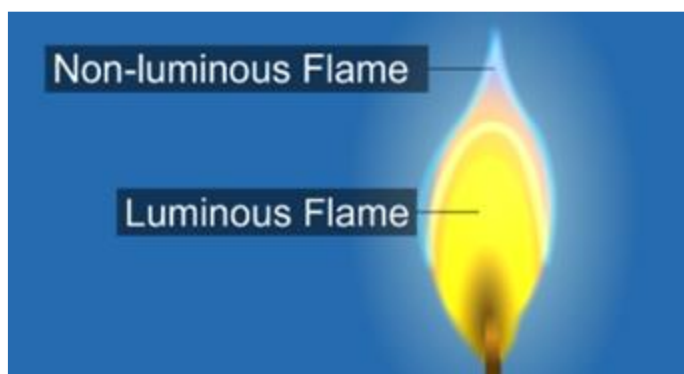
2.8.2 ปฏิกริยาการคายความร้อนทางเคมี

เป็นกลไกที่มีการปล่อยพลังงานโดยการคายความร้อนออกจากตัวออกซิไดเซอร์ที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิของเปลวไฟมีค่าสูง ผลของคายความร้อนจากสารเคมีซึ่งมีบทบาทสำคัญที่เกิดมาจากการรวมตัวกันระหว่างอะตอมและอนุโมเลกุลกลายเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อน

โดยขณะที่อุณหภูมิของเปลวไฟมีค่าสูงขึ้น การเผาไหม้ของเปลวไฟเกิดการกระจายความร้อนไปตามชั้นขอบเขตไปยังบริเวณพื้นผิวที่เย็นกว่า ซึ่งกระบวนการคายความร้อนทางเคมีมักจะบ่งบอกถึงกลไก 2 ประเภทที่จะเกิดขึ้นได้แก่ สภาวะสมดุลทางเคมี และสภาวะการเร่งปฏิกริยาทางเคมี ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นอยู่ในชั้นขอบเขตเจ็ทเปลวไฟพุ่งชน และการแยกตัวทางเคมีของเชื้อเพลิงมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของเปลวไฟโดยตรง อย่างไรก็ตามในการวัดการคายความร้อนจากปฏิกริยาทางเคมีดังกล่าวเป็นไปได้ยากหากจะวัดโดยตรง

2.8.3 การแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ การแผ่รังสีแบบไม่เรืองแสง (Non-Luminous) การแผ่รังสีแบบเรืองแสง (Luminous) และการปลดปล่อยพลังงานจากพื้นผิว (Emission) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ซึ่งเป็นการแผ่รังสีในกรณีที่ไม่มีการเรืองแสงของเปลวไฟ สำหรับการแผ่รังสีความร้อนจากการเรืองแสงของเปลวไฟเกิดขึ้นเมื่อการเผาไหม้นั้นมีอนุภาคของเขม่า ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนในกรณีนี้จะมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง แต่จะไม่พบในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส เช่น แก๊สชีวเทน แก๊สโพรเพน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนมีผลน้อยมากในโหมดการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับการพาความร้อน



รูปที่ 2.9 การแผ่รังสีของเปลวไฟ [10]

2.8.4 การควบแน่น

การควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิมบนพื้นผิวต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งไอน้ำจากการเผาไหม้แก๊สจะเกิดการกลั่นตัวและปลดปล่อย พลังงานออกมา ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน ควรให้อุณหภูมิมบนพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง เพื่อป้องกันไอน้ำระเหยจากการควบแน่น

2.9 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนที่ได้ใช้ในการศึกษานั้น อัตราส่วนสมมูลโดยการศึกษาจะใช้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงคงที่ ความยาวของเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน ระยะจากปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน ปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ ซึ่งมีผลต่อลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟที่ฟุ้งชนบนพื้นผิว

2.9.1 ความยาวของเปลวไฟ

สำหรับการเผาไหม้ที่สมมูลทางทฤษฎี ในโซนของปฏิกิริยาของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน (Premixed flame jet) จะมีลักษณะเป็นสีฟ้าเกิดขึ้นบริเวณส่วนยอดของเปลวไฟ และยาวขึ้นไปในแนวแกนจะมีลักษณะโค้งเข้าหากันบริเวณส่วนยอดของเปลวไฟ ซึ่งความยาวของเปลวไฟมีความสำคัญต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนบนพื้นผิวโดยตรง ในกรณีที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงคงที่พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศความยาวของเปลวไฟจะลดลง และความยาวของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความยาวในส่วนของปากทางที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงบอกได้ว่า นอกจากอัตราส่วนการไหลระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจะมีผลต่อลักษณะและความยาวของเปลวไฟแล้ว ความยาวของทางออกที่ออกจากห้องเผาไหม้เช่นกัน

2.9.2 ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวฟุ้งชน

ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน (Nozzle-to-plate distance, H/D) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิว เป็นตัวแปรหลักที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวและเจ็ทเปลวไฟอิสระก่อนการฟุ้งชน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลและมีผลต่อการพัฒนาการไหลของเจ็ทเปลวไฟ เช่นเดียวกับเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเจ็ทเปลวไฟ ผลทางกายภาพจากการฟุ้งชนพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนและเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อจุดที่เจ็ทฟุ้งชน (Stagnation point) และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการฟุ้งชนของเจ็ทเปลวไฟ การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนมีผลทำให้โครงสร้างของเปลวไฟและอัตราการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชนจะขึ้นอยู่กับ ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะฟุ้งชน พื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของ Potential core ฟุ้งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีค่าความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชนจะลดลง เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่ฟุ้งชนพื้นผิวลดลง

2.9.3 อัตราส่วนสมมูล

อัตราส่วนสมมูลมีผลต่อแนวโน้มในการเกิดเขม่าและระดับการแยกตัวของแก๊สจากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ที่มีอัตราการเผาไหม้เข้าใกล้การเผาไหม้ทางทฤษฎีคือ มีลักษณะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีผลทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟมีค่าสูงสุด

2.9.4 เรย์โนลด์นัมเบอร์

สำหรับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้เป็นตัวกำหนดลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟ ดังนั้นจึงเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน Hargrave และคณะ [11] กล่าวว่าค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น โดยการคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สามารถหาได้จากสมการที่แสดงดังต่อไปนี้

การคำนวณความหนาแน่นผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจากความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ (2.6)

$$\rho_m = \sum y_i \rho_i \quad (2.6)$$

โดยที่ y_i คือ สัดส่วนมวลของสารองค์ประกอบหนึ่งต่อจำนวนโมลรวม
 ρ_i คือ ความหนาแน่นของสารองค์ประกอบหนึ่ง (kg/m^3)

การคำนวณหาความหนืดผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจากความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ (2.7)

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_j x_j \sqrt{M_j}}{\sum x_j \sqrt{M_j}} \quad (2.7)$$

โดยที่ μ_j คือ ความหนืดของสารองค์ประกอบหนึ่ง (km^2/s)
 x_j คือ สัดส่วนจำนวนโมลของสารองค์ประกอบหนึ่งต่อจำนวนโมลรวม
 M_j คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารองค์ประกอบหนึ่ง

โดยการหาเรย์โนลด์นัมเบอร์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$\text{Re} = \frac{\rho_m V_m D}{\mu_m} \quad (2.8)$$

โดยที่ V_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส LPG ผสมอากาศที่หน้าตัด (m/s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ (m)

2.10 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อน

Zhang และ Bray [12] ได้ศึกษารูปร่างและโครงสร้างของเปลวไฟ และได้เสนอพื้นฐานในการเผาไหม้ของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนไว้ 5 แบบ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการทดลองทางปฏิกิริยาของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวได้แก่ Conical flame, Disc flame, Envelop flame, Ring flame และ Cool central core flame เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นมีผลต่อรูปร่างของเปลวไฟและเสถียรภาพของเปลวไฟโดยตรง

Cremers และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟแบบราบเรียบที่มีการผสมก่อน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดยอดของชั้น Primary cone และจะทำให้ชั้น Cool central core flame ลดลงด้วย

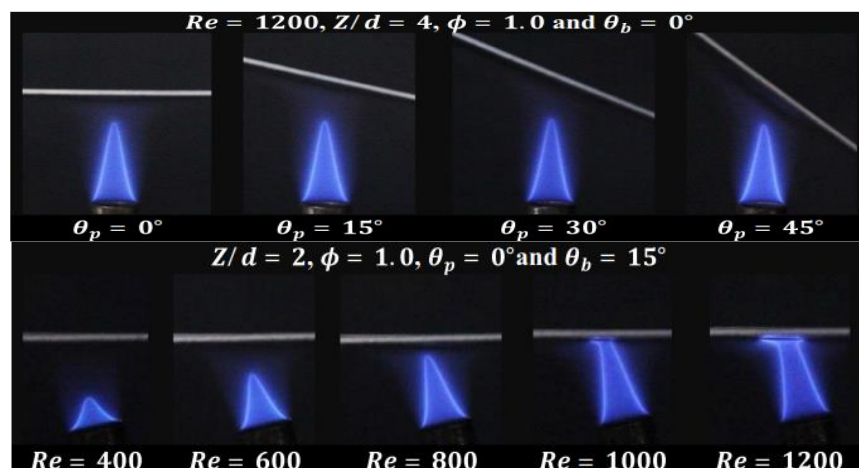
Remie และคณะ [14] ได้ใช้โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ด้านการไหล ANSYS ในการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เพื่อยืนยันกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ พบว่าผลจากทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน หลังจากนั้น Remie และคณะ [15] ได้ทดลองวัดการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นควอตซ์ที่ถูกเปลวไฟแบบผสมก่อนระหว่างมีเทนและออกซิเจน โดยใช้เทคนิควัดการเรืองแสงจากสารเคลือบเทอร์โมกราฟิฟอสฟอรัส เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ของฟลักซ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

Tuttle และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการกระจายของฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกเจ็ทเปลวไฟผสมระหว่างมีเทนและอากาศพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทกับพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟโดยวิธีถ่ายภาพ พบว่าที่เงื่อนไขระยะพุ่งชนน้อยกว่า 14 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท เปลวไฟจะมีลักษณะเสถียรและมีโครงสร้างเปลวไฟที่สมมาตร แต่ที่ระยะพุ่งชนสูงกว่าที่กล่าว จะสังเกตเห็นการสั่นของเปลวไฟซึ่งเป็นผลจากแรงลอยตัวทำให้เปลวไฟไม่เสถียร เปลวไฟที่มีค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำกว่า 2 จะมีโครงสร้างเป็นเปลวไฟเจ็ทแบบผสมก่อน แต่จะแสดงลักษณะโครงสร้างเปลวไฟแบบแพร่เมื่อมีอัตราส่วนสมมูลสูงที่ขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลจะมีผลทำให้เปลวไฟในบริเวณผนังมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เปลวไฟที่บริเวณตำแหน่งเจ็ทอิสระและตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟแบบผสมก่อนจะสูงกว่าของเปลวไฟแบบแพร่ เนื่องจากการคายความร้อนแก่พื้นผิวของเปลวไฟจะรวดเร็วกว่า

Tuttle และคณะ [17] ได้ทำการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนที่เวลาแตกต่างกันและแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในรูปของ RMS (Root mean square), PDF (Probability distribution function) และ PSD (Power spectral density) พบว่าเปลวไฟแบบผสมก่อนจะให้การเปลี่ยนแปลง

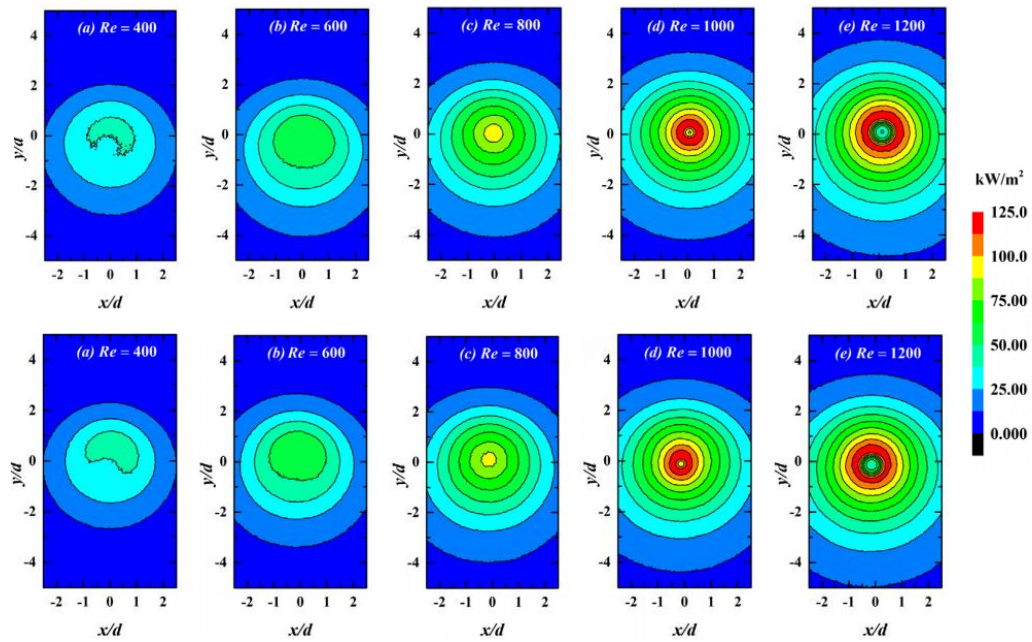
ของฟลักซ์ความร้อนแบบ RMS และลักษณะของความถี่จะบ่งบอกถึงโครงสร้างของการไหล แบบหมุนวนที่เกิดจากแรงลอยตัวในชั้นการไหลแบบเฉือนระหว่างแก๊สอากาศร้อนกับอากาศที่อยู่รอบๆ ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับกรณีของเปลวไฟแบบแพร่

Kuntikana และ Prabhu [18] การใช้เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนโดยการติดตั้งให้เจ็ทมีลักษณะเอียงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการใช้เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนเอียงทำมุมปะทะแผ่นฟุ้งชน อีกทั้งในการศึกษาครั้งนี้แผ่นฟุ้งชนที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนจะเอียงตามมุมที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อทราบถึงการถ่ายเทความร้อนบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการศึกษาที่ 400 ถึง 1,200 ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ถึง 1.5 การเอียงของเจ็ทเปลวไฟและแผ่นฟุ้งชนตั้งแต่มุม 0° ถึง 45° และสำหรับการศึกษาเจ็ทเอียงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ 2D ถึง 6D ซึ่งในขณะที่เปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชนมีความเสถียรจะบันทึกผลด้วยกล้องดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 2.10



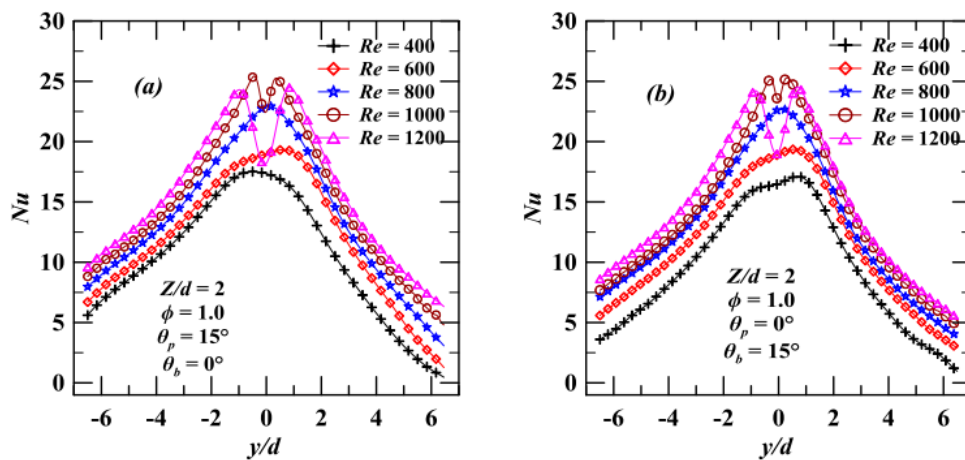
รูปที่ 2.10 เจ็ทเปลวไฟอิสระขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนในกรณีการศึกษาต่างๆ [18]

จากการศึกษาการกระจายตัวในการถ่ายเทความร้อนขณะเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวแล้วอีกทั้งยังศึกษาการกระจายตัวค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ขณะเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวซึ่งถูกบันทึกผลผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน สำหรับระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ระยะ 2D โดยการทดลองที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 400 ถึง 1,200 สังเกตได้ว่าบริเวณโคนเปลวไฟที่สัมผัสกับแผ่นฟุ้งชนโดยตรงทำให้บริเวณกึ่งกลางของแผ่นฟุ้งชนที่ปะทะกับเปลวไฟให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดจากเปลวไฟที่มีความยาวมากขึ้นส่งผลให้โคนเปลวไฟสัมผัสโดยตรงต่างจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ จากผลการทดลองในรูปที่ 2.11 พบว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนจี้ทเพลวไฟเอียงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน [18]

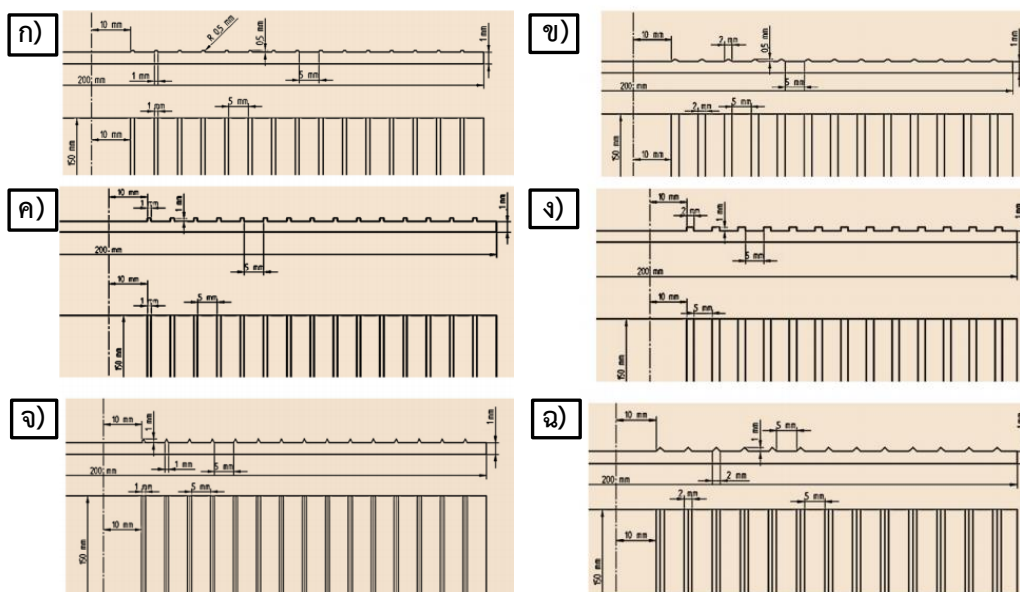
นอกจากการศึกษาการกระจายตัวในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแล้ว และกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทตามแนวรัศมีขณะที่จี้ทเพลวไฟเอียงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนและจี้ทเพลวไฟขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนเอียงโดยการทำมุมที่ 15° พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากรูปที่ 2.12 สังเกตได้ว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 1,000 และ 1,200 บริเวณกึ่งกลางของเพลวไฟเกิดการเย็นตัวขึ้นทำให้การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ลดลง และผลจากการกระจายตัวค่าสัมประสิทธิ์พบว่ามีเมื่อเพลวไฟเอียงปะทะแผ่นฟุ้งชนจะให้การกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่ากรณีแผ่นฟุ้งชนเอียง



รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทตามระยะ y/d [18]

จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับโมเมนตัมและแรงลอยตัวในการเอียงของเจ็ทและจะทำให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดเมื่อมีการเผาไหม้สมบูรณ์ ในส่วนของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ส่งผลทำให้เปลวไฟมีความยาวสูงขึ้น ถึงแม้ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นส่งผลให้ค่านัสเซิลนัมเบอร์บริเวณกึ่งกลางของเจ็ทเปลวไฟลดลงก็ตาม แต่ยังคงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่า การใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนในกรณีไม่ทำมุมใดๆ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่ากรณีเจ็ทเอียงหรือแผ่นพุ่งชนเอียง

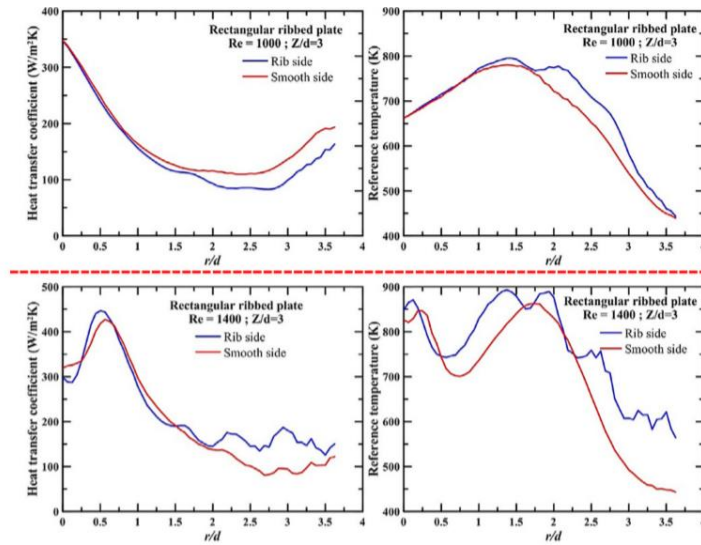
Kadama และคณะ [19] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟผสมก่อนโดยใช้มีเทนกับอากาศก่อนจะเข้าสู่หัวเจ็ท ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนขณะเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนแผ่นพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษาด้วยการติดครีบบนลักษณะวงกลม สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมดังในรูปที่ 2.13 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 600 ถึง 1,800 ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนที่ 2D และ 4D โดยการทดลองจะเก็บผลโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.13 แผ่นพุ่งชนติดครีบบ (ก) ครีบบวงรี (ข) ครีบบวงกลม

(ค) ครีบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ง) ครีบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (จ) ครีบบสามเหลี่ยม (ฉ) ครีบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว [19]

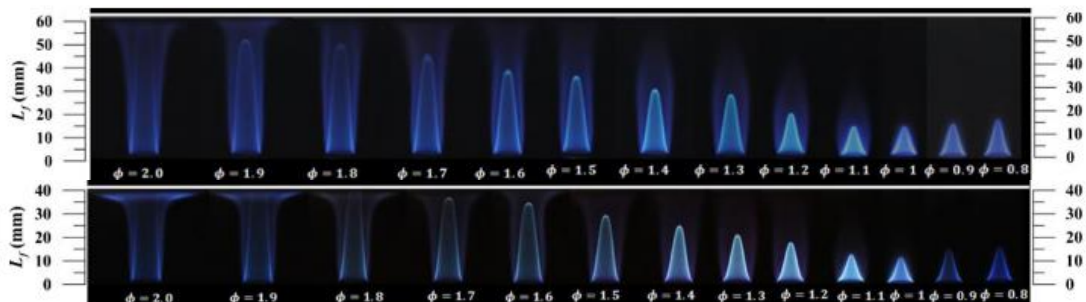
จากผลการทดลองพบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณที่แผ่นพุ่งชนมีครีบบและในส่วนของพื้นผิวพุ่งชนที่เรียบ ในระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนน้อยๆ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ จะให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงในบริเวณจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) และมีค่าสูงขึ้นบริเวณรอบๆ จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) และสังเกตได้ว่าบริเวณนั้นเป็นบริเวณพื้นผิวเรียบเป็นช่องว่างระหว่างครีบบที่ติดในแผ่นพุ่งชนแสดงผลดังในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [19]

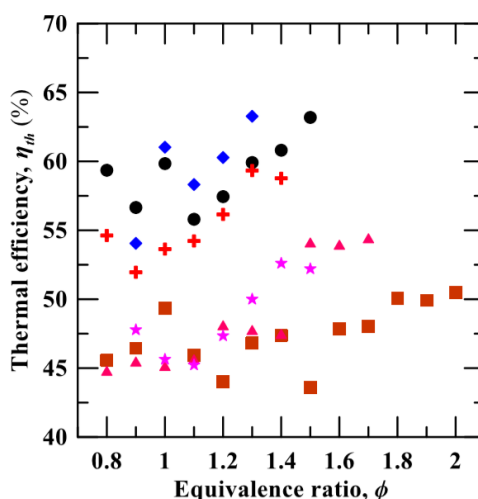
การใช้เจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนพุ่งชนแผ่นพุ่งชนที่มีครีบพบว่า การติดครีบบนแผ่นพุ่งชนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงถึงแม้ว่าอุณหภูมิของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยลักษณะครีบที่ติดบนแผ่นพุ่งชนจะยื่นออกมาเล็กน้อยซึ่งทำให้แรงโมเมนตัมที่พื้นผิวลดลงซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงด้วยเช่นกัน

Kuntikana และ Prabhu [20] ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับหัวเผาไหม้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจุบันได้มีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้มีเทนผสมอากาศในเจ็ทเปลวไฟแบบท่อขณะพุ่งชนพื้นผิว ในการทดลองได้กำหนดพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ตั้งแต่ 500 ถึง 1,200 อัตราส่วนสมมูลตั้งแต่ 0.8 ถึง 2.0 และระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน 4D และ 6D ซึ่งในการศึกษานอกจากศึกษาการถ่ายเทความร้อนแล้ว ได้ทำการวัดอุณหภูมิเปลวไฟด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ที่บันทึกผลของอุณหภูมิเปลวไฟด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ซึ่งลักษณะโครงสร้างเปลวไฟขณะปะทะพื้นผิวจะถูกบันทึกผลโดยกล้องดิจิทัลและแสดงผลตัวอย่างดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เปลวไฟปะทะแผ่นพุ่งชนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน 4D และ 6D [20]

สมรรถนะทางความร้อนนั้นถูกวัดในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อน พบว่าเปลวไฟที่ใช้ในการทดลองเต็มไปด้วยเปลวไฟสีฟ้าก็ตาม ถึงแม้ว่าการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์สำหรับเปลวไฟที่อุดมไปด้วยเชื้อเพลิง แต่การถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นนั้นได้จากความสูงเปลวไฟที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่ดีที่สุดจะสังเกตได้เมื่อส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนสมมูลสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ พบว่าตำแหน่งจุดหยุดนิ่งของเปลวไฟที่ปะทะกับแผ่นฟุ้งชนมีบทบาทสำคัญในการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อนในการทดลองที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.25 ที่ระยะฟุ้งชน 4D พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้เป็นผลที่ควรนำมาใช้งานจริงได้ดีที่สุดแสดงผลดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพทางความร้อนในแต่ละอัตราส่วนสมมูล [20]

จากสรุปผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดในทุกกรณีที่เกิดเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่เมื่อกำหนดให้เจ็ทเปลวไฟมีระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนตามที่กำหนด พบว่าประสิทธิภาพในการให้ความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลอันเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้เปลวไฟมีความสูงขึ้นและปะทะกับแผ่นฟุ้งชนได้ทั่วถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน

2.10.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน

Guillaume และคณะ [21] กล่าวว่า การหมุนวนถูกนำมาใช้กับเปลวไฟมากยิ่งขึ้นในอุตสาหกรรม เพราะมีความเสถียรเป็นอย่างมากในกระบวนการเผาไหม้ที่ต้องการความเข้มข้นสูง การหมุนวนที่นำมาใช้ คือ การปรับปรุงเสถียรภาพของเปลวไฟอันเป็นผลมาจากการก่อตัวของโซนการหมุนเวียนแบบวงแหวน เพื่อลดระยะเวลาในการเผาไหม้โดยการนำของเหลวรอบข้างเข้ามาผสมได้อย่างรวดเร็วภายใต้ขอบเขตการหมุนวนที่เกิดขึ้น

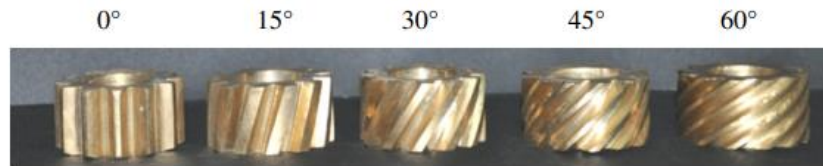
Huang และคณะ [22] ได้นำเทคนิคการไหลแบบหมุนวนในอากาศมาใช้กับเชื้อเพลิงที่มีการผสมก่อนระหว่างอากาศและบิวเทนโดยใช้หัวฉีดแบบท่อที่มีทางเข้าอากาศสองช่องทางและแกนกลางของท่อจะเป็นทางเข้าของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยการศึกษาภายใต้การไหลแบบราบเรียบที่ค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ 800 ถึง 1,700 เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชนที่ 1.5D ถึง 4.0D พบว่าภายใต้ความดันบรรยากาศที่ต่ำในค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์แบบราบเรียบ การใช้เทคนิคการหมุนวนสำหรับเจ็ทเปลวไฟแบบผสมก่อนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าเจ็ทเปลวไฟแบบทั่วไป

Luo และคณะ [23] ได้ทำการทดลองความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนที่ใช้ตัวแปรในการทดลองทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ อัตราส่วนผสม และระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชน เพื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทเปลวไฟแบบไม่มีการหมุนควงในตัวแปรการทดลองเดียวกัน พบว่าเปลวไฟที่มีการหมุนควงเกิดจากการนำอากาศบริเวณรอบปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟมาผสมกับส่วนผสมในขณะที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ที่ได้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่ากรณีแบบเจ็ทเปลวไฟโดยไม่มีการหมุนควง อีกทั้งการกระจายตัวในการถ่ายเทความร้อนขณะปะทะแผ่นพุ่งชนพื้นผิวมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวแผ่นพุ่งชนและเกิดเป็นวงกว้างทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่ามากกว่ากรณีแบบเจ็ทเปลวไฟไม่มีการหมุนวนมากถึง 20%

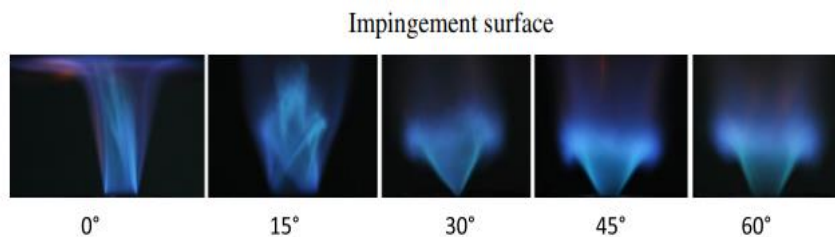
Zhao และคณะ [24] การใช้เทคนิคการหมุนวนเป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้นและได้นำเทคนิคดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเจ็ทเปลวไฟแบบกลุ่มที่เจาะรูบริเวณปากทางออกเป็นสามทาง โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ อัตราส่วนผสม และระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนในกรณีเดียวกัน จากการทดลองพบว่าเปลวไฟหมุนควงที่เกิดมีลักษณะสั้นทำให้การถ่ายเทความร้อนขณะปะทะพื้นผิวในระยะห่างระหว่างแผ่นที่สูงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ได้ต่ำกว่ากรณีเปลวไฟแบบกลุ่ม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างแผ่นพุ่งชนต่ำๆ พบว่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่าสูงถึง 45% อย่างไรก็ตามนอกจากระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยตรงแล้ว ยังพบว่าเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ยังส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นอีกด้วย อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วนผสมทำให้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้มีค่ามากยิ่งขึ้น ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง

Singh และ Chander [25] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนวนแบบผสมก่อนโดยใช้ CNG กับอากาศเป็นส่วนผสมขณะปะทะแผ่นพุ่งชน อีกทั้งจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนวนขณะปะทะแผ่นพุ่งชนด้วยการถ่ายภาพนิ่งด้วยกล้องดิจิทัล โดยการศึกษาได้กำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์เท่ากับ 3,500 ถึง 6,000 อัตราส่วนผสมเท่ากับ 1 ถึง 1.5 และระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนตั้งแต่ 1D ถึง 6D นอกจากนี้ตัวกำเนิดการหมุนวนใช้เทคนิค

การกัดเป็นเกลียวที่แตกต่างไปตั้งแต่ 0° ถึง 60° ดังแสดงรูปที่ 2.17 ซึ่งทำให้โครงสร้างของเปลวไฟหมุนวนเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 2.18

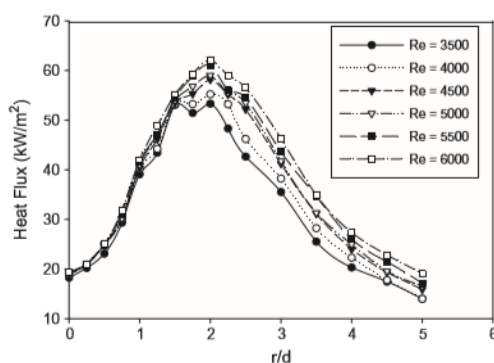


รูปที่ 2.17 ตัวกำเนิดการหมุนวนในแต่ละองศาของ Singh และ Chander [25]

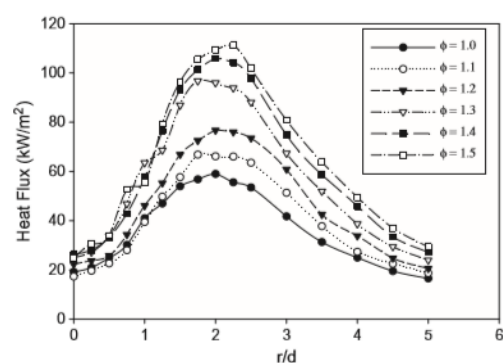


รูปที่ 2.18 เปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชน [25]

จากการทดลองสังเกตได้ว่าการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทำได้ดีที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนเท่ากับ $4D$ ที่เกลียวเท่ากับ 60° ดังแดงในรูปที่ 2.19 เนื่องจากเปลวไฟหมุนวนที่ได้มีการแยกตัวออกเป็นวงกว้าง การยกตัวของโซนปฏิกิริยาของเปลวไฟทำให้ปะทะพื้นผิวพุ่งชนโดยตรง ทำให้การกระจายตัวในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเกลียวในองศาอื่นๆ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น และการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการดึงอากาศในรอบลำเจ็ทมาเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ที่ได้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



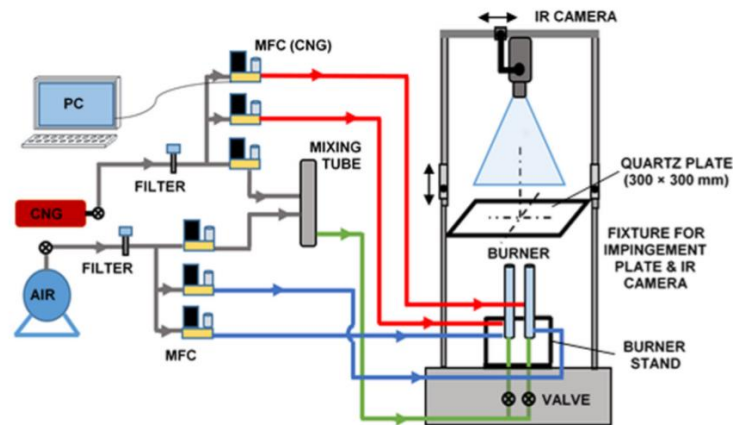
(ก) $H=4D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1



(ข) $H=4D$ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 5,000

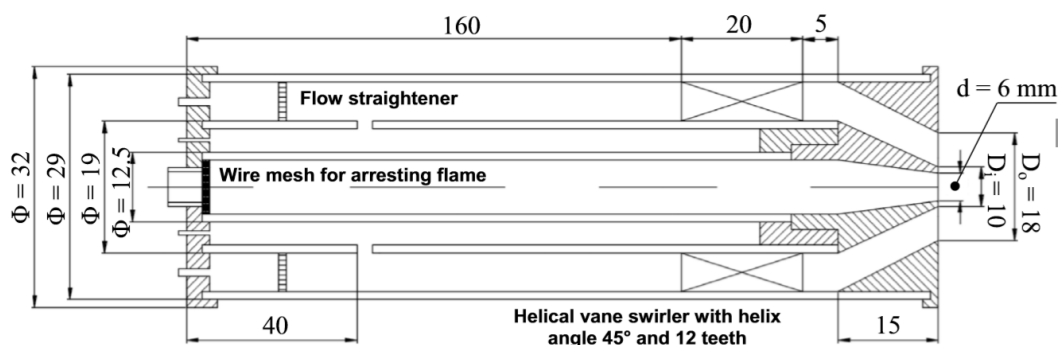
รูปที่ 2.19 กราฟการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (ก) ที่ $H=4D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1 ในค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ (ข) ที่ $H=4D$ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 5,000 ในอัตราส่วนสมมูลต่างๆ [25]

Singh และ Chander [26] ได้ทำการทดลองและทดสอบเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะพื้นผิวพุ่งชนแบบเรียบ โดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวเรียบ และมีการนำความร้อนแบบผกผัน (IHCP) ถูกมาใช้ในการคำนวณฟลักซ์ความร้อนที่กระทบบนพื้นผิวที่ถูกถ่ายโดยกล้องถ่ายภาพความร้อนดังชุดทดลองที่แสดงในรูปภาพที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนผังชุดทดลองของ Singh และ Chander [26]

ลักษณะโครงสร้างตัวกำเนิดเปลวไฟหมุนควงที่ใช้ศึกษาแสดงในรูปภาพที่ 2.21 ที่มีทางออกของเชื้อเพลิง 2 ส่วน ได้ทำการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวพุ่งชนที่ $2.5D_h$, $4D_h$, $6D_h$ และ $8D_h$ และระยะห่างระหว่างเจ็ท $4D_h$, $6D_h$, $8D_h$ และ $10D_h$ โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ทางด้านในเท่ากับ 700, 1,000, 1,300 และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ทางด้านนอกเท่ากับ 7,000, 9,000, 11,000, 13,000 ภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้สมบูรณ์

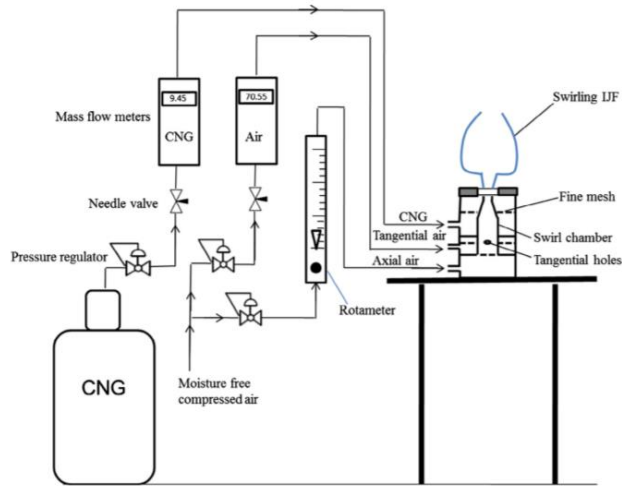


รูปที่ 2.21 ลักษณะโครงสร้างตัวกำเนิดเปลวไฟที่ใช้ในการทดลองของ Singh และ Chander [26]

ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวและค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ถูกคำนวณที่ระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างรูเจ็ทต่างๆ และจากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวจะสูงที่สุดที่

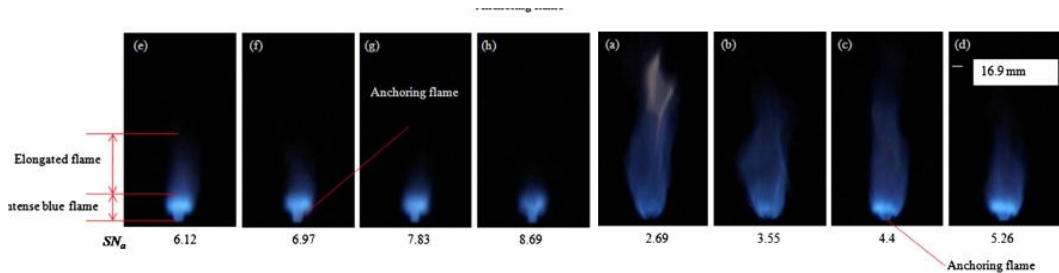
ระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างรูเจ็ทที่เล็กที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงการศึกษพบว่าที่ระยะพุ่งชน $2.5D_h$ และระยะห่างระหว่างรูเจ็ท $8D_h$ เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด

Mahesh และ Mishra [27] ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของเจ็ทเปลวไฟที่หมุนควงในทิศทางตรงกันข้าม โดยสร้างจากโมเดลหัวฉีดในรูปที่ 2.22 และได้ทำการศึกษามากมาย อธิ ลักษณะของเปลวไฟที่มองเห็น ความสูงของเปลวไฟที่มองเห็นได้ อุณหภูมิในการแบ่งแยกของลำเปลวไฟ รังสีที่เปลวไฟแผ่ออกมา และอีกทั้งลักษณะของเสียงเปลวไฟที่เกิดขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นศึกษาความเป็นไปได้ในการโน้มเอียงหาขีดจำกัดของเปลวไฟที่หมุนในทิศทางตรงข้ามด้วยการใช้สแวลด์นัมเบอร์ (Swirling number) เป็นตัวแปรควบคุม



รูปที่ 2.22 แผนผังจำลองการทดลองและหัวเจ็ทเปลวไฟที่ใช้ในการเกิดเปลวไฟหมุนวนทิศทางตรงกันข้ามของ Mahesh และ Mishra [27]

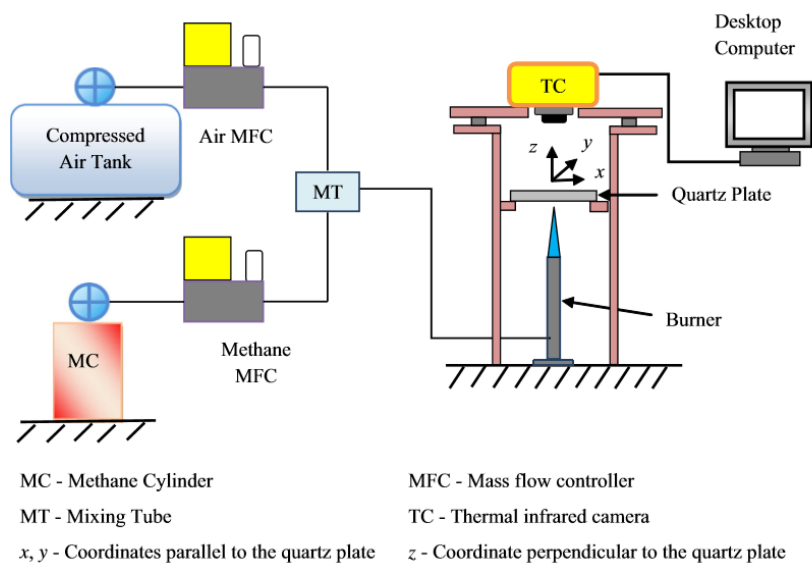
โดยการทดลองตั้งอยู่บนการสังเกตของลักษณะปรากฏที่มองเห็นได้ของเปลวไฟที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกันด้วยสแวลด์นัมเบอร์ในรูปที่ 2.23 นอกจากนี้ความสัมพันธ์แบบ Semi-Empirical สำหรับความสูงของเปลวไฟและการโน้มเอียงหาขีดจำกัดของการระเบิดถูกพยายามทำให้สำเร็จในวิจัยฉบับนี้ เพื่อจะเป็นงานที่สามารถใช้สำหรับดีไซน์และพัฒนาต่อในระบบการเผาไหม้ในอนาคตที่สามารถใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนในทิศทางตรงข้ามกันได้อย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.23 ลักษณะเปลวไฟหมุนควงในทิศทางตรงข้ามใน [27]

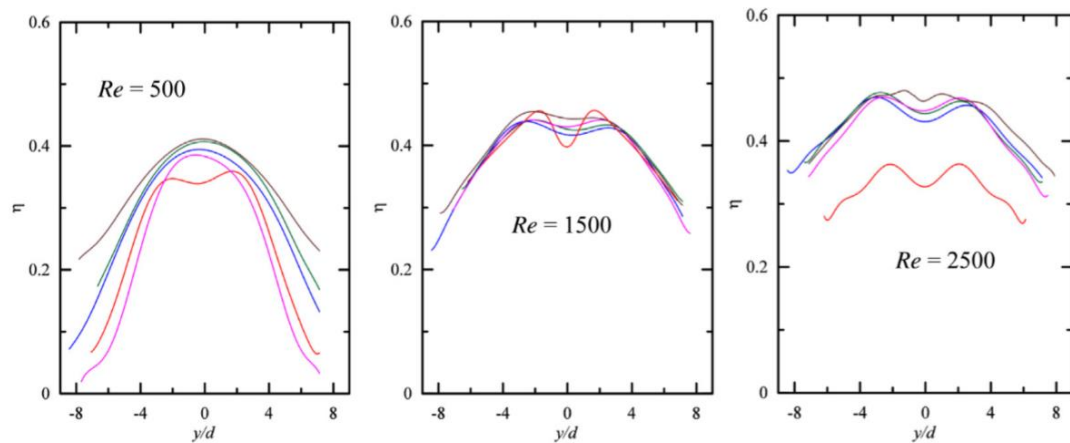
นอกจากนี้การพยายามทำความเข้าใจรูปร่างลักษณะการไหลและโครงสร้างของเปลวไฟที่หมุนในทิศทางตรงข้ามโดยใช้การทดสอบระบบเชิงตัวเลข การจัดเรียงเจ็ทเปลวไฟหมุนในทิศทางตรงข้ามกันถูกศึกษาในงานนี้คือความสามารถของการเกิดเปลวไฟสีน้ำเงินที่ถูกอัดไว้แน่นด้วยความร้อนที่ดีขึ้นและลักษณะโครงสร้างของการไหลที่เกิดขึ้นด้วยความเสถียร ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตได้อย่างหลากหลาย

Hindasageri และคณะ [28] ได้ศึกษาผลกระทบของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่มีการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรมตามวัตถุประสงค์ในการใช้ความร้อน วัตถุประสงค์ของการนำเสนอ งานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาผลของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะพื้นผิวฟุ้งชน โดยลักษณะการเกิดการหมุนควงครั้งนี้จะใช้แผ่นบิตจำนวน 4 แบบ และได้ติดตั้งชุดทดลองตามในรูปที่ 2.24 ที่แผ่นบิตอัตราส่วน 2, 3.2, 4.5 และ 7.5 (หรือที่ Corresponding swirl numbers 0.79, 0.49, 0.35 และ 0.21 ตามลำดับ) ถูกใช้ในการทดลองเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 500 ถึง 2,500 ที่อัตราส่วนของค่าสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ตั้งแต่ 0.7 ถึง 1.5 และศึกษาระยะฟุ้งชนที่ 2D และ 4D ตามลำดับ



รูปที่ 2.24 แผนผังชุดทดลองของ Hindasageri และคณะ [28]

จากผลของการหมุนควงที่เกิดขึ้นถูกเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีแถบในตัวเจ็ทเปลวไฟ โดยจะทำการประเมินการกระจายค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวและความสัมพันธ์ของความหลากหลายของจากฟลักซ์ความร้อนดังในรูปที่ 2.25

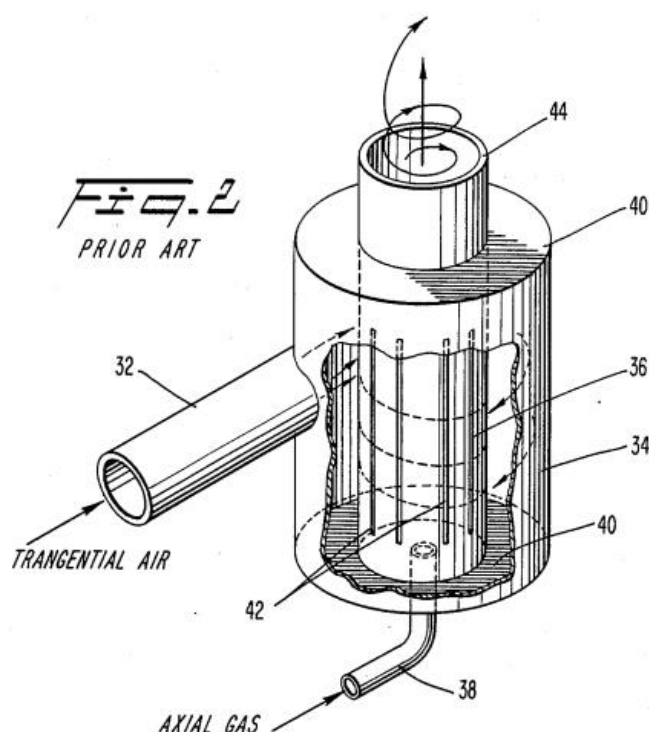


รูปที่ 2.25 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 500, 1,000 และ 1,500 [28]

สำหรับในกรณีแผ่นพุงชนที่ 2D ภายในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เท่าจากจุดพุงชน และ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดพุงชน จากการทดลองพบว่าการหมุนจะเพิ่มการกระจายของค่าฟลักซ์ความร้อนได้ 40-140% ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ ส่วนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์สูง ผลของการหมุนมากขึ้นและพบว่าทำให้การกระจายการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว 10-40%

2.10.3 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

สิทธิบัตรเลขที่ US4879959 [29] เสนอห้องสร้างการไหลแบบหมุนวนในเผาไหม้ เพื่อเพิ่มการเสียดสีในเปลวไฟและรวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้การสร้างการไหลแบบหมุนวนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ หัวเผาไหม้แบบหมุนวน (Swirl burner) และห้องเผาไหม้แบบไซโคลน (Cyclone combustion chamber) ซึ่งในสิทธิบัตรนี้ได้เปิดเผยถึงห้องเผาไหม้แบบไซโคลนสร้างการไหลหมุนวนควงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังรูปที่ 2.26 โดยแกนกลางของห้องจะเป็นทางเข้าสำหรับแก๊ส และด้านข้างของห้องเผาไหม้จะเป็นช่องทางเข้าสำหรับอากาศ โดยเชื้อเพลิงจะถูกผสมเข้ากับอากาศที่เกิดการหมุนวนภายในจนเกิดเป็นเปลวไฟหมุนวน



รูปที่ 2.26 โมเดลห้องเผาไหม้แบบไซโคลนสร้างเปลวไฟหมุนวน [29]

สิทธิบัตรเลขที่ US9541294B2 [30] ได้เปิดเผยหัวเผาไหม้แบบมีห้องผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศภายในตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยเชื้อเพลิงจะไหลจากทางด้านล่างของหัวเผาไหม้ทำให้เมื่อเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผาไหม้ในปริมาณมากขึ้น เกิดการดันเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนของห้องเผาไหม้ โดยที่ทางออกสำหรับเชื้อเพลิงจะถูกทำมุมกับแกนกลางของห้องเผาไหม้ในบริเวณเส้นรอบวงของหัวเผาไหม้ จึงทำให้เชื้อเพลิงที่ถูกดันออกมานั้นเป็นการไหลแบบหมุนวน ซึ่งในส่วนของเข้าของอากาศจะเข้าจากทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ ปากทางออกของอากาศจะอยู่ในแนวเดียวกับแกนกลางของห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ภายในหัวเผายังติดตั้งตัวจุดเปลวไฟไว้ในห้องเผาไหม้ โดยถูกควบคุมผ่านสวิทช์ที่ถูกติดตั้งอยู่ภายนอกหัวฉีด

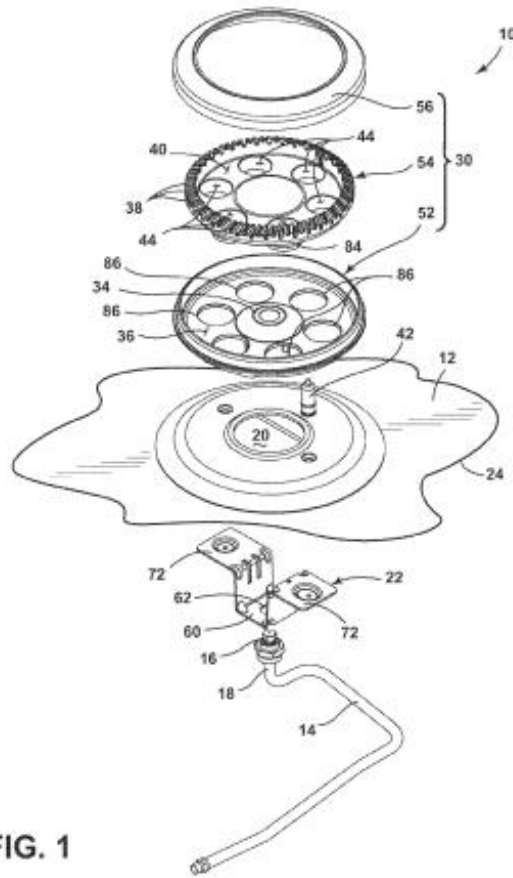
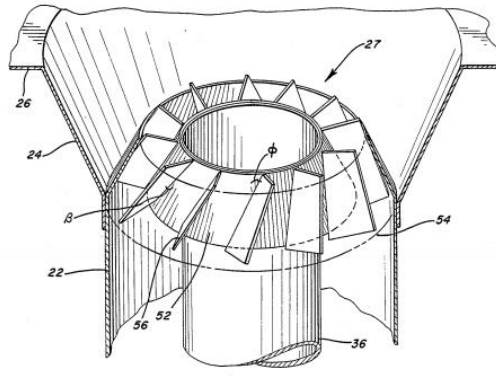


FIG. 1

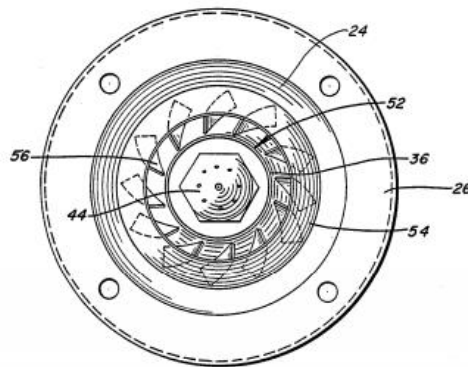
รูปที่ 2.27 โมเดลห้องเผาไหม้สร้างเปลวไฟหมุนควง [30]

สิทธิบัตรเลขที่ US4884555 [31] ได้เสนอหัวฉีดที่สร้างเปลวไฟหมุนควงสามารถให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ดีเมื่อเทียบกับเปลวไฟแบบอื่น และเปลวไฟหมุนควงเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากสำหรับการใช้การไหลในลักษณะแบบปั่นป่วนเมื่อส่วนผสมดังกล่าวถูกผสมก่อนแล้วระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ที่สามารถทำให้เปลวไฟหมุนควงที่ออกมาที่มีความเสถียรและเหมาะสมแก่การให้ความร้อนเป็นอย่างมาก จึงได้ทำการเปิดเผยการใช้ห้องเผาไหม้แบบสร้างการไหลหมุนควงให้ความร้อนกับน้ำโดยผ่านผนังของถังน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งภายในถังจะมีห้องเผาไหม้ภายในเป็นที่สำหรับติดตั้งหัวเผาไหม้แบบสร้างการไหลหมุนควงแสดงโมเดลในรูปที่ 2.28 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงซ้อนทับกันสองส่วน โดยภายในเป็นห้องทรงกระบอกสำหรับเป็นทางเข้าของเชื้อเพลิง ซึ่งในส่วนทางเข้าของอากาศจะมีท่อสำหรับอากาศแยกออกจากหัวฉีด



รูปที่ 2.28 โมเดลหัวฉีตสร้างเปลวไฟหมุนควง [31]

นอกจากนี้บริเวณปากทางออกของหัวฉีตจะถูกติดตั้งครีบทัดการไหลทำมุมกับแกนกลางของหัวฉีตที่ 30° แสดงมุมมองด้านบนในรูปที่ 2.29 เมื่อของไหลทั้งสองชนิดไหลเข้าสู่หัวฉีต เชื้อเพลิงจะไหลออกสู่แกนกลางของหัวฉีต ส่วนอากาศจะไหลผ่านทางครีบที่ถูกติดตั้งบนปากทางออก ซึ่งของไหลที่ไหลออกสู่บริเวณปากทางออกเกิดการผสมกันจนเป็นการไหลวน ทำให้เปลวไฟที่ออกจากหัวฉีตมีลักษณะเป็นเปลวไฟหมุนควง



รูปที่ 2.29 โมเดลด้านบนของหัวฉีตสร้างเปลวไฟหมุนควง [31]

2.10.4 สรุปการทบทวนเอกสาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา มุ่งเน้นถึงการใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวแบบผสมก่อนพบว่าในปัจจุบันการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว ไม่ว่าจะเป็นการใช้เจ็ทเปลวไฟแบบท่อพุ่งชนพื้นผิว หรือจะเป็นการใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว ล้วนเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการเชื่อมเหล็ก อุตสาหกรรมการผลิตแก้ว หรือจะเป็นอุตสาหกรรมสำหรับการแปรรูปอาหาร เป็นต้น จากการทบทวนเอกสารพบว่าการใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงมีโครงสร้างเสถียรกว่า ไม่ดับในขณะที่ใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเปลวไฟแบบท่อที่สามารถดึงอากาศรอบๆ ปากทางออกมาผสมในลำเปลวไฟได้ดีกว่ากรณีแบบท่อ เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวและพิจารณาถึงใน

เรื่องความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เปลวไฟหมุนควงขณะปะทะพื้นผิวมีการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนที่เกิดจากการบานตัวของเปลวไฟ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เชื้อเพลิงเปลวไฟหมุนควงฟุ้งชนพื้นผิวมีค่าสูงกว่ากรณีใช้เชื้อเพลิงเปลวไฟแบบท่อมากถึง 20-40% ทั้งนี้จากการสร้างเปลวไฟหมุนควงมีหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น การใช้แผ่นปิดสอดเข้าไปในหัวฉีดเพื่อสร้างการไหลให้เกิดการหมุนวนซึ่งเป็นวิธีการที่ซับซ้อน และยุ่งยากหากนำไปใช้จริง

2.10.5 ช่องว่างงานวิจัย

จากการศึกษาเปลวไฟโดยหัวฉีดแบบท่อพบว่า เปลวไฟสามารถให้ความร้อนสูงได้เฉพาะจุดที่เปลวไฟปะทะโดยตรงเท่านั้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเปลวไฟหมุนควง เปลวไฟที่ออกมามีลักษณะบานออกเป็นวงกว้างและสามารถให้ความร้อนได้สม่ำเสมอ นอกจากนี้พบว่า ยังไม่มีการประยุกต์สร้างห้องทรงกระบอกภายในตัวหัวฉีดที่สามารถทำให้ส่วนผสมที่ไหลเข้ามาภายในฟุ้งชนในแนวสัมผัส ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดโดยการสร้างห้องการไหลหมุนควงในตัวหัวฉีด และฉีดส่วนผสมเข้ามาในห้องสร้างการไหลหมุนควง และเกิดการชนกันแนวสัมผัสเพื่อทำให้เกิดเปลวไฟหมุนควง อีกทั้งเป็นเรื่องที่ง่ายในการติดตั้งและสามารถนำไปใช้ได้จริง

บทที่ 3

ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

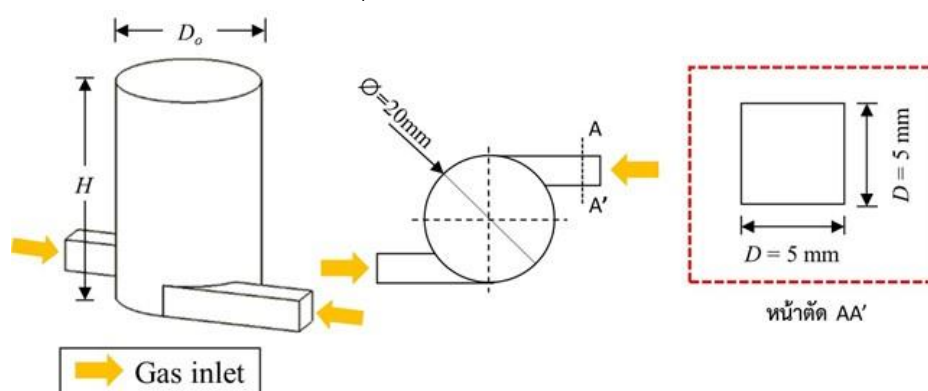
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนเป็นหลัก จากการศึกษาพบว่าเปลวไฟพุ่งชนถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีการนำการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมาพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายขึ้นในอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชน ด้วยการสร้างห้องหมุนควงเพื่อให้ของไหลที่เข้ามาภายในห้องชนกันในแนวสัมผัสจนเกิดเป็นเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่สามารถให้ความเสถียรในการเผาไหม้ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเปลวไฟแบบท่อ ซึ่งในบทที่ 3 กล่าวถึงชุดทดลองและขั้นตอนในการทำวิจัยที่สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 คือการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นการทดลองเพื่อหาความสูงของห้องและมุมหมุนควงที่เหมาะสมและให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ดีที่สุด ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระและขณะเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวด้วยกล้องดิจิทัล เป็นการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren เป็นการศึกษาการกระจายความร้อนโดยใช้เทคนิคการหักเหของแสงสำหรับดูการเปลี่ยนแปลงของเปลวไฟขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลเมื่อออกจากปากทางออกของตัวสร้างเปลวไฟหมุนควง และในส่วนสุดท้ายเป็นการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ ซึ่งสีของเปลวไฟสามารถบ่งบอกได้ถึงอุณหภูมิของเปลวไฟ ในส่วนนี้จะเป็นการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟในตัวของเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลไทป์ชนิด B เป็นตัววัด

3.1 โมเดลสร้างเปลวไฟหมุนควงและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการสร้างการไหลหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหมุนท่อเจ็ท การติดใบบังคับทิศทางที่ปากทางออกของท่อเจ็ท การสอดแท่งเฮลิคอลลหรือแผ่นบิดในท่อเจ็ทที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้สร้างการไหลหมุนควงโดยวิธีการให้ส่วนผสมชนในแนวสัมผัสภายในห้องสร้างการไหลหมุนควง ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้วิธีดังกล่าว เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถสร้างและนำไปติดตั้งได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและยังมีข้อดีคือไม่ยุ่งยากในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เมื่อเทียบกับการสร้างการไหลหมุนควงโดยใช้แผ่นบิด

รูปที่ 3.1 แสดงโมเดลเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่สร้างขึ้นและลักษณะของหัวฉีด โดยฐานของหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควงทำมาจากเหล็กกันสนิมที่มีความหนา 10 mm ตรงแกนกลางกัดเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 mm ลึก 5 mm โดยที่ระหว่างรูกึ่งกลางจะมีแขน

แยกออกไปสองทาง ซึ่งมีหน้าตัดจัสตริสขนาด 5 mm และตรงบริเวณปลายแขนที่ยื่นออกมาถูกเจาะจนทะลุตามแนวความหนาของแผ่นสำหรับเป็นทางเข้าของแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการให้ส่วนผสมที่เข้าทางแขนทั้งสองข้างชนกันในแนวสัมผัสจนเกิดการหมุนควงภายในห้องทรงกระบอกสร้างการไหลวนเพื่อทำให้เกิดเปลวไฟหมุนควง

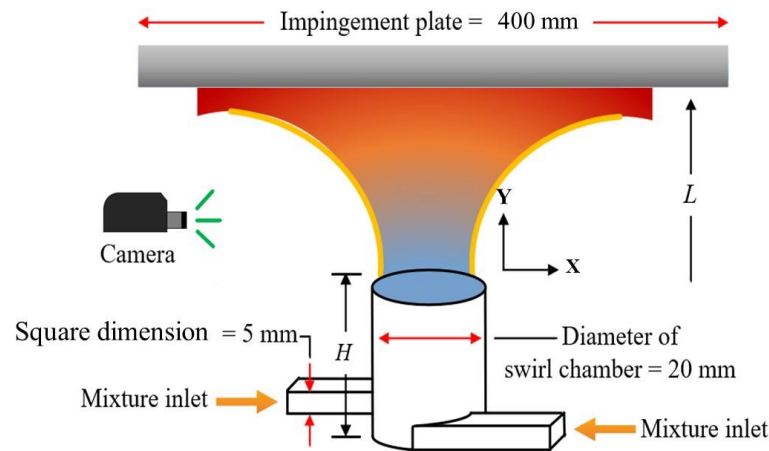


รูปที่ 3.1 โมเดลสร้างการไหลหมุนควง

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงเป็นอันดับแรก อีกทั้งสีของเปลวไฟหมุนควงสามารถบอกถึงอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งในการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงและการถ่ายเทความร้อนขณะที่เจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศเป็นออกซิไดเซอร์ ซึ่งทำการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่อัตราส่วนสมมูล $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ ภายใต้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ทางเข้าหน้าตัดจัสตริสเท่ากับ $Re=2,000, 4,000$ และ $6,000$ ตามลำดับ นอกจากนี้ในการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษามีค่าเท่ากับ $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับแสดงโมเดลในรูปที่ 3.2 สำหรับเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1

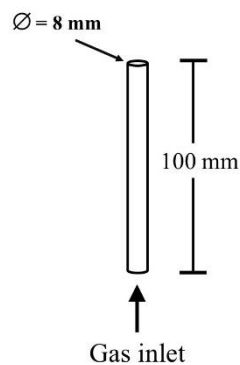
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	Re	2,000, 4,000 และ 6,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2
ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน	L	4D, 6D, 8D และ 10D



รูปที่ 3.2 โมเดลเจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว

นอกจากนี้ได้นำผลการทดลองของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงมาเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อในเรื่องของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ทั้งนี้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดแบบท่อมีขนาดเท่ากับ 8 mm และความยาวของหัวฉีดแบบท่อเท่ากับ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ

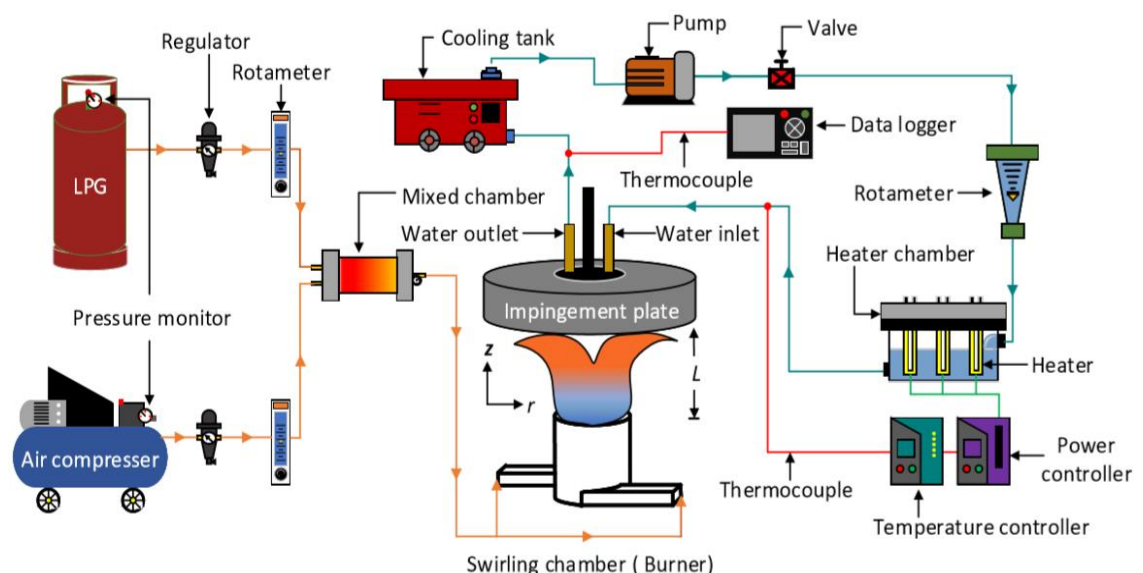
สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างสองหัวฉีดแบบหมุนควงและแบบท่อจะใช้พื้นที่หน้าตัดของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าหัวฉีดทั้งสองชนิดให้มีขนาดเท่ากันเป็นหลัก เนื่องจากหัวฉีดแบบท่อมีข้อจำกัดในการใช้งาน ในการใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูงส่งผลให้เปลวไฟไม่มีความเสถียร ดับง่าย จึงเลือกใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ $Re=2,000$ ซึ่งเป็นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ต่ำที่สุดในงานวิจัยที่เสถียร เพื่อทราบถึงโครงสร้างของเปลวไฟที่มีความแตกต่างกัน สีและลักษณะของเปลวไฟในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน และที่สำคัญคือการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟในแต่ละชนิดหัวฉีดว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรในแต่ละกรณีที่ใช้ในการศึกษา

3.2 รายละเอียดของชุดทดลองและวิธีการทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควง การศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยเทคนิคการถ่ายภาพแบบ **Schlieren** การวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง และการวัดถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชน

3.2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 3.4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา โดยการศึกษาเลือกใช้เปลวไฟแบบผสมก่อน โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดเซอร์ ซึ่งส่วนผสมทั้งสองชนิดถูกวัดและวาล์วควบคุมความดันผ่านมอเนเตอร์ (Pressure regulator) ให้คงที่ตลอดเวลาขณะทำการทดลอง จากนั้นเชื้อเพลิงและอากาศไหลผ่านตัวกรองความชื้น (Filter) เพื่อกรองไอน้ำและสิ่งตกค้าง ก่อนเข้าสู่โรตاميเตอร์ (Rotameter) และวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยเครื่องวัดความดัน (Pressure transducer) ทำการวัดความดันของเชื้อเพลิงและอากาศอีกครั้ง หลังจากผ่านโรตاميเตอร์ให้คงที่เท่ากับ 0.3 mbar และ 0.2 mbar ตามลำดับ และไหลเข้าสู่ถังผสม (Mixed chamber) ที่ภายในอัดแน่นไปด้วยลูกเหล็กขนาด 3 mm ในสัดส่วน 3/4 ของปริมาตรห้องผสม เพื่อช่วยให้เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันได้ดีมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการลดการเกิดเปลวไฟไหลย้อน (Flashback) ก่อนที่ส่วนผสมไหลออกจากถังผสมเพื่อเข้าสู่หัวฉีดเปลวไฟหมุนควง

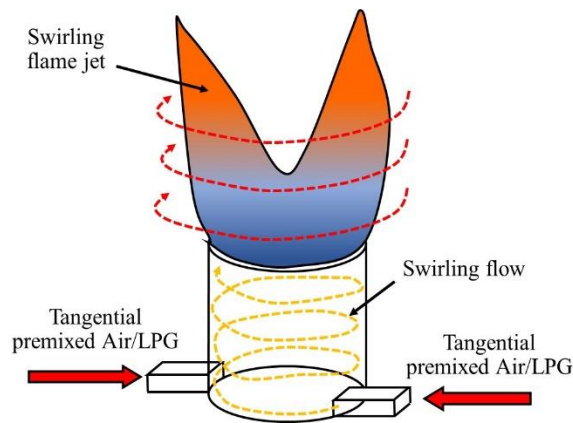


รูปที่ 3.4 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา

นอกจากนี้ในส่วนของคุณดัดตั้งระบบหล่อเย็นน้ำสำหรับการศึกษากายภาพความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้ปั๊มคูดน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ระบบหล่อเย็น ซึ่งผ่านโรตารีมิเตอร์สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง อีกทั้งติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนไหลเข้าสู่แผ่นพุ่งชน

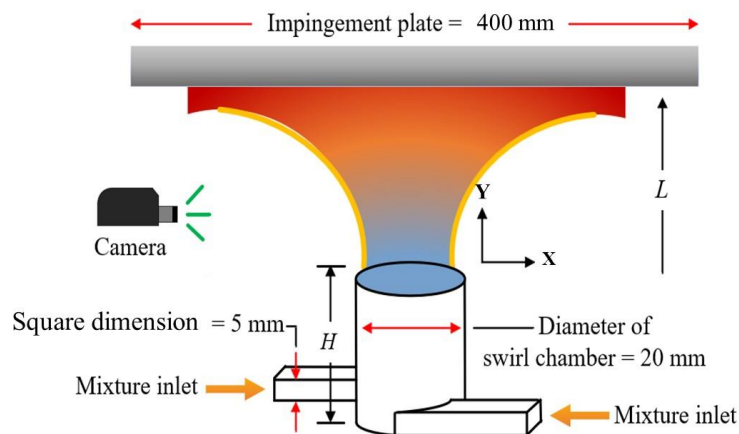
3.2.2 วิธีการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟโดยกล้องดิจิทัล

โครงสร้างของเปลวไฟมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง ซึ่งในส่วนของการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงโดยใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพเปลวไฟในขณะที่เปลวไฟมีความเสถียรแสดงแผนผังในรูปที่ 3.5 ในการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ



รูปที่ 3.5 โมเดลเปลวไฟหมุนควงอิสระ

รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวแผ่นพุ่งชน นอกจากนี้ทำการศึกษาคือโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟอิสระและเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อว่ามีความแตกต่างกับเจ็ทเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดสร้างการไหลหมุนควงอย่างไร



รูปที่ 3.6 การถ่ายภาพโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชน

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาสีของเปลวไฟบริเวณปากทางออกและในกรณีทีเปลวไฟปะทะพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนในขณะเผาไหม้ที่สามารถบอกได้ถึงอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดในแต่ละชนิดเพื่อนำการศึกษาโครงสร้างที่ได้มาพิจารณาถึงผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในลำดับต่อไป

การศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระและโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชน ซึ่งรอบชุดทดลองถูกคลุมไปด้วยผ้านิลสีดำสำหรับป้องกันไม่ให้ลมพัดผ่านชุดทดลอง ขณะทดลอง จากนั้นทำการสังเกตเปลวไฟหมุนควงที่ออกจากปากทางออกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เกิดความเสถียร และใช้กล้องดิจิทัล (DSLR Canon 1200D) เป็นตัวบันทึกภาพเปลวไฟหมุนควงขณะทำการทดลอง สำหรับการบันทึกภาพเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชน ใช้แผ่นฟุ้งชนที่ทำด้วยเหล็กขนาดกว้างเท่ากับ 400 mm ที่ความยาวเท่ากับ 400 mm และขนาดความหนา 10 mm ถูกติดตั้งบนชุดควบคุมตำแหน่ง 2 แกน (XY-Transvers system) ควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์สำหรับการปรับระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนได้อย่างแม่นยำ และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงแสดงตามตารางที่ 3.2

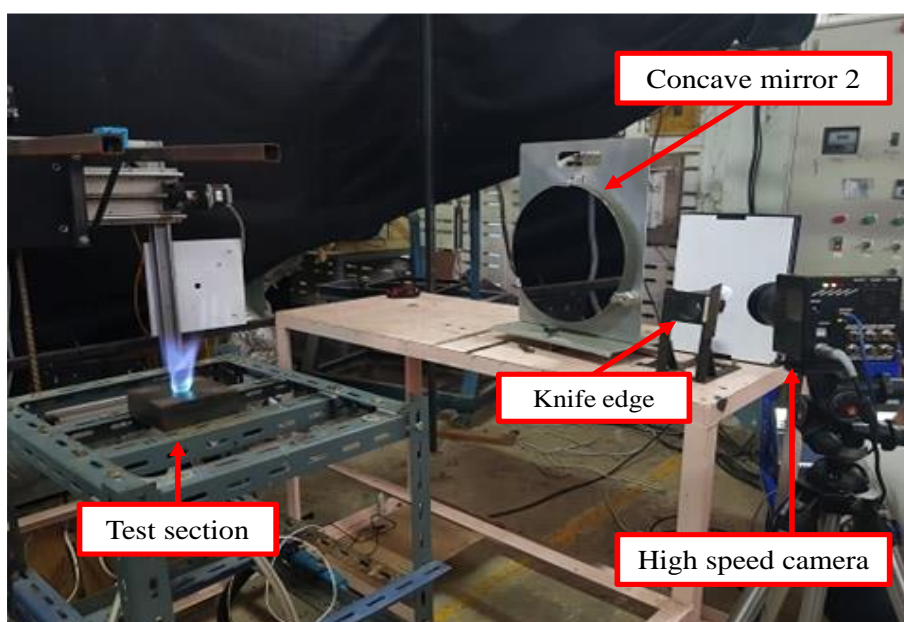
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควง

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	Re	2,000, 4,000 และ 6,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2
ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน	L	4D, 6D, 8D และ 10D

3.2.3 วิธีการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren

เบื้องต้นจะศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อนในกรณีของโครงสร้างเปลวไฟอิสระ ซึ่งในการศึกษาลักษณะการไหลของเปลวไฟหมุนควงใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren ดังแสดงลักษณะการติดตั้งตามในรูปที่ 3.7 โดยการติดตั้งกระจกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 300 mm และให้ความยาวของจุดโฟกัสที่ระยะ 3,000 mm กระจกแก้วทั้งสองวางอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อแสงจากจุดกำเนิดถูกตัดลำแสงโดยแผ่นสลิตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 mm เพื่อบังคับให้แสงฉายบนกระจกแก้วเติมพื้นที่หน้าตัดของกระจก แสงที่พุ่งตรงไปยังกระจกแก้วบานที่หนึ่งถูกเบี่ยงไปโดนเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ตั้งอยู่ระหว่างกระจกแก้วทั้งสอง อัน และกระจกแก้วบานที่สองจะทำมุมกัน 15° กับกระจกแก้วบานแรก ต่อจากนั้นแสงที่สะท้อนจาก

กระจกเว้าบานที่สองถูกส่งผ่านตรงมายังใบมีดขนาดเล็กสำหรับตัดจุดโฟกัสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงแค่ 3 mm จากนั้นทำการปรับใบมีดที่ตัดจุดโฟกัสเพียงเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความคมชัดของรูป และภาพโครงสร้างความร้อนถูกบันทึกผลผ่านกล้องความเร็วสูง (High speed camera)



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองสำหรับศึกษาการกระจายความร้อนโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren

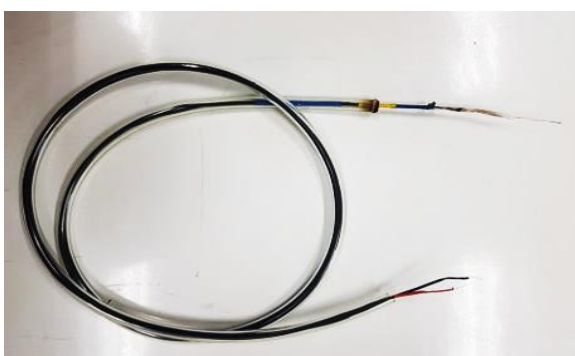
Schlieren เป็นปรากฏการณ์เกิดจากการหักเหของแสง เมื่อเปลวไฟหมุนควงเกิดการเผาไหม้บริเวณที่ปากทางออก ทำให้แสงสะท้อนระหว่างกระจกสองบานที่ตั้งขนานกัน จึงสามารถมองเห็นเป็นลักษณะโครงสร้างความร้อนของเปลวไฟที่เกิดจากความหนาแน่นของแก๊สร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป ในการศึกษาการกระจายความร้อนเลือกใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ให้โครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงอิสระที่สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งตัวแปรและเงื่อนไขอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการกระจายความร้อน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	Re	4,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2

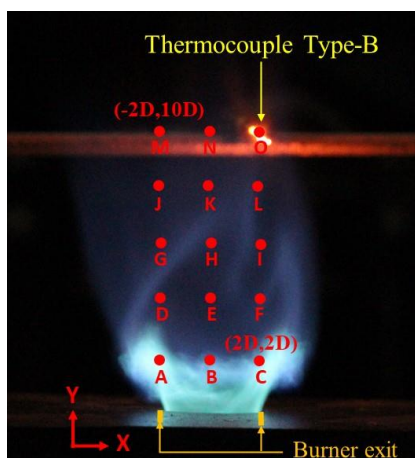
3.2.4 วิธีการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง

อุณหภูมิบ่งบอกถึงโครงสร้างของเปลวไฟ จึงจำเป็นต้องมีการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟเสียก่อน การวัดอุณหภูมิเปลวไฟโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B (Thermocouple Type-B, 70% Pt 30% Rh and 94% Pt 6% Rh สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 1,800 °C) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ที่ถูกติดตั้งบนชุดควบคุมตำแหน่ง 2 แกน (XY-Transvers system) สำหรับเคลื่อนที่หัววัดในเปลวไฟ ซึ่งในการทดลองบังคับให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง ทำให้บริเวณหัวของเทอร์โมคัปเปิ้ลเรืองแสงเป็นสีแดง จนเกิดการแผ่รังสีในการวัดแต่ละครั้ง ทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟจริง เนื่องมาจากการสูญเสียโดยการแผ่รังสีบริเวณปลายหัวของเทอร์โมคัปเปิ้ล (Bead thermocouple) หรือเป็นการสูญเสียจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีสู่บรรยากาศขณะที่ทดลอง หรือส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางความร้อนขณะเทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง จากการสูญเสียที่กล่าวข้างต้นอาจเกิดขึ้นได้ขณะทำการทดลอง จึงได้ทำการพิจารณาการสูญเสียที่เกิดขึ้น [32] ที่สามารถคำนวณได้ถึงอุณหภูมิที่วัดได้จริงของเปลวไฟหมุนควง



รูปที่ 3.8 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B (Thermocouple Type-B)

ภาพถ่ายการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดของเปลวไฟหมุนควงดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยทำการบังคับเทอร์โมคัปเปิ้ลให้สัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง การเคลื่อนตัวของเทอร์โมคัปเปิ้ลไปตามตำแหน่งแกน X และแกน Y ถูกบังคับโดยชุดควบคุมตำแหน่ง 2 แกน (XY-Transvers system) อุณหภูมิของเปลวไฟที่ถูกวัดเป็นเปลวไฟหมุนควงแบบอสิระที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ และศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ให้โครงสร้างเปลวไฟเสถียรที่สุด อุณหภูมิของเปลวไฟถูกบันทึกข้อมูลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) และหาอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณอุณหภูมิที่พิจารณาการสูญเสียในการแผ่รังสีความร้อนต่อไป ทั้งนี้การวัดอุณหภูมิของเปลวไฟใช้ตัวแปรและเงื่อนไขในการทดลองตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 จุดวัดอุณหภูมิในเปลวไฟหมุนควงอิสระ

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขใช้ในการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	Re	4,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2
จุดวัดในแนวแกนตั้งกับปากทางออก	Y	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D
จุดวัดในแนวรัศมีกับปากทางออก	X	-2D, 0D และ 2D

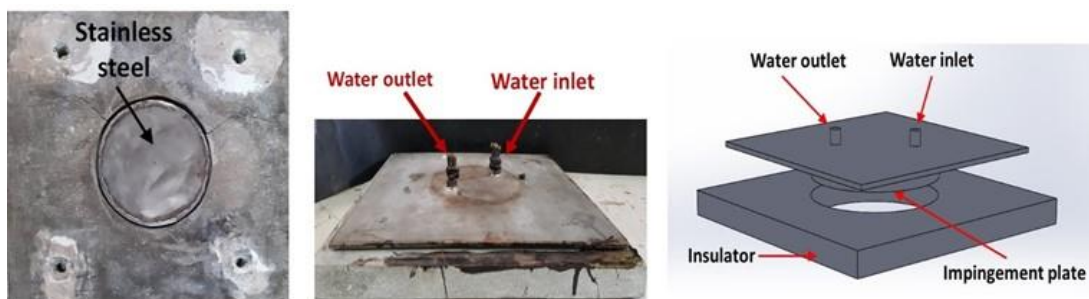
3.2.5 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ในงานวิจัยฉบับนี้วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขณะที่เจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงด้วยเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

(1) การวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

การวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งหมุนควงชนแผ่นพุ่งชน โดยแผ่นพุ่งชนที่ใช้ในการทดลองเป็นแผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนาเท่ากับ 5 mm มีความกว้างเท่ากับ 400 mm และความยาวเท่ากับ 400 mm โดยกึ่งกลางของแผ่นพุ่งชนมีช่องว่างเป็นป็นถึงพักลักษณะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 mm และยื่นออกมาด้วยความสูงเท่ากับ 25 mm บริเวณด้านบนของแผ่นสเตนเลสเจาะรูสองจุดเพื่อเป็นที่สำหรับให้น้ำเข้าและน้ำออกดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยภายในถังพักทรงกระบอกเต็มไปด้วยน้ำจากระบบหล่อเย็น น้ำที่ไหลเข้ามาภายในถังพักทรงกระบอกมีไว้สำหรับไหลผ่านพื้นผิวด้านในของแผ่นพุ่งชนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนขณะที่เปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวพุ่งชน และรอบถังพักทรงกระบอกจะหุ้มด้วยฉนวนซีเมนต์ทนความร้อนสูงที่มี

ความหนาของแผ่นเท่ากับ 25 mm เพื่อป้องกันและลดการสูญเสียในความร้อนในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน



(ก) แผ่นพุงชนที่ใช้จริง

(ข) โมเดลแผ่นพุงชน

รูปที่ 3.10 (ก) แผ่นพุงชนที่ใช้จริง และ (ข) โมเดลแผ่นพุงชน ที่ใช้ในการวัด การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

ซึ่งในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ใช้ระบบน้ำหล่อเย็นที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นพอสังเขป ทั้งนี้ระบบน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองติดตั้งถังทำน้ำเย็น (Cooling water tank) ซึ่งภายในมีขดลวดทองแดงสำหรับให้ความเย็นแก่ น้ำ และมีหัววัดอุณหภูมิ PT100 วัดอุณหภูมิน้ำโดยแสดงผลแบบดิจิตอล บังน้ำจะควบน้ำจากถังทำน้ำเย็นเข้าสู่วาล์วตรงไปยังโรตاميเตอร์น้ำ (Rotameter) ที่มีไว้สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสมในการทดลอง และเข้าสู่ชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำ (Temperature controller) โดยน้ำได้รับความร้อนผ่านฮีตเตอร์ต้มน้ำ (Heater) ขนาด 1,300 W เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าสู่แผ่นพุงชนเท่ากับ 40°C และเมื่อน้ำไหลเข้าสู่แผ่นพุงชน ในบริเวณปางทางเข้าของแผ่นพุงชนติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิ น้ำขาเข้า และในส่วนทางออกน้ำของแผ่นพุงชนติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ PT100 เป็นตัววัดอุณหภูมิของ น้ำขาออก ซึ่งอุณหภูมิของน้ำที่วัดได้ถูกเก็บผลผ่านเครื่องบันทึกผล (Data logger)

ในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวโดยการวัดอุณหภูมิของน้ำเข้า และน้ำออกของแผ่นพุงชนขณะที่เปลวไฟหมุนควงพุงชนพื้นผิวสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2)

พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{\pi D_{plate}^2}{4} \quad (3.1)$$

โดยที่ D_{plate} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m)

พลັกซ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถคำนวณจาก

$$\dot{q} = \frac{\dot{m}c_p\Delta T}{A} \quad (3.2)$$

- โดยที่ A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเปลวไฟกับน้ำหล่อเย็น (m^2)
 \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)
 c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($kJ/kg\cdot^{\circ}C$)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำเข้าและน้ำออกจากแผ่นพุงชน ($^{\circ}C$)

ในส่วนของ การทดลองน้ำที่เข้าสู่แผ่นพุงชนถูกควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับ $40^{\circ}C$ เพื่อให้เปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนเกิดการควบแน่นของไอน้ำบริเวณพื้นผิวแผ่นพุงชนระหว่างการทดลอง เมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่แล้วจากนั้นจึงเริ่มทำการเก็บผลการทดลอง ในส่วนของ การเก็บค่าอุณหภูมิของน้ำที่แลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิวถูกบันทึกผลต่อเมื่อเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวมีความเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะทดลอง และในระหว่างการทดลองได้บันทึกโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนโดยกล้องดิจิตอลเพื่อสังเกตลักษณะของโครงสร้างเปลวไฟที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ซึ่งตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวถูกแสดงที่ตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้วัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
อัตราการไหลของน้ำ	\dot{m}	0.033 kg/s
อุณหภูมิน้ำขณะเข้าแผ่นพุงชน	T_{in}	$40^{\circ}C$
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	Re	2,000, 4,000 และ 6,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2
ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชน	L	4D, 6D, 8D และ 10D

นอกจากนี้เพื่อทราบถึงความร้อนจากเปลวไฟหมุนคองที่ให้แก่พื้นผิวแผ่นฟุ้งชน จึงมีการวัดประสิทธิภาพทางความร้อน [24] ของเจ็ทเปลวไฟหมุนคองที่ปะทะพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน ในการคำนวณหาความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาตั้งแต่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000, 4,000$ และ $6,000$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ในทุกระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนและทุกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนคอง ซึ่งปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากปริมาณเชื้อเพลิง LPG ที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

ปริมาณความร้อนจากปริมาณเชื้อเพลิงของเปลวไฟหมุนคองในการเผาไหม้สามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{fuel} = \dot{m}_{fuel} LHV \quad (3.3)$$

โดยที่ \dot{m}_{fuel} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง LPG ที่ใช้ (kg/s)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง LPG (kJ/kg)

ประสิทธิภาพทางความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta(\%) = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{fuel}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เปลวไฟหมุนคองทำได้ (kW)

\dot{Q}_{fuel} คือ ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง LPG ที่ได้จากการเผาไหม้ (kW)

(2) การวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

การวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เซ็นเซอร์วัดการถ่ายเทความร้อน (Thermogage heat flux sensor, TG-1000, Vatel Corporation) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 4 mm และมีทองแดงหุ้มตัวเซ็นเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 38 mm ทำการติดตั้งผ่านระบบ XY-Transvers system สำหรับเป็นตัวเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนอย่างแม่นยำ เครื่องมือวัดตัวนี้จำเป็นต้องใช้น้ำเพื่อหล่อเย็นพื้นผิวที่เปลวไฟฟุ้งชน โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสมและควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ที่เท่ากับ 40°C เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำไม่ให้เกาะบริเวณพื้นผิวของแผ่นฟุ้งชน



รูปที่ 3.11 เซ็นเซอร์วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [33]

เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนทำงานโดยการป้อนกระแสไฟฟ้า 12 VDC (input) ผ่านตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ซึ่งภายในเซ็นเซอร์มีตัวต้านทานเมื่อถูกความร้อนจะให้ผลลัพธ์ (Output) ในรูปของ mV โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกเก็บผลผ่านเครื่องบันทึกผล และนำผลที่ได้นำมาสอบเทียบ (Calibration) กับคู่มือ และผลลัพธ์สุดท้ายอยู่ในรูป W/m^2

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนใช้ระบบหล่อเย็นและชุดทดลองแบบเดียวกับวิธีวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว แต่อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์จะถูกปรับให้มีค่าสูงพอที่ไม่ทำให้ตัวต้านทานภายในเซ็นเซอร์เกิดความเสียหายขณะทำการทดลอง ที่อาจเกิดการสะสมความร้อนจากเปลวไฟที่ฟุ้งชนพื้นผิวนานเกินไป จึงศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $\text{Re}=2,000$ เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีการจำกัดความร้อนที่ได้รับ และถูกควบคุมตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้วัดประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ตัวแปร	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
อัตราการไหลของน้ำ	\dot{m}	0.05 kg/s
อุณหภูมิน้ำขณะเข้าแผ่นพุงชน	T_{in}	40°C
ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง	H	2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D และ 7.0D
ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์	Re	2,000
อัตราส่วนสมมูล	ϕ	0.8, 1.0 และ 1.2
ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชน	L	4D, 6D, 8D และ 10D

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควงกับหัวฉีดแบบท่อ โดยกรณีหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควงจะเลือกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวได้ดีที่สุดนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากหัวฉีดแบบท่อ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลของงานวิจัยที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควง เพื่อเป็นการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชน และเพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟพุงชน ทั้งนี้การวัดถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวัดฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว อีกทั้งผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกรณีเปลวไฟแบบท่อ ที่สามารถทราบได้ถึงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความแตกต่างกันอย่างไร ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟอิสระและเปลวไฟปะทะแผ่นพุงชนที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการกระจายความร้อนการไหลของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยการใช้เทคนิคการหักเหของแสงของกระจกเว้าที่วางตั้งขนานกัน ทั้งนี้เมื่อเปลวไฟออกจากปากทางออกของหัวฉีดในสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ทำให้สังเกตได้ถึงการกระจายความร้อนของเปลวไฟหมุนควงขณะออกจากหัวฉีด ในส่วนสุดท้ายเป็นการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ เพื่อทราบถึงอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ ทั้งนี้ผลของอุณหภูมิเปลวไฟยังส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอีกด้วย

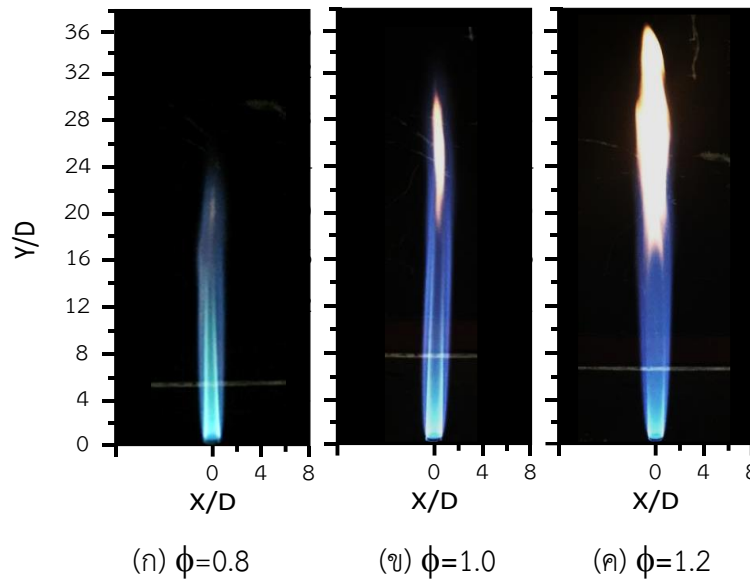
4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟ

สำหรับหัวข้อนี้กล่าวถึงลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟที่ได้จากห้องสร้างการไหลหมุนควงและเจ็ทเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อ ซึ่งในส่วนแรกจะอธิบายถึงโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟอิสระในหัวฉีดแต่ละชนิด เพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างของเปลวไฟ สีของเปลวไฟขณะเกิดการเผาไหม้บริเวณปากทางออกของหัวฉีด จากนั้นจะศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟของหัวฉีดแต่ละชนิดในขณะปะทะพื้นผิวของแผ่นพุงชน เพื่อศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟพุงชนที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟที่ได้จากห้องสร้างการไหลหมุนควงและโครงสร้างของเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบห้องว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร และอีกทั้งยังศึกษาความแตกต่างสีของเปลวไฟขณะเกิดการเผาไหม้บริเวณปากทางออกของหัวฉีด เพื่อนำการศึกษาโครงสร้างที่ได้มาพิจารณาถึงความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อโดยกล้องดิจิทัล

การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่ออิสระ และโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อปะทะแผ่นพุงชน ซึ่ง

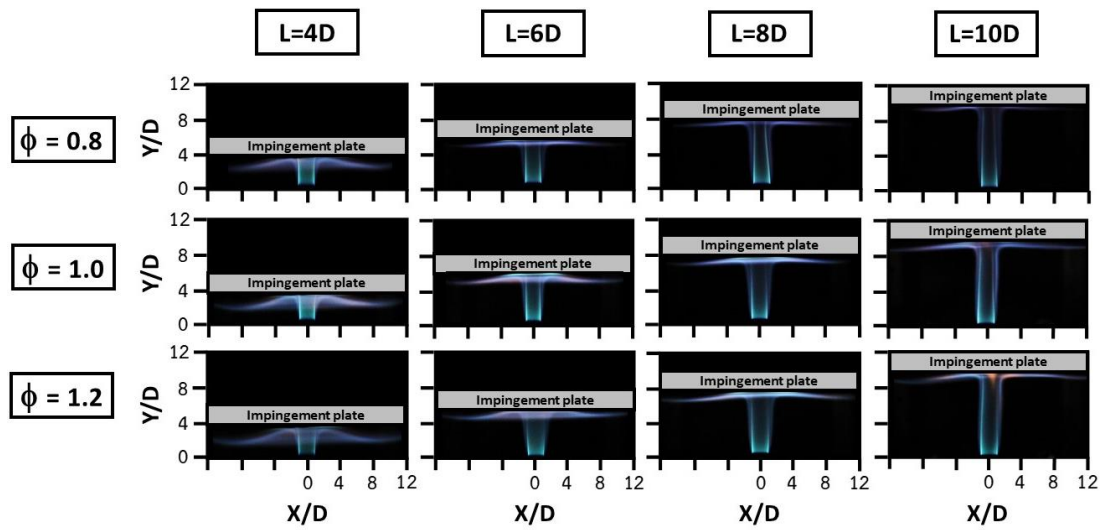
การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ และ ศึกษาที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟแบบท่ออิสระ



รูปที่ 4.1 โครงสร้างเปลวไฟอิสระที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท่อที่อัตราส่วนสมมูล (ก) $\phi=0.8$, (ข) $\phi=1.0$ และ (ค) $\phi=1.2$ พบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ เปลวไฟที่ได้มีลักษณะ เป็นสีฟ้าตลอดความยาวของเปลวไฟ และมีลำสีที่สามารถมองเห็นเปลวไฟในส่วนใกล้ปากทางออก ได้อย่างชัดเจน (Flame core) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลไปที่ $\phi=1.0$ แสดงให้เห็นว่าบริเวณปลาย ของเปลวไฟมีสีส้มปะปนอยู่เล็กน้อย ในส่วนผสมพอดีที่สังเกตเห็นบริเวณปลายเปลวไฟเป็นสีส้มอัน เนื่องมาจากการศึกษาอยู่ในสภาวะที่ยากจะควบคุมอากาศรอบๆ เปลวไฟ จึงเป็นผลให้เกิดการดึง อากาศรอบๆ มาเผาไหม้ (Air Entrainment) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ที่บริเวณ ปลายเปลวไฟมีสีส้มปะปนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิงมากขึ้นทำให้การเผา ไหม้ที่ได้ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งเมื่อสังเกตรูปเปลวไฟอิสระพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้ความยาว ของเปลวไฟเพิ่มขึ้นอีกด้วย

การศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อปะทะแผ่นฟุ้งชนซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่อ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ทั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิว จำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟแบบท่อปะทะแผ่นฟุ้งชนก่อน โดยกำหนดที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ซึ่งผลการทดลองแสดงใน รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเปลวไฟแบบท่อปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$

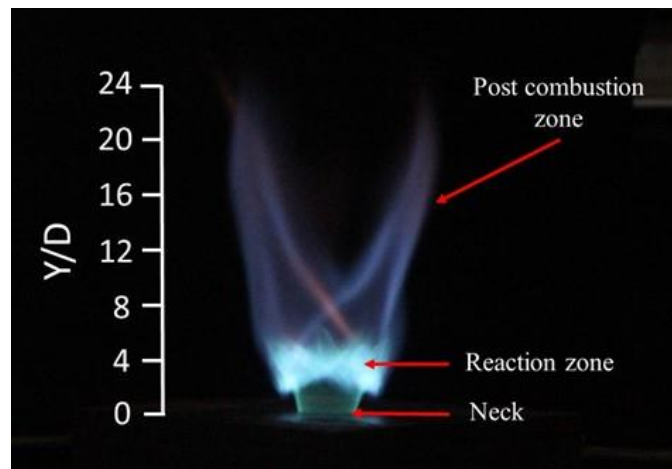


รูปที่ 4.2 โครงสร้างเปลวไฟแบบท่อปะทะแผ่นพุ่งชนที่ระยะพุ่งชน

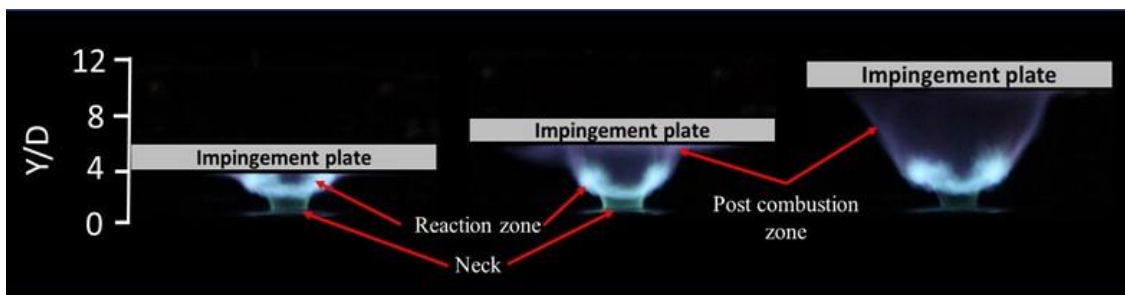
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 และกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ จากผลการทดลองที่ระยะ $L=4D$ เจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนมีลักษณะเป็นสีฟ้าตลอดลำเปลวไฟ และการกระจายตัวของเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนไหลราบพื้นผิวแผ่นพุ่งชนในทุกอัตราส่วนสมมูล เมื่อเพิ่มระยะห่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนไปที่ $L=6D$ พบว่าในทุกอัตราส่วนสมมูลเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนยังคงเป็นสีฟ้า และเมื่อสังเกตเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ เปลวไฟบานออกเป็นวงกว้างไหลพุ่งชนเต็มพื้นผิวแผ่นพุ่งชนมากกว่าอัตราส่วนสมมูลอื่นๆ เมื่อเพิ่มระยะไปที่ $L=8D$ พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ปะทะแผ่นพุ่งชนได้น้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ได้มีส่วนผสมของอากาศมากเกินไปทำให้เปลวไฟที่ได้มีความยาวลดลงและทำให้เปลวไฟปะทะพื้นผิวพุ่งชนได้น้อยลง และที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน $L=10D$ สังเกตได้ว่าบริเวณปลายเปลวไฟที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ และ 1.2 เป็นสีส้มขณะปะทะแผ่นพุ่งชน โดยที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ เมื่อเปลวไฟไหลออกจากปากทางออกหัวฉีดและระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชนที่มากขึ้น อากาศบริเวณรอบๆ เจ็ทสามารถถูกดึงเข้ามาเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการปรับอัตราส่วนสมมูลให้ตรงกับทฤษฎีจึงเป็นเรื่องยาก และเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ เปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนเป็นสีส้มอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากส่วนผสมที่ใช้ในการเผาไหม้มีเชื้อเพลิง LPG อยู่มาก ทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นแบบไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนเป็นสีส้ม

4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยกล้องดิจิทัล

โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระประกอบไปด้วยสามส่วนหลักตามทฤษฎี ได้แก่ โซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) โซนปฏิกิริยา (Reaction zone) และโซนใกล้ปากทางออก (Neck) จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของรูปร่างเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระที่อ้างอิงตามทฤษฎี นอกจากนี้เมื่อนำสามส่วนที่กล่าวไว้ข้างต้นมารวมกัน สามารถทราบถึงความยาวของเปลวไฟหมุนควง (Flame length)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ



(ก) ระยะต่ำ (ข) ระยะกลาง (ค) ระยะสูง

รูปที่ 4.4 โครงสร้างเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชน (ก) ระยะต่ำ

(ข) ระยะกลาง และ (ค) ระยะสูง

โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชน (ก) ระยะห่างระหว่างแผ่นพุงชนกับปากทางออกน้อย (ข) ระยะห่างระหว่างแผ่นพุงชนกับปากทางออกปานกลาง และ (ค) ระยะห่างระหว่างแผ่นพุงชนกับปากทางออกสูง จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงจะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ โซนใกล้ปากทางออก (Neck) โซนปฏิกิริยา (Reaction zone) และโซนนอก

เขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งฟุ้งชนที่สั้น เปลวไฟในส่วนของโซนใกล้ปากทางออกยกตัวสูงขึ้นทำให้เปลวไฟในโซนปฏิกิริยาแยกเป็นสองส่วนและสัมผัสกับแผ่นฟุ้งชนโดยตรง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับปากทางออกอยู่ในระดับกลาง แสดงให้เห็นการบานออกของเปลวไฟในโซนปฏิกิริยาชัดเจนขึ้น โครงสร้างเปลวไฟแยกออกเป็นสัดส่วนในแต่ละโซนอย่างชัดเจน และมีเปลวไฟในโซนนอกเขตปฏิกิริยาที่สัมผัสกับแผ่นฟุ้งชน เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับปากทางออกให้สูงที่สุด เปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยาจะขยายตัวบานออกเป็นวงกว้างและไหลราบพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน

การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยกล้องดิจิทัลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ และการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชน ซึ่งในการทดลองได้กำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$, $4,000$ และ $6,000$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 โดยการศึกษาครั้งนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นกับปากทางออกเจ็ท $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7

(1) โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบอิสระ

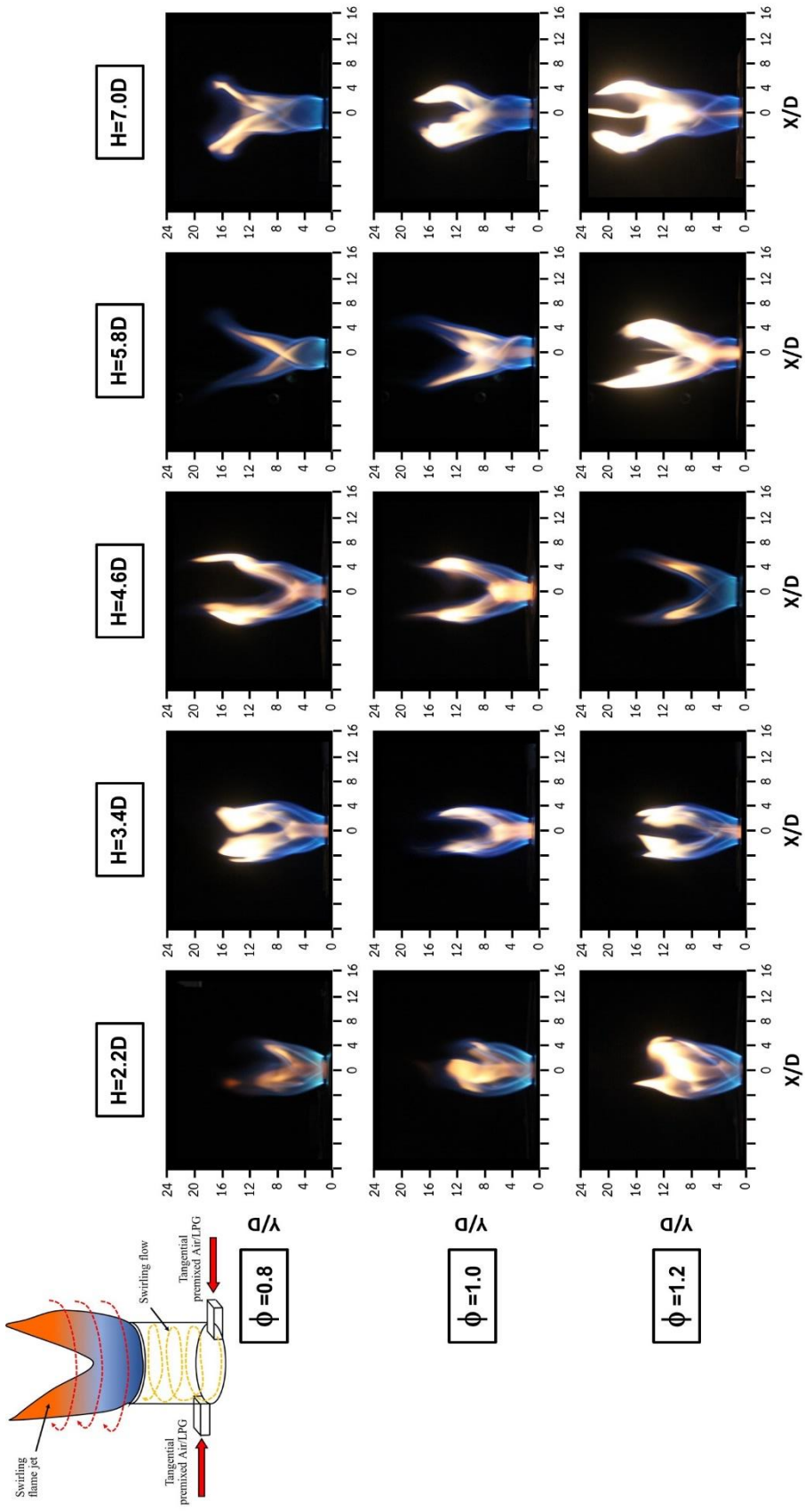
การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.5 พบว่าเปลวไฟในส่วนของโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) มีเพียงแค่อีฟ้างบางๆ แค่อบริเวณใกล้ปากทางออกเท่านั้น จากการสังเกตที่ความสูงห้องเท่ากับ $H=2.2D$ เปลวไฟมีลักษณะบานออกในแนวแกนรัศมีแต่เปลวไฟจะมีความสูงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความสูงห้องที่ H อื่นๆ จากการบานออกของเปลวไฟหมุนควงพบว่า เปลวไฟบานออกมากที่สุดในความสูงห้องที่ H ต่ำๆ และเริ่มแคบลงเมื่อเพิ่มความสูงห้องที่ H ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อความสูงห้อง $H=2.2D$ และ $3.4D$ เปลวไฟมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมที่บริเวณแกนกลางและปลายของเปลวไฟหมุนควง และเมื่อเพิ่มความสูงห้องไปที่ $H=5.8D$ และ $7.0D$ พบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ เปลวไฟหมุนควงมีสี่เหลี่ยมแคบบริเวณของปลายเปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) เท่านั้น ในส่วนของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ และ 1.2 ปลายเปลวไฟหมุนควงมีลักษณะสี่เหลี่ยมใหญ่ขึ้นและบริเวณแกนกลางของเปลวไฟจะเริ่มเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงห้อง

การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$ รูปที่ 4.6 แสดงสัดส่วนของเปลวไฟหมุนควงออกเป็นสามส่วนได้อย่างชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ พบว่าโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงแสดงให้เห็นถึงการบานออกของ

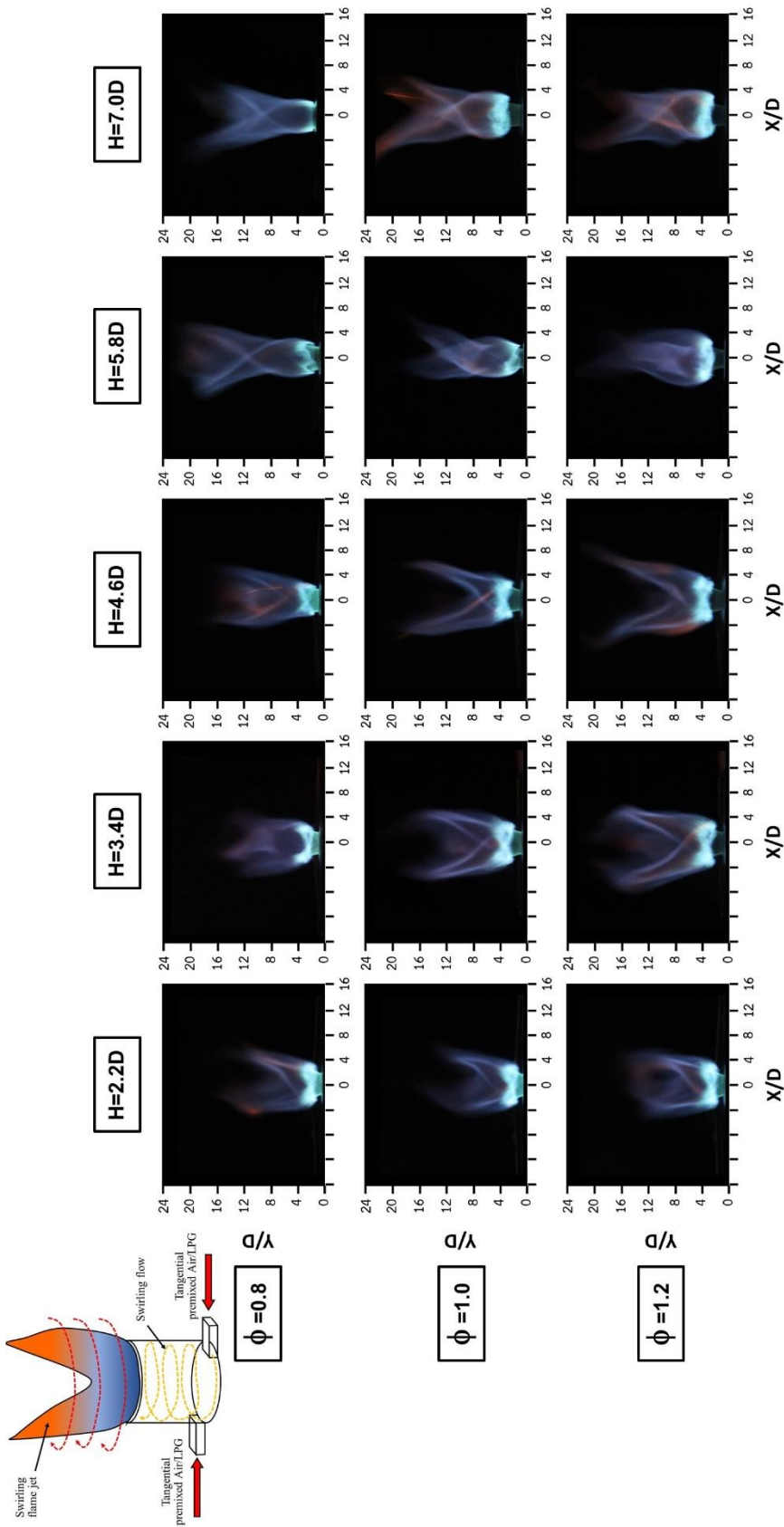
เปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) ที่ยังคงบานออกเป็นวงกว้างที่สุดในความสูงห้องที่ H ต่ำๆ เปลวไฟจะเริ่มแคบตัวลงเมื่อเพิ่มความสูงห้องที่ H ให้สูงขึ้น และยังสังเกตได้อีกว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ และ 1.0 เปลวไฟหมุนควงมีลักษณะเป็นสีฟ้าเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลไปที่ $\phi=1.2$ บริเวณปลายเปลวไฟหมุนควงในส่วนโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) ยังคงมีสีส้มปะปนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของเปลวไฟหมุนควงมีส่วนผสมของเชื้อเพลิงอยู่มาก นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวในโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) ที่สามารถเห็นชัดในทุกอัตราส่วนสมมูลและความสูงห้อง H และเมื่อสังเกตในส่วนโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) มีขนาดใหญ่ที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ เป็นสีฟ้าเข้มและจะเริ่มจางลงเมื่อลดอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ นอกจากนี้การยกตัวของเปลวไฟในส่วนโซนใกล้ปากทางออก (Neck) เห็นเป็นสีฟ้าเข้มและเห็นได้ชัดเจนที่สุดในอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำ ซึ่งเปลวไฟในส่วนนี้เริ่มจางลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูล อีกทั้งยังเป็นผลของการเพิ่มความสูงห้องส่งผลให้ความเร็วของเชื้อเพลิงในการชนแนวสัมผัสมีเพิ่มขึ้น จึงทำให้ในเปลวไฟในส่วนของโซนใกล้ปากทางออก (Neck) ยกตัวขึ้นและสีของเปลวไฟเริ่มเป็นสีฟ้าบางๆ

การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้ง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะของเปลวไฟหมุนควงจะสั้นลงเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ไปที่ $Re=6,000$ นอกจากเมื่อสังเกตที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ และ 1.0 โครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงที่ได้มีลักษณะเป็นสีฟ้าทั้งหมดในทุกความสูงห้องที่ใช้ในการศึกษา แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลไปที่ $\phi=1.2$ พบว่าบริเวณปลายเปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) มีสีส้มปะปนอยู่เล็กน้อย อีกทั้งยังบานออกเป็นวงกว้างมากที่สุดที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ และจะเริ่มแคบลงจนเห็นเป็นลำเปลวไฟหมุนควงบริเวณใกล้ปากทางออกตั้งแต่ความสูงห้อง $H=5.8D$ เป็นต้นไป แต่ในส่วนโซนใกล้ปากทางออก (Neck) ของทุกอัตราส่วนสมมูลและความสูงห้องที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะสีฟ้าเข้มกว่าเมื่อเทียบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$ นอกจากนี้ในส่วนโซนปฏิกิริยา (Reaction Zone) พบว่าจะเริ่มบานออกเป็นแหกที่ความสูงห้อง H ต่ำๆ และเมื่อเพิ่มความสูงห้อง H ให้สูงขึ้นทำให้เปลวไฟในส่วนนี้มีลักษณะบานออกด้วยมุมที่เล็กตามแนวแกนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะเห็นชัดเป็นวงกว้างขนาดใหญ่ที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ และเมื่อเพิ่มความสูงห้องสร้างการไหลหมุนควง H ให้สูงขึ้น

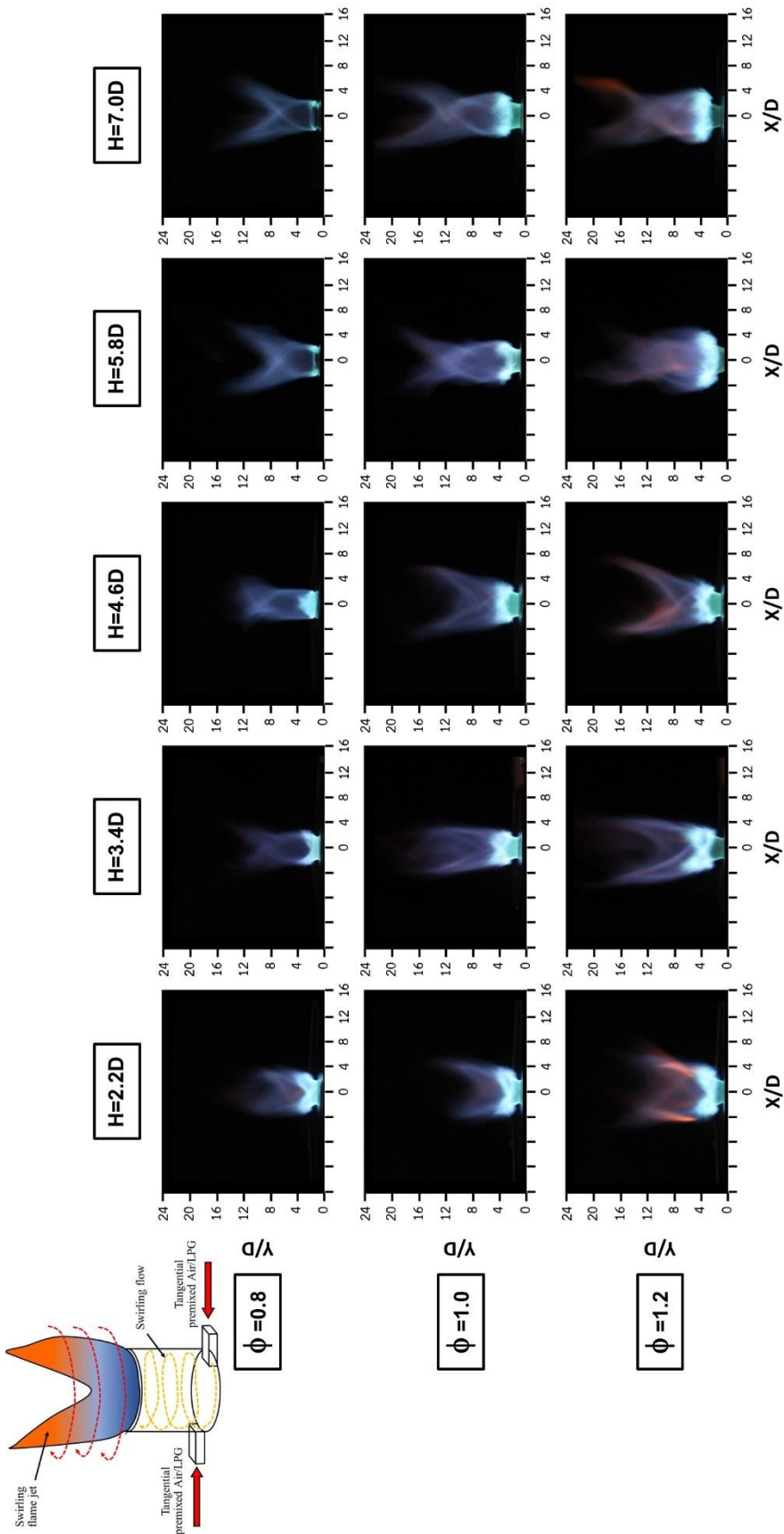
โครงสร้างเปลวไฟอิสระที่ได้ทำการศึกษาในแต่ละค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ $Re=2,000, 4,000$ และ $6,000$ ตามลำดับ ในทุกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6, 5.8D, 7.0D$ ให้ความแตกต่างของลำเปลวไฟที่แยกออกจากแกนของลำเจ็ทเป็นมุมหมุนควง (Swirl angle) เท่ากับ $24.5^\circ, 18.5^\circ, 15.5^\circ, 13.5^\circ$ และ 10.5° ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนวนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนวน $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$



รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์ส์มีเบอร์ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนผสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$

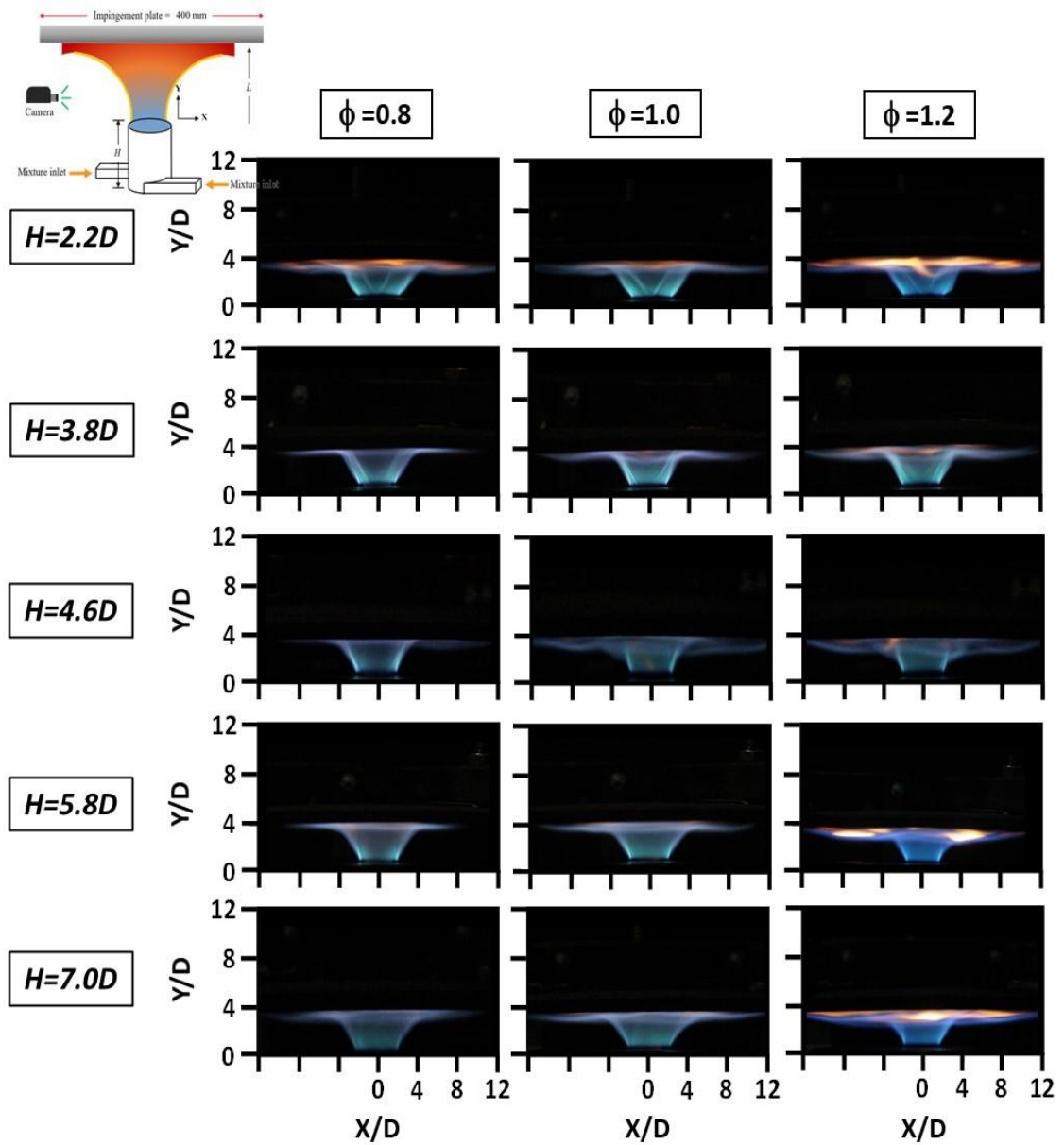


รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟหมุนวนที่ค่าเรย์โนลด์นิมเบอร์ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนวน $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$

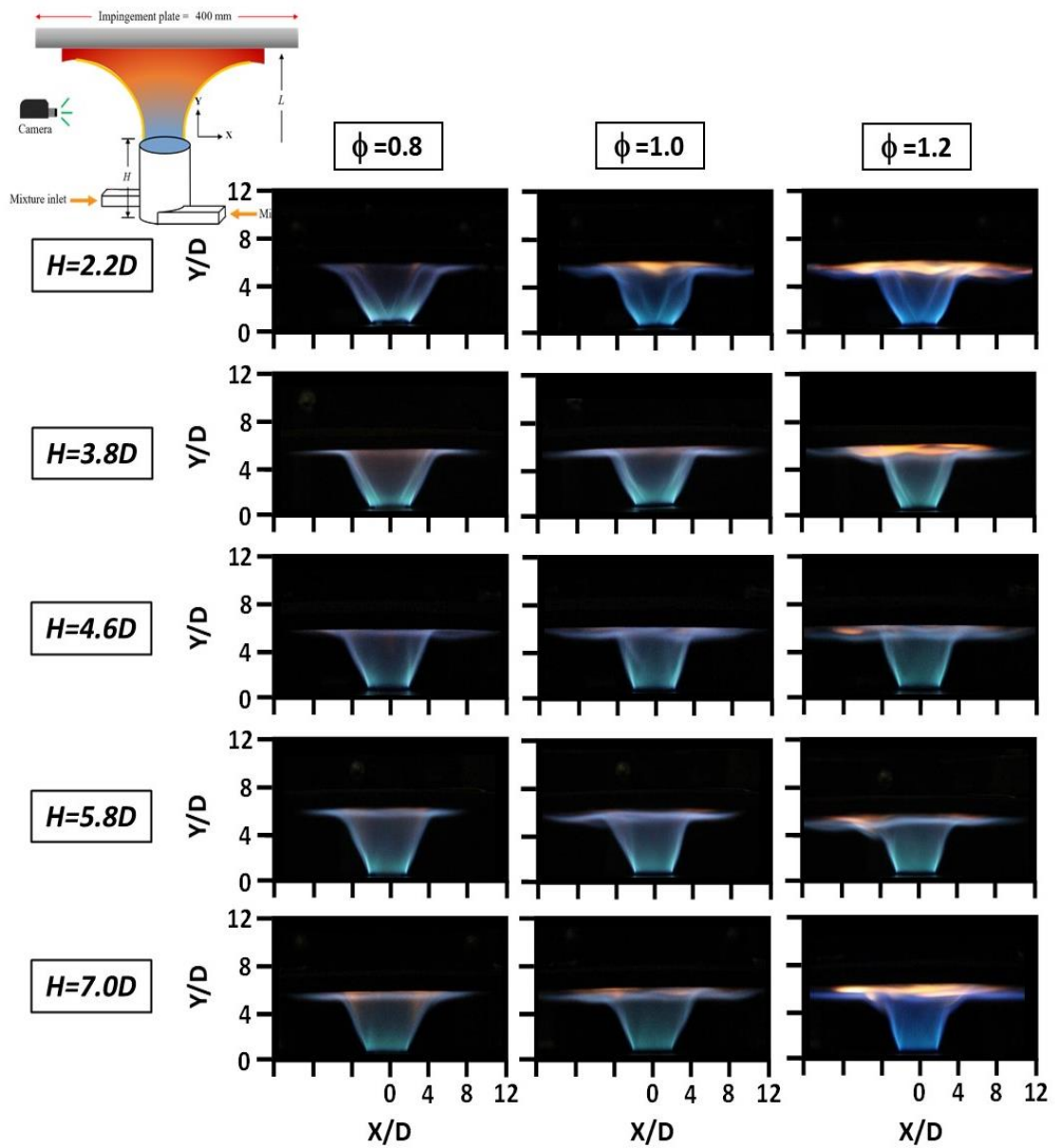
(2) โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชน

รูปที่ 4.8 ถึง 4.11 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยการศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ในทุกความสูงห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ

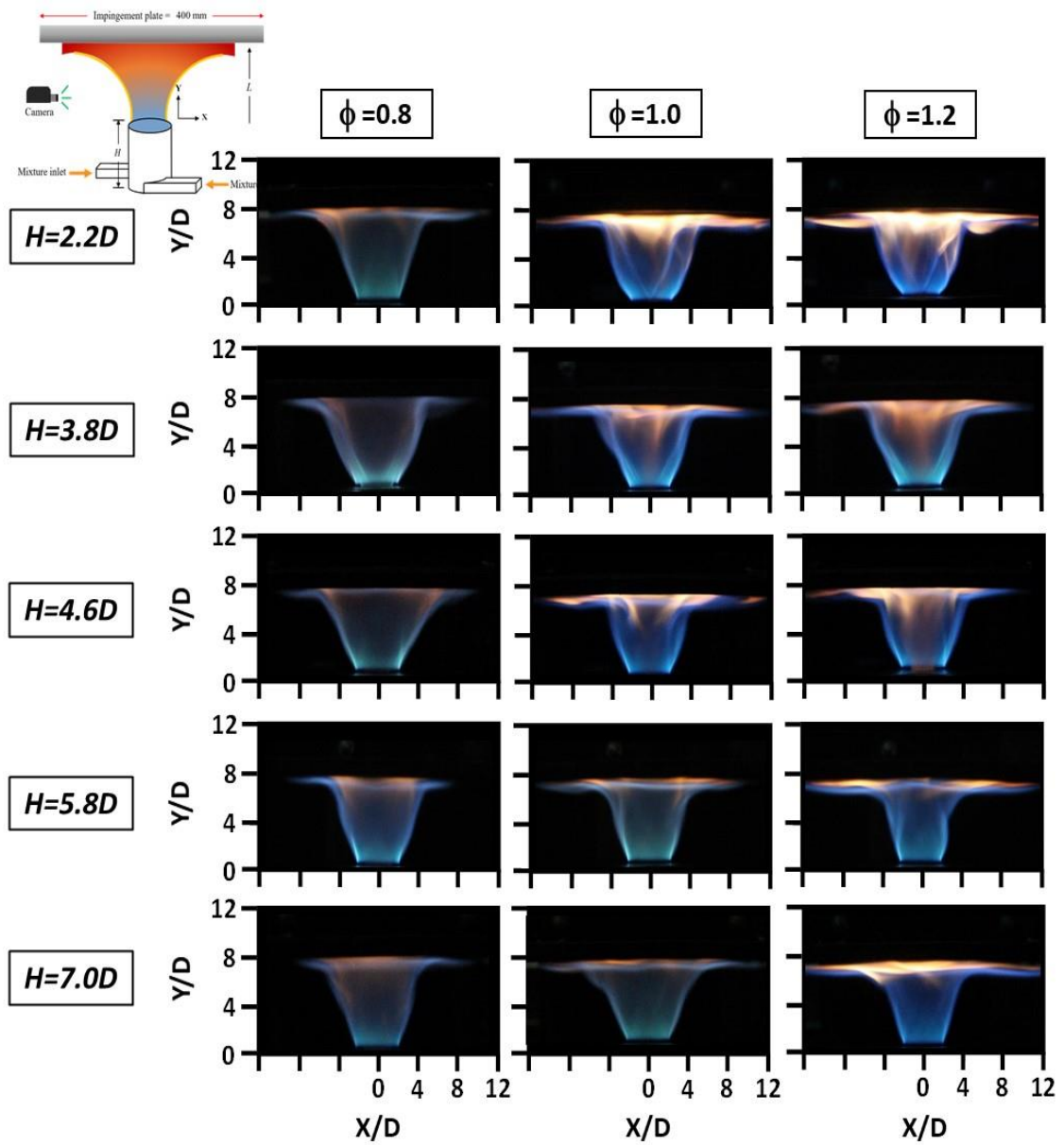
รูปที่ 4.8 ในระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ พบว่าเปลวไฟหมุนควงในทุกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงมีลักษณะเป็นสีฟ้าเป็นส่วนใหญ่ที่สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน และเป็นเปลวไฟหมุนควงเป็นสีฟ้ามากที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ที่ส่วนผสมในการเผาไหม้แบบบางมีอัตราอากาศอยู่มาก เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนไปที่ $L=6D$ ดังรูปที่ 4.9 พบว่ามีเพียงแค่ห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ เท่านั้นที่บริเวณปลายเปลวไฟบานออกเป็นมุมหมุนควง 24.5° สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนมีสีส้มปะปนอยู่ และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนไปที่ $L=8D$ ช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนมีมากขึ้น ทำให้เห็นถึงโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.10 พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทส่งผลให้บริเวณปลายเปลวไฟหมุนควงที่สัมผัสแผ่นฟุ้งชนมีสีส้มมากยิ่งขึ้น และเห็นได้ชัดเจนที่สุดที่ความสูงห้องเท่ากับ $H=2.2D$ ที่ให้มุมหมุนควง 24.5° นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าการเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้เปลวไฟที่ออกจากปากทางออกหัวฉีดผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆ ถ้าเจ็ทมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวที่ความสูงห้อง $H=7.0D$ บีบตัวแคบลงเป็นมุมหมุนควง 10.5° มีสีน้ำเงินมากที่สุด สำหรับรูปที่ 4.11 ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=10D$ การเพิ่มช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนส่งผลให้อากาศเข้ามาลำเปลวไฟในง่ายขึ้น จนแกนกลางของเปลวไฟเป็นสีส้มมากขึ้น และสังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ที่มีอัตราเชื้อเพลิงอยู่มาก การเผาไหม้ที่ได้ส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงมีลักษณะเป็นสีส้มเป็นส่วนใหญ่ บานออกเป็นวงกว้าง แยกออกทำมุมกับแนวแกนส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงไหลไม่เต็มพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน



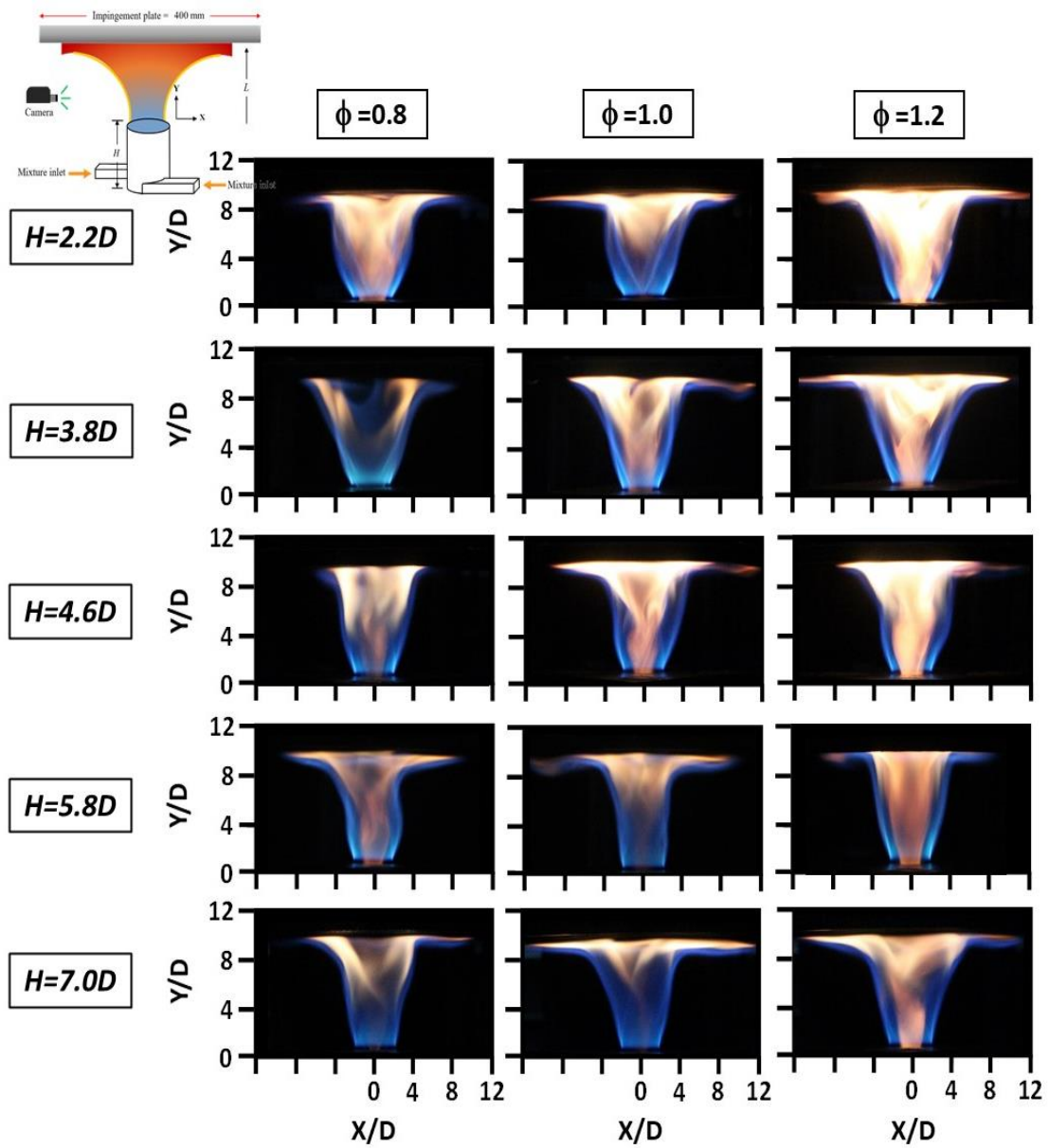
รูปที่ 4.8 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$



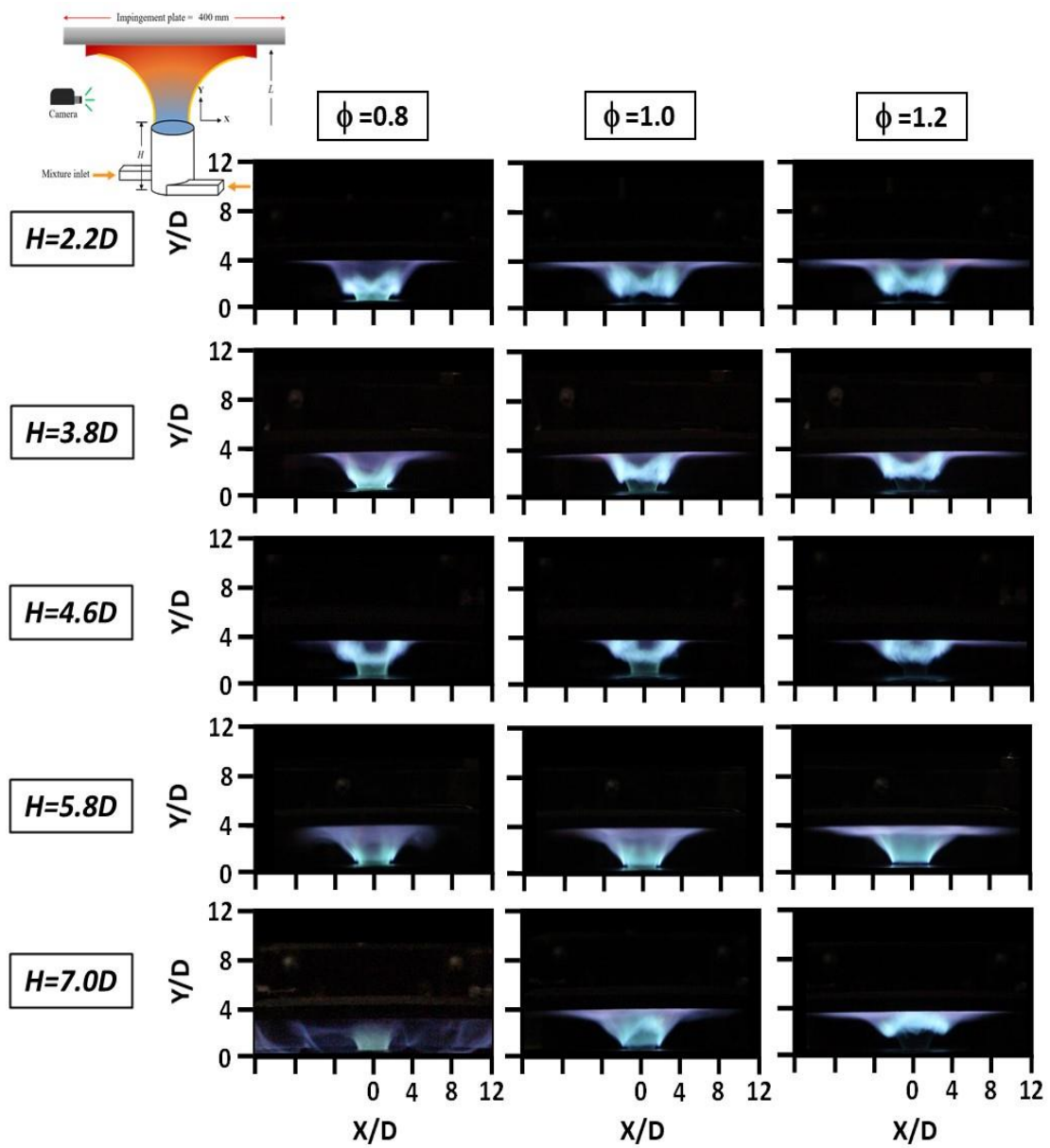
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$



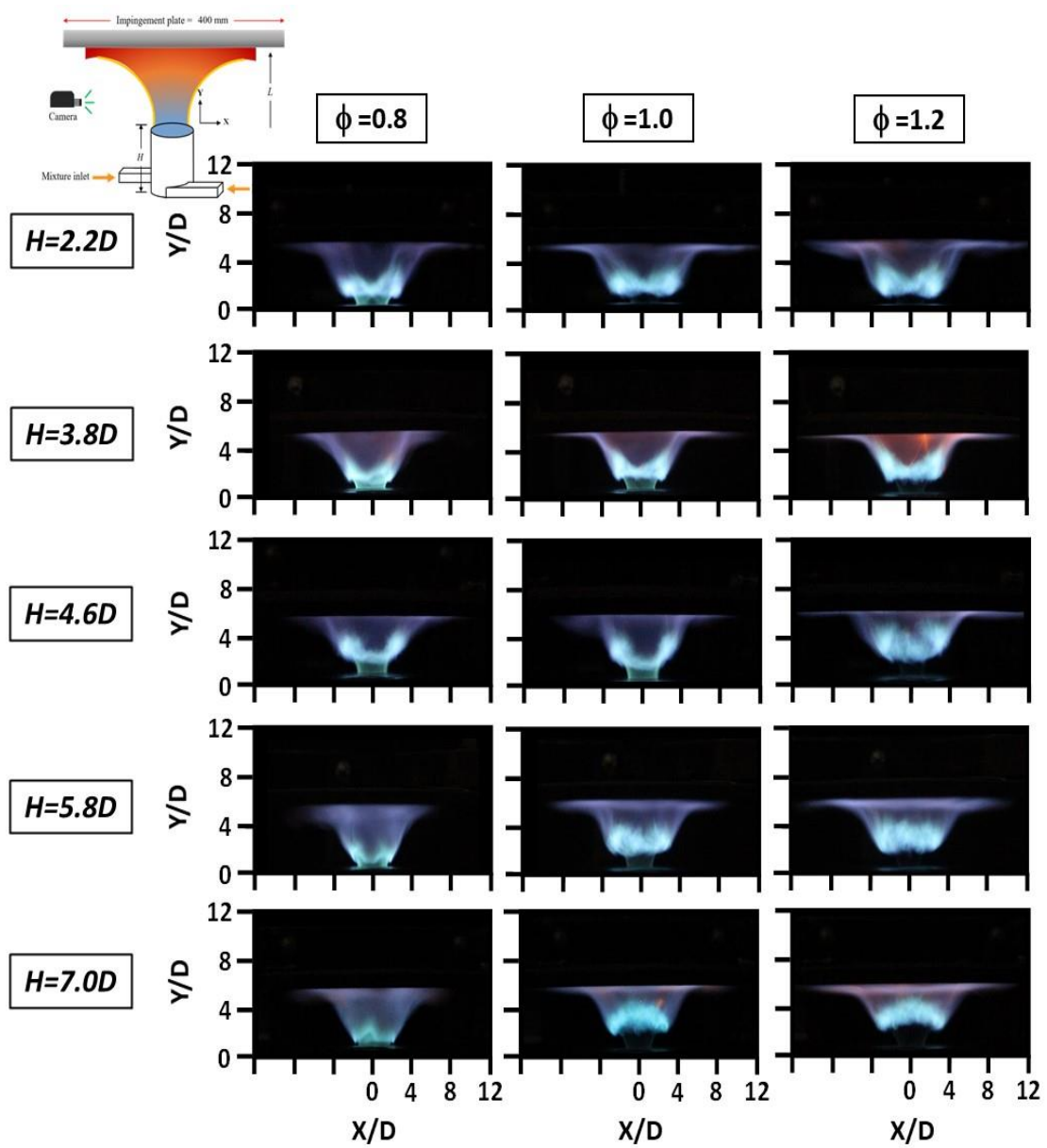
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$

รูปที่ 4.12 ถึง 4.15 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยการศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ในทุกความสูงห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ

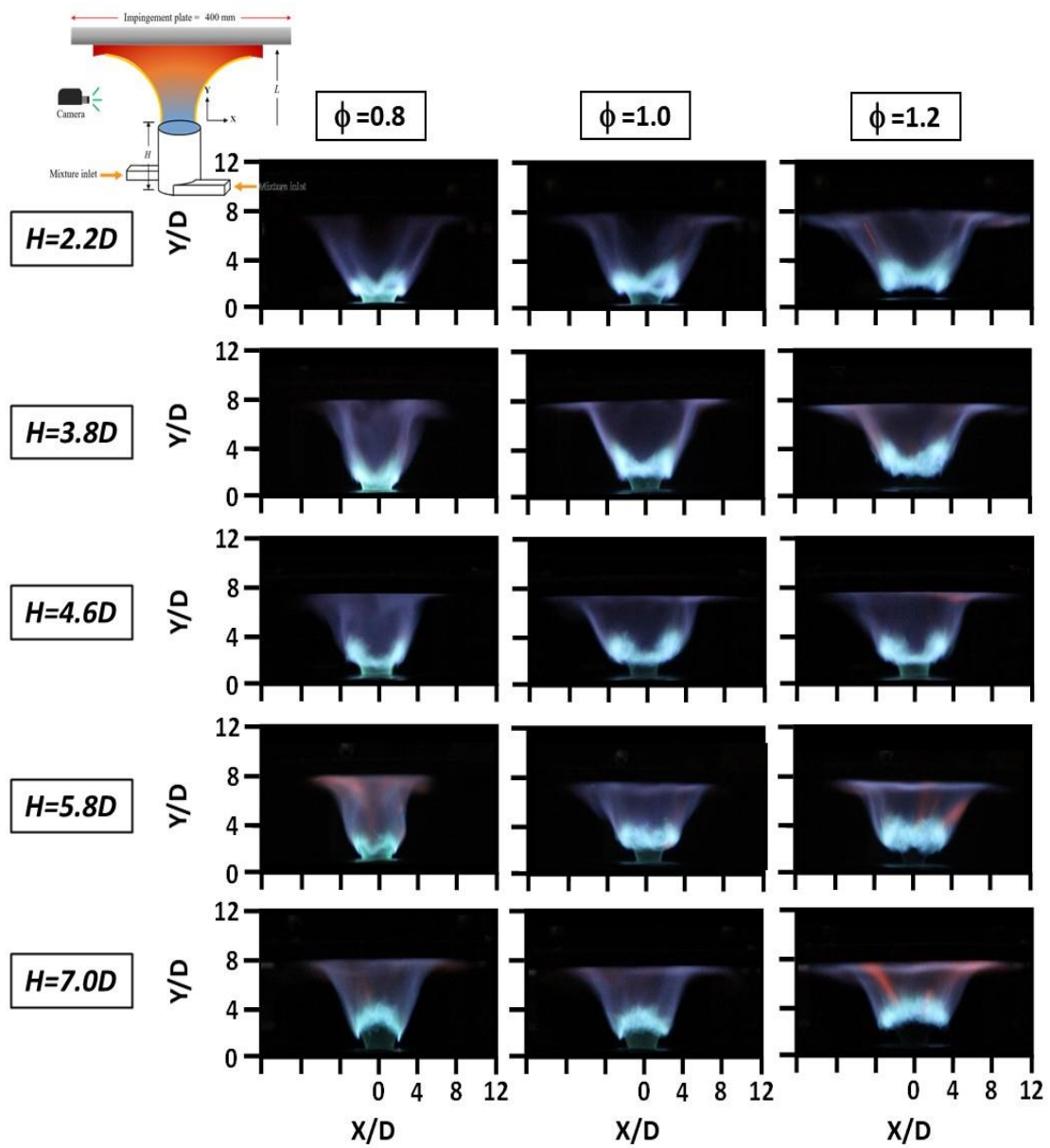
การเพิ่มค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ส่งผลให้โครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงชัดเจนมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) โซนปฏิกิริยา (Reaction zone) หรือ โซนใกล้ปากทางออก (Neck) จากรูปที่ 4.12 ภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ เปลวไฟหมุนควงในทุกอัตราส่วนสมมูลและในทุกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงเป็นสีฟ้าทั้งหมด และสังเกตได้ว่าที่ความสูงของห้อง $H=4.6D$ เปลวไฟในส่วนใกล้ปากทางออก (Neck) เกิดการยกตัวขึ้น ทำให้เปลวไฟในโซนปฏิกิริยาสัมผัสพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนได้มากที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงไปที่ $H=7.0D$ ความเร็วในการหมุนวนมากขึ้น ในระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่น้อยส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงที่ปะทะแผ่นฟุ้งชนบีบอัดเต็มช่องว่าง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=6D$ ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเริ่มเป็นเปลวไฟในส่วนโซนนอกเขตปฏิกิริยาที่สัมผัสพื้นผิวแผ่นฟุ้งชน และที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=8D$ ดังรูปที่ 4.14 พบว่าเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D$ และ $H=3.4D$ ถ้าเปลวไฟส่วนโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) บานออกทำมุมกับแนวแกนเจ็ทแต่แยกเป็นสองลำที่สัมผัสกับพื้นผิวที่ฟุ้งชนจนเกิดช่องว่างขนาดเล็กที่มุมหมุนควง 24.5° และ 18.5° แต่เปลวไฟที่สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนยังคงมีลักษณะเป็นสีฟ้าในทุกอัตราส่วนสมมูล สำหรับที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=10D$ รูปที่ 4.15 พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนสามารถทราบถึงโครงสร้างของเปลวไฟปะทะพื้นผิวได้ดีขึ้น การเพิ่มความสูงห้องส่งผลให้ตั้งอากาศรอบๆ ปากทางออกเจ็ทเปลวไฟหมุนควงเข้ามาผสม ทำให้ส่วนผสมมีการผสมที่ดีขึ้นส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงมีลักษณะเป็นสีฟ้ามากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้โครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงบีบตัวให้แคบลง และเปลวไฟในโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) บีบตัวลงเมื่อเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงและเพิ่มอัตราส่วนสมมูล



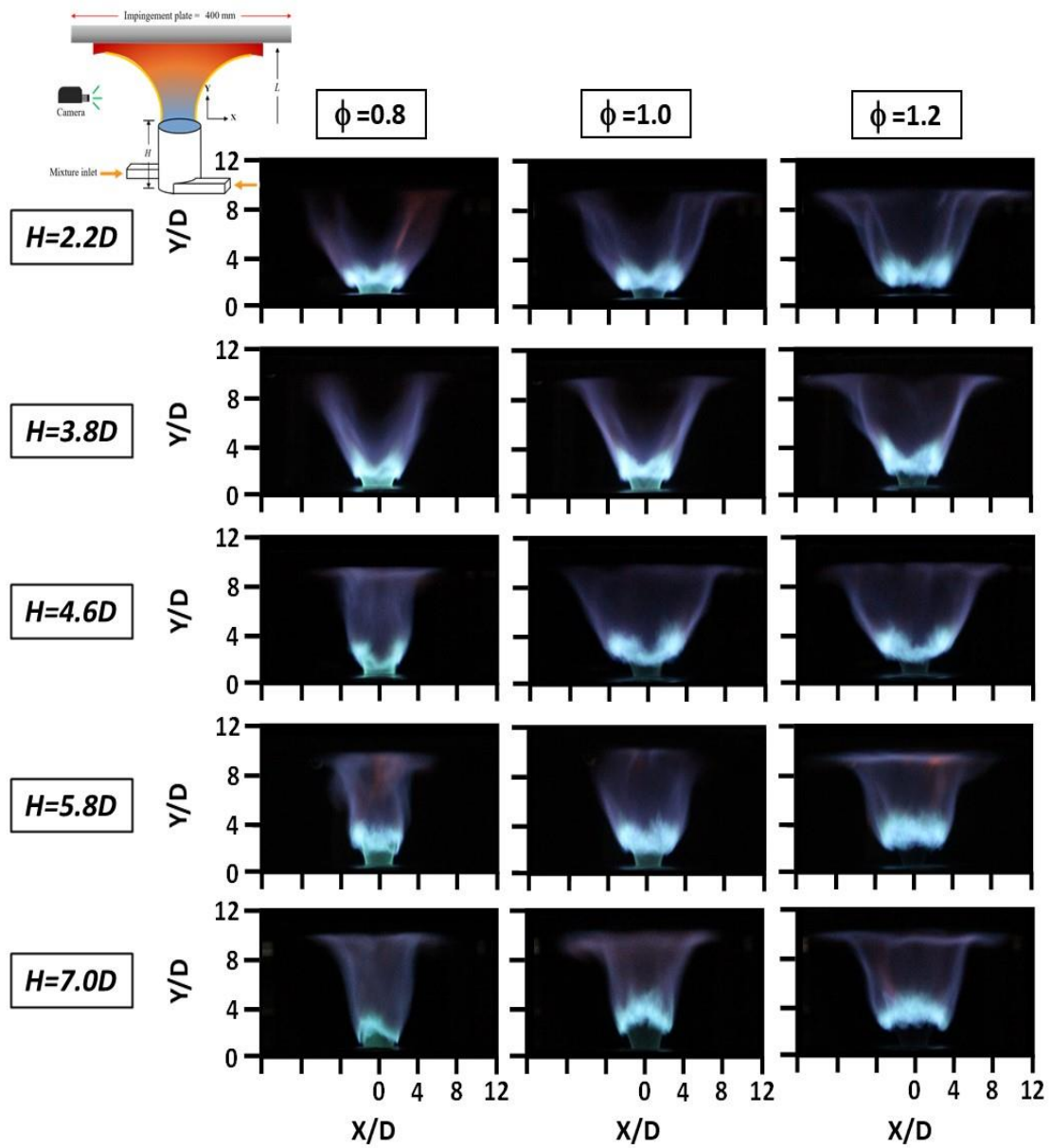
รูปที่ 4.12 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$



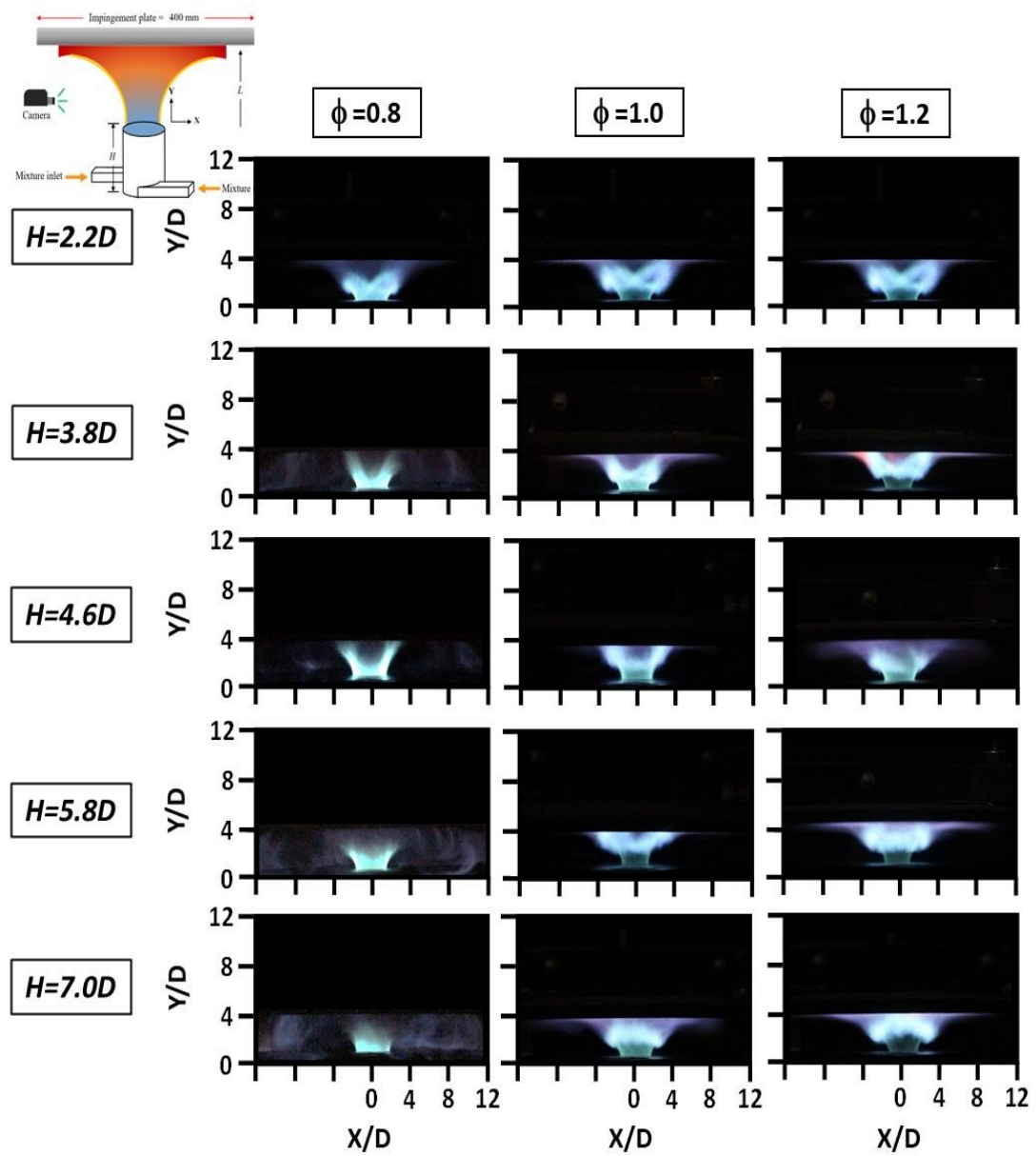
รูปที่ 4.14 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$



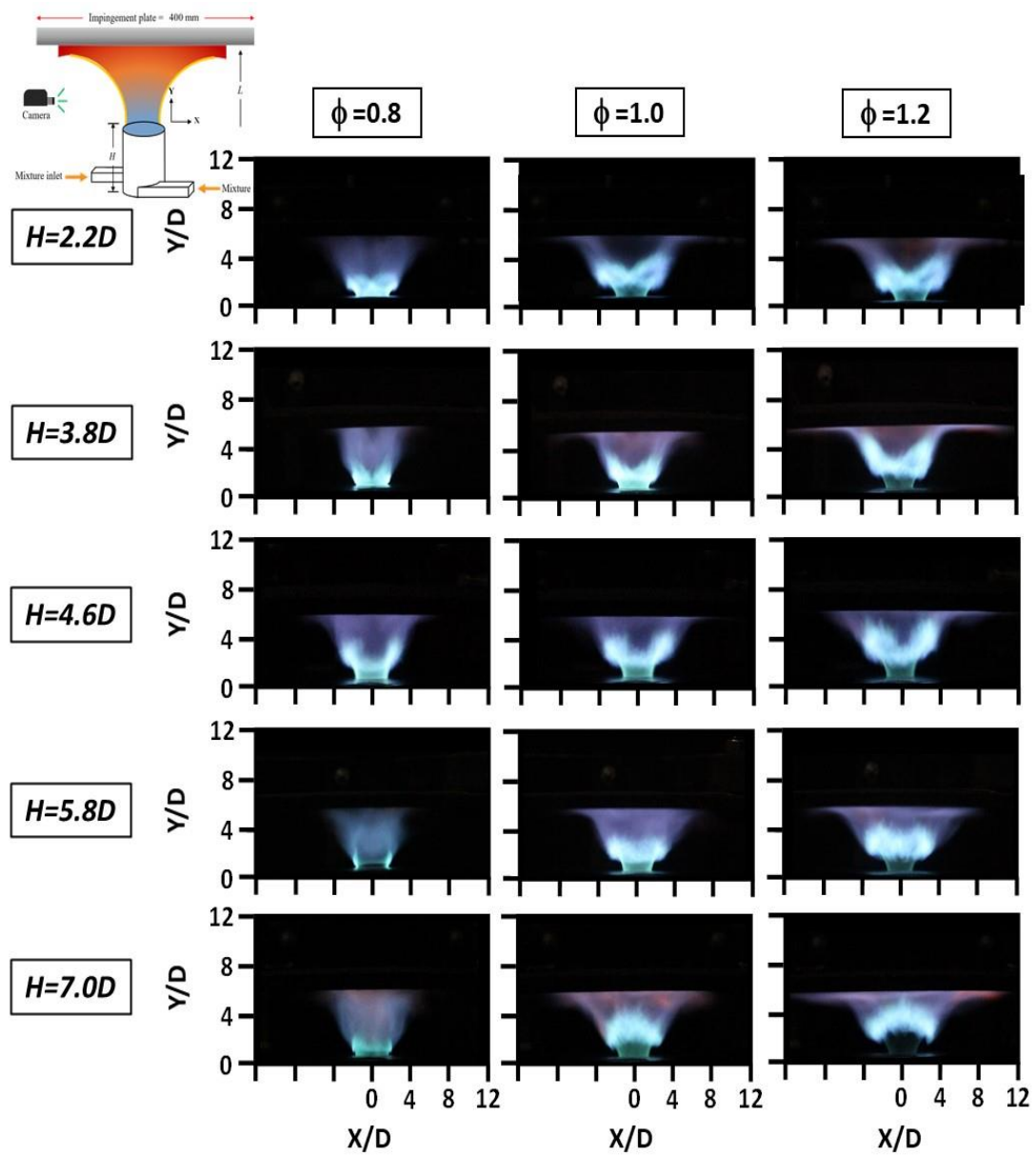
รูปที่ 4.15 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$

รูปที่ 4.16 ถึง 4.19 ลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุงชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยการศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ในทุกความสูงห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ

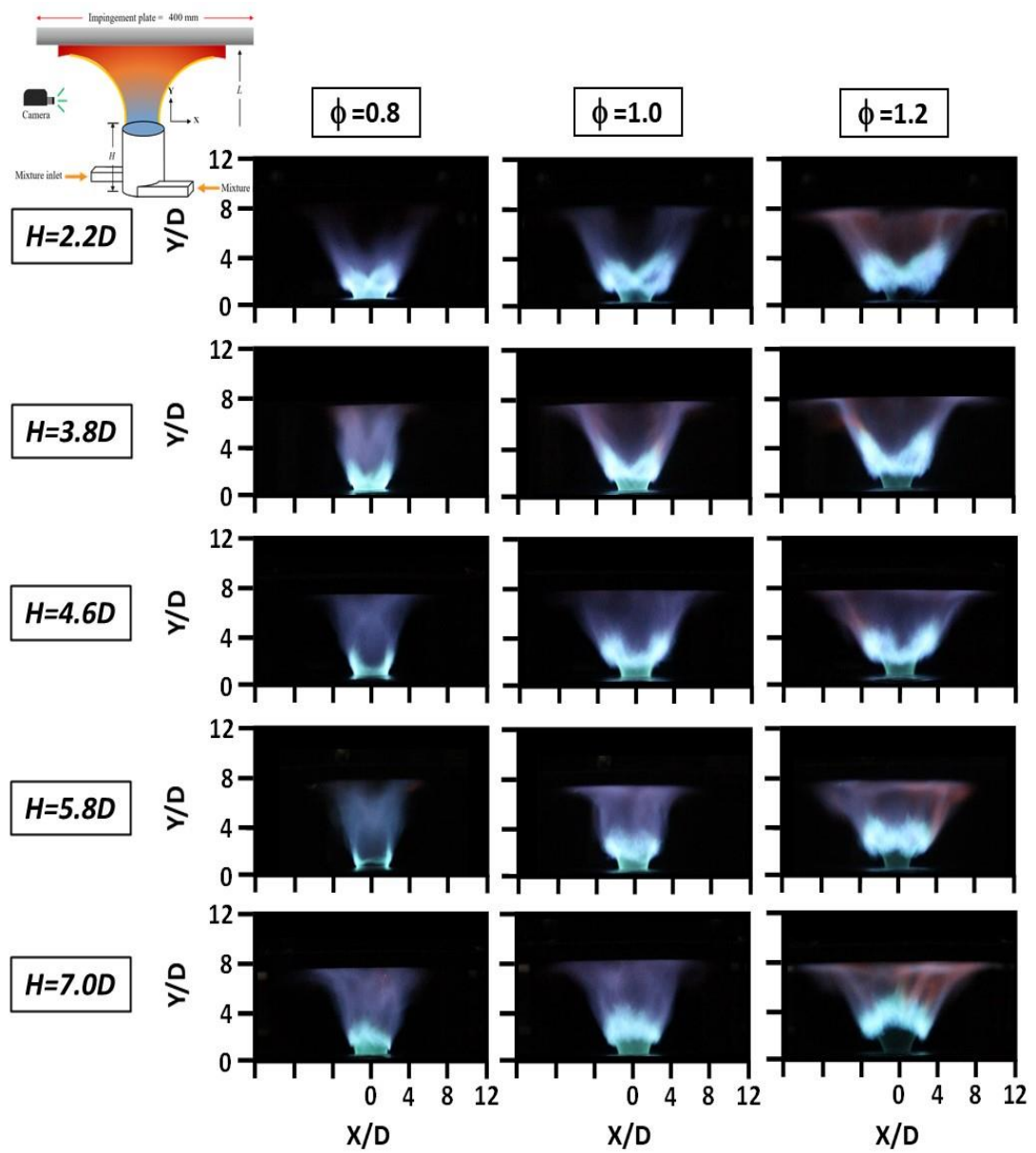
การเพิ่มค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงมีความรุนแรงมากขึ้น จากการปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิงและอัตราการไหลอากาศไปที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$ ซึ่งเป็นผลให้เปลวไฟหมุนควงที่ได้นั้นมีลักษณะสั้นที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ และ $Re=4,000$ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ส่งผลให้เปลวไฟในโซนใกล้ปากทางออก (Neck) ชัดขึ้นและยกตัวขึ้น และเปลวไฟในโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) มีความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้เมื่อเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนเท่า $L=4D$ จากรูปที่ 4.16 สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นพุงชนโดยตรง นอกจากนี้ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ส่วนผสมที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นแบบบาง มีเพียงแค่มุมสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D$ ในมุมหมุนควง 24.5° ที่ยังคงเห็นโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิว แต่เมื่อเพิ่มมุมสูงของห้องทำให้ความเร็วในการหมุนวนเพิ่มขึ้นและในระยะพุงชนที่น้อยส่งผลให้เปลวไฟที่ได้มีลักษณะบีบตัวเต็มช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชน และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนไปที่ $L=6D$ รูปที่ 4.17 ที่อัตราส่วนเท่ากับ $\phi=1.0$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$ พบว่าเปลวไฟในส่วนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) ในมุมหมุนควง 24.5° บานทำมุมกับแนวแกนเจ็ทจนเกิดเป็นช่องว่าง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนไปที่ $L=8D$ และ $L=10D$ รูปที่ 4.18 และ 4.19 อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ที่ $H=2.2D$ และ $H=3.4D$ ตามลำดับ พบว่าเปลวไฟหมุนควงมีมุมหมุนควง 24.5° และ 18.5° บานออกเป็นวงกว้างไม่ได้สัมผัสกับแผ่นพุงชนโดยตรง มีเพียงแค่รังสีความร้อนเท่านั้นที่ไหลปะทะพื้นผิวแผ่นพุงชน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลที่ $\phi=1.2$ พบว่าบริเวณปลายเปลวไฟในส่วนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) มีสีส้มปะปนเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนให้สูงขึ้นส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงไหลปะทะพื้นผิวได้น้อยลง อีกทั้งการเพิ่มมุมสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงและการเพิ่มค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ยังส่งผลต่อโครงสร้างเปลวไฟโดยตรง



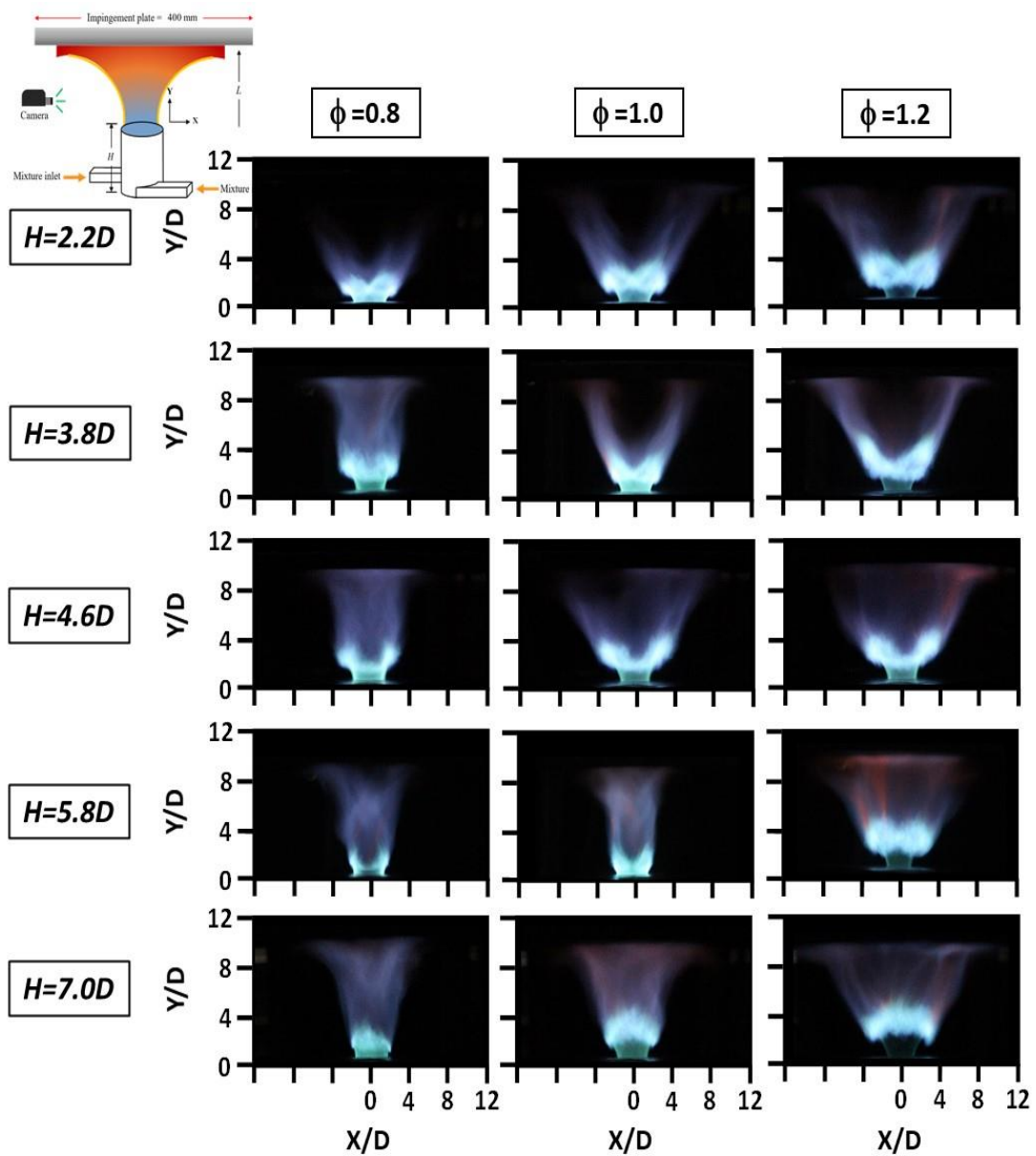
รูปที่ 4.16 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$



รูปที่ 4.17 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=6D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ $L=8D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$

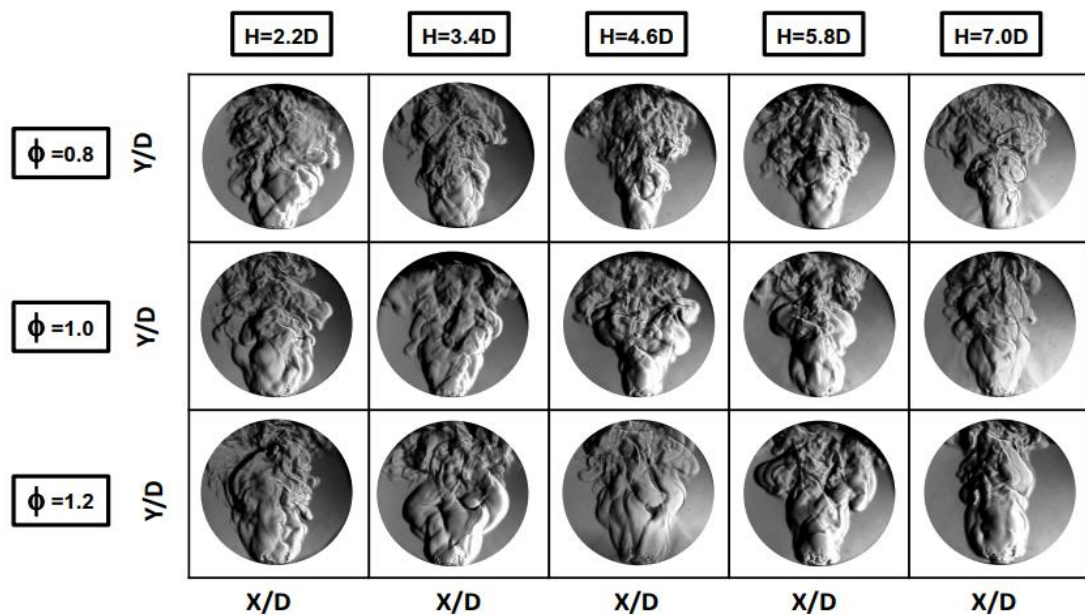


รูปที่ 4.19 โครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชนที่ $L=10D$ ที่ความสูงห้อง $H=2.2D$, $3.4D$, $4.6D$, $5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$

4.2 ผลการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren

การศึกษากการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Schlieren ที่สามารถแสดงถึงลักษณะการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ไม่สามารถอธิบายและสังเกตได้โดยกล้องดิจิตอล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เกิดจากการหักเหของแสง โดยจะเห็นเป็นลักษณะการไหลของเปลวไฟที่เกิดจากความหนาแน่นของแก๊สที่เปลี่ยนไป ทำให้สามารถมองเห็นลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงในแต่ละกรณีที่ศึกษา ในการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงจะใช้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 โดยเลือกใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ ที่มีโครงสร้างเปลวไฟสมบูรณ์ที่สุดและศึกษาในทุกความสูงของห้องที่ระยะ H

ผลการศึกษาการกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟขณะออกจากปากทางออกรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่อเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงจะสังเกตได้ว่าการกระจายความร้อนของเปลวไฟจะเริ่มบีบตัวให้แคบลง เนื่องจากการเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้ความเร็วของการหมุนวนเพิ่มขึ้นจึงทำให้เปลวไฟเกิดการบีบตัวขณะออกจากปากทางออก นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลยังส่งผลต่อโครงสร้างของเปลวไฟโดยตรง เมื่อสังเกตที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ พบว่าโครงสร้างของเปลวไฟในรูปที่ 4.6 มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูลอื่นๆ และเมื่อสังเกตบริเวณใกล้ปากทางออกสามารถเห็นจุดการแยกตัวในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยาได้ชัดเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ พบว่าโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงในรูปที่ 4.6 มีการขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนของเชื้อเพลิงที่ส่งผลให้เปลวไฟบานออกเป็นวงกว้าง เมื่อสังเกตได้จากโครงสร้างการไหลแสดงให้เห็นถึงการยกตัวของเปลวไฟหมุนควงขณะทำการเผาไหม้ และพบว่าในส่วนของโซนปฏิกิริยาจะเริ่มเห็นได้ชัดขึ้น บานออกเป็นวงกว้างจนเห็นเป็นลำแยกออกเป็นสองทางและเห็นได้ชัดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ทำให้เปลวไฟมีปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้น เปลวไฟมีความยาวและขยายตัวที่บริเวณปากทางออกมากขึ้นสังเกตได้จากรูปที่ 4.6 จึงส่งผลให้โครงสร้างการกระจายความร้อนมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น และความปั่นป่วนบริเวณปลายเปลวไฟมีมากที่สุด ในกรณีห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=4.6D$ ในมุมหมุนควง 15.5° และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลจากการศึกษากการกระจายความร้อนของเปลวไฟหมุนควงพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลและการเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลต่อโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงที่มีผลต่อการกระจายความร้อนของเปลวไฟ



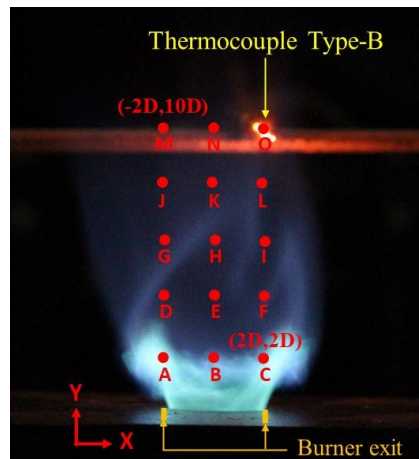
รูปที่ 4.20 การกระจายความร้อนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ อัตราส่วนสมมูล $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$

4.3 ผลการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง

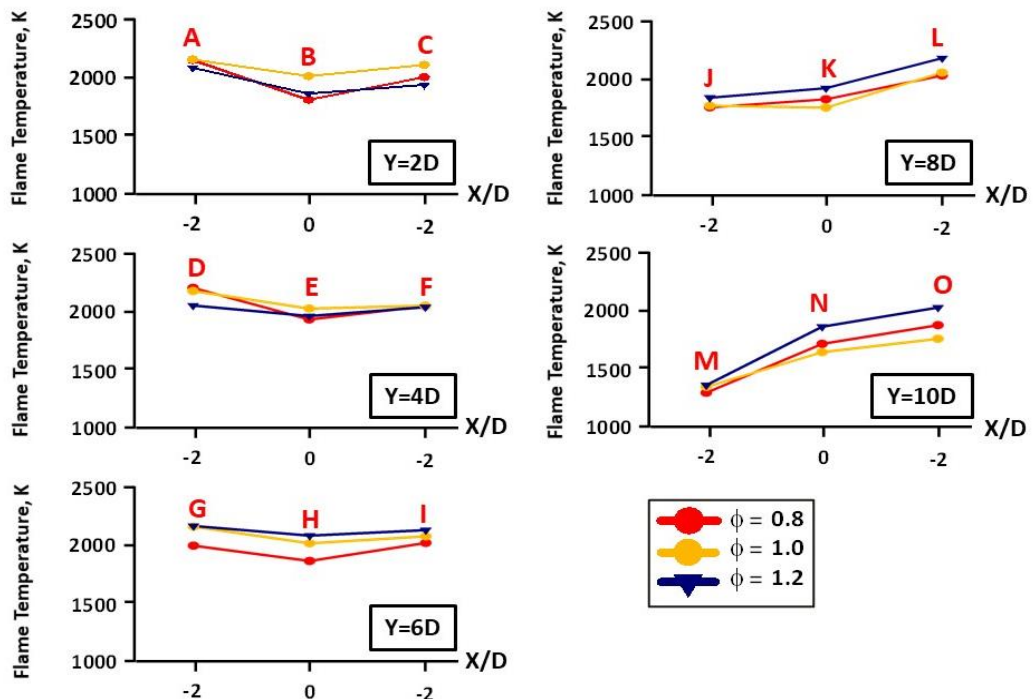
ผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงของห้องเท่ากับ $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ ซึ่งจุดที่เปลวไฟหมุนควงสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ระยะ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ กับระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ที่แสดงจุด A ถึง O ตามลำดับ

รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงอิสระที่ความสูงห้อง $H=2.2D$ ให้มุมหมุนควง 24.5° ที่ถูกวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ถูกวัดได้ที่ระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ และในระยะแกน $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามจุดวัด A ถึง O จากรูปที่ 4.22 แสดงผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงความสูงห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=2.2D$ พบว่าที่ระยะ $Y=2D$ (จุด A, B, C) สังเกตได้ว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสเปลวไฟหมุนควงในส่วนของโซนปฏิกิริยาโดยตรง ทำให้บริเวณดังกล่าวให้ค่าอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดเมื่อเทียบระยะ Y อื่น และเมื่อเพิ่มระยะ Y ให้สูงขึ้นไปที่ระยะ $Y=4D$ และ $Y=6D$ ยังคงพบว่าที่ระยะ $X=0D$ (จุด E, H) ให้อุณหภูมิต่ำกว่าระยะ X อื่นๆ เนื่องจากจุดวัดอุณหภูมิใกล้เคียงโซนปฏิกิริยาของเปลวไฟหมุนควงทำให้ระยะ $X=2D$ (จุด F, I), $X=-2D$ (จุด D, G) มีค่าสูงกว่ากรณี $X=0D$ (จุด E, H) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มระยะ Y พบว่าที่ระยะ $X=-2D$ (จุด J, M) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำโครงสร้างเปลวไฟในรูปที่ 4.21 มาอธิบายพบว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสเปลวไฟได้น้อยลงเมื่อเทียบกับกรณี $X=0D$ (จุด K, N) และ

$X=2D$ (จุด L, O) นอกจากนี้ในส่วนของอัตราส่วนสมมูลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่ใกล้เคียงกัน และพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ เปลวไฟหมุนควงจะมีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น โอกาสที่เทอร์โมคัปเปิ้ลจะสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรงสูงขึ้นเช่นกัน จึงเป็นผลให้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้อุณหภูมิเปลวไฟได้สูงสุด

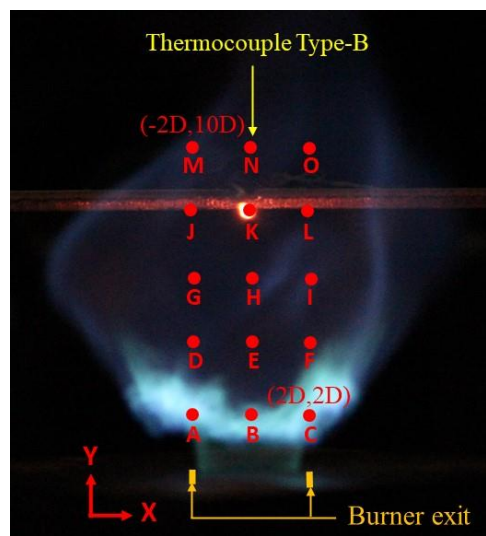


รูปที่ 4.21 เปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=2.2D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)

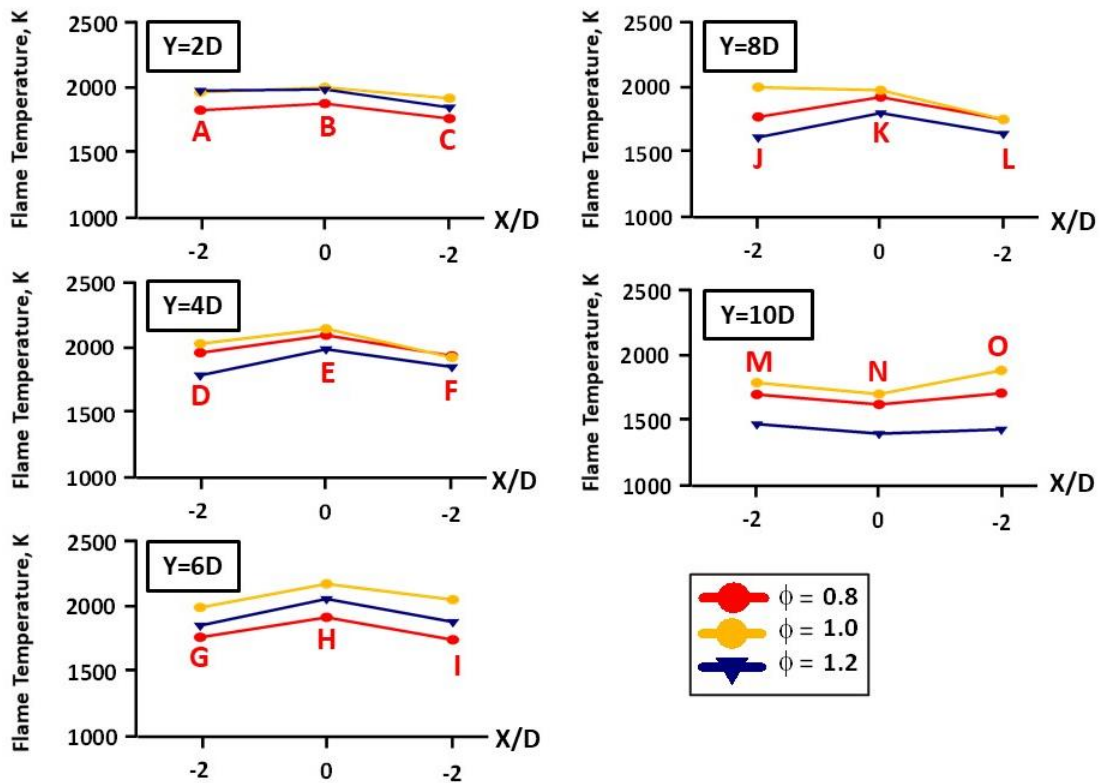


รูปที่ 4.22 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=2.2D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$

รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงอิสระที่ความสูงห้อง $H=3.4D$ ที่ถูกวัดอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B อธิบายผลของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ถูกวัดได้ที่ระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ และในระยะแกน $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามจุดวัด A ถึง O จากรูปที่ 4.24 แสดงผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้องเท่ากับ $H=3.4D$ พบว่าการเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงเกิดการยกตัว ซึ่งเปลวไฟในส่วนของโซนใกล้ปากทางออกยกตัวขึ้นสูงกว่ากรณี $H=2.2D$ เนื่องจากเปลวไฟหมุนควงเกิดการบานออกที่มุมหมุนควง 24.5° เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของห้องจึงส่งผลให้เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ระยะ $Y=2D$ (จุด A, B, C) ในแกนรัศมีระยะ $X=-2D$ (จุด A), $X=2D$ (จุด C) สัมผัสเปลวไฟในส่วนโซนปฏิกิริยาได้น้อยกว่ากรณี $X=0D$ (จุด B) และส่งผลให้บริเวณ $X=0D$ มีอุณหภูมิสูงที่สุด เมื่อเพิ่มระยะ Y นอกจากนี้เมื่อสังเกตที่ระยะ $Y=10D$ พบว่าที่ระยะ $X=0D$ (จุด N) จะให้ค่าอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากเปลวไฟหมุนควงมีลักษณะบานออกมากขึ้น ทำให้เปลวไฟในส่วนนี้มีโอกาสที่จะสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิ้ลน้อยกว่ากรณี $X=-2D$ (จุด M) และ $X=2D$ (จุด O) สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงโดยตรง ความเร็วในการหมุนควงของเปลวไฟ ทำให้องศาในการบานตัวของเปลวไฟเกิดการเปลี่ยนแปลง และพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ ให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงที่สุดในทุกระยะ Y และระยะ X

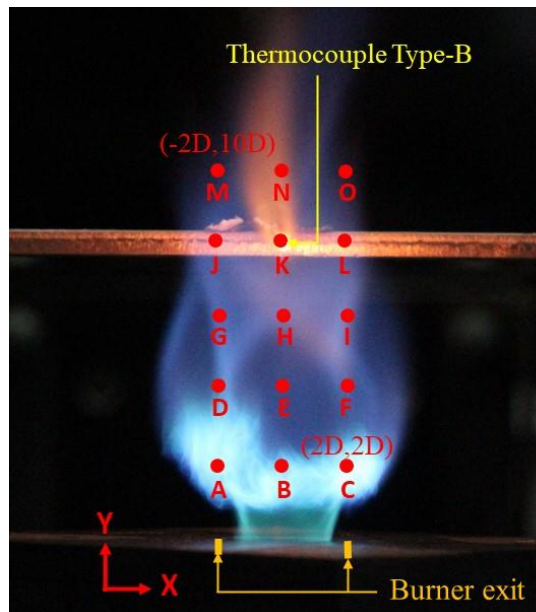


รูปที่ 4.23 เปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=3.4D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)

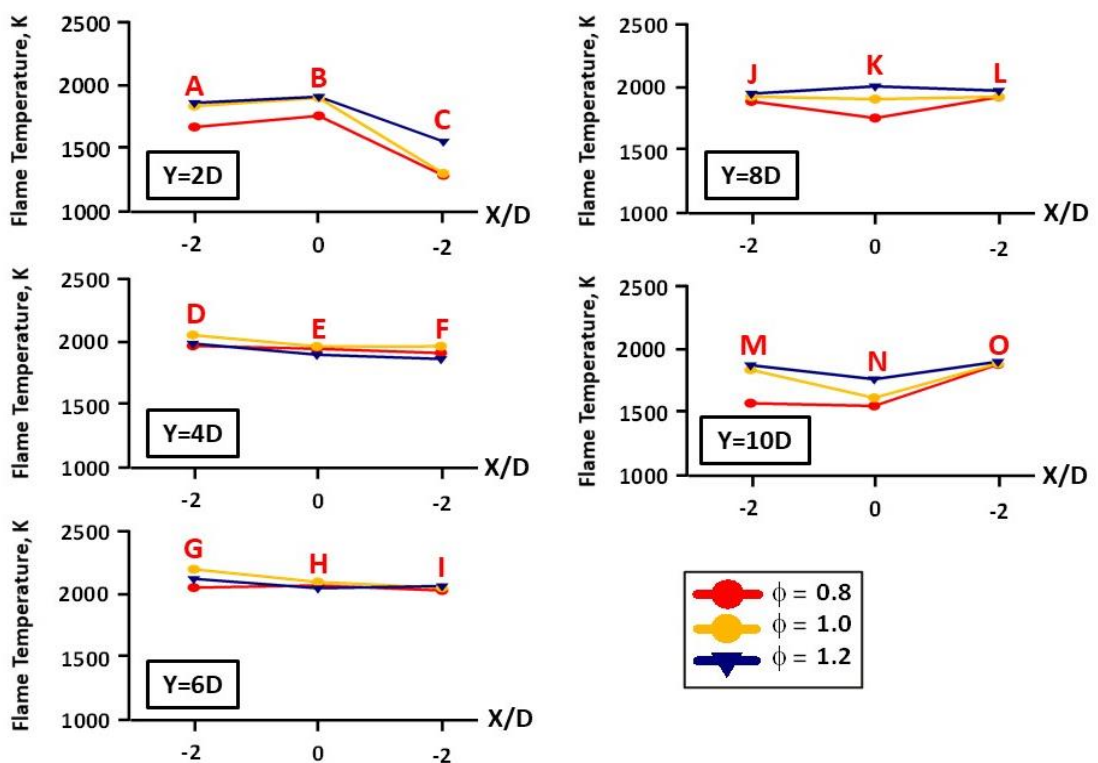


รูปที่ 4.24 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=3.4D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ $Y=2D$, $4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D$, $0D$ และ $2D$

รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงอิสระที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ ที่ถูกวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด B เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ถูกวัดได้ที่ระยะ $X=-2D$, $0D$ และ $2D$ และในระยะแกน $Y=2D$, $4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ตามจุด A ถึง O จากรูปที่ 4.26 แสดงผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ พบว่าระยะ $Y=2D$ ที่ระยะ $X=2D$ (จุด C) เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสเปลวไฟได้น้อยที่สุด ส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น และเมื่อเพิ่มระยะ $Y=4D$ ถึง $Y=6D$ พบว่าในส่วนของ $X=-2D$ (จุด D, G) เป็นจุดที่เทอร์โมคัปเปิลใกล้เปลวไฟในส่วนของโซนปฏิกิริยาจึงส่งผลให้ที่ $Y=4D$ ถึง $Y=6D$ ที่ระยะ $X=-2D$ (จุด D, G) ให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง ทำให้เปลวไฟหมุนควงบีบตัวให้แคบลงทำมุมกับแนวแกนกับเจ็ทชัดขึ้น ส่งผลให้บริเวณแกนกลางของเปลวไฟเป็นช่องว่างขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ที่ระยะ $Y=10D$ ในแนวรัศมีที่ระยะ $X=0D$ (จุด N) ให้อุณหภูมิเปลวไฟได้ต่ำที่สุด สำหรับอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเปลวไฟพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้เปลวไฟมีการขยายตัว ส่งผลให้เทอร์โมคัปเปิลมีโอกาสสัมผัสเปลวไฟหมุนควงได้มากขึ้น

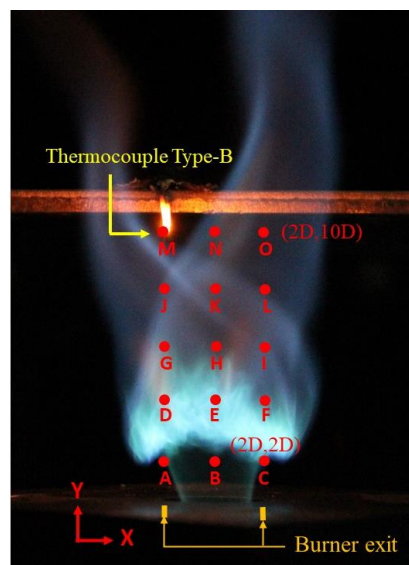


รูปที่ 4.25 เปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=4.6D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)

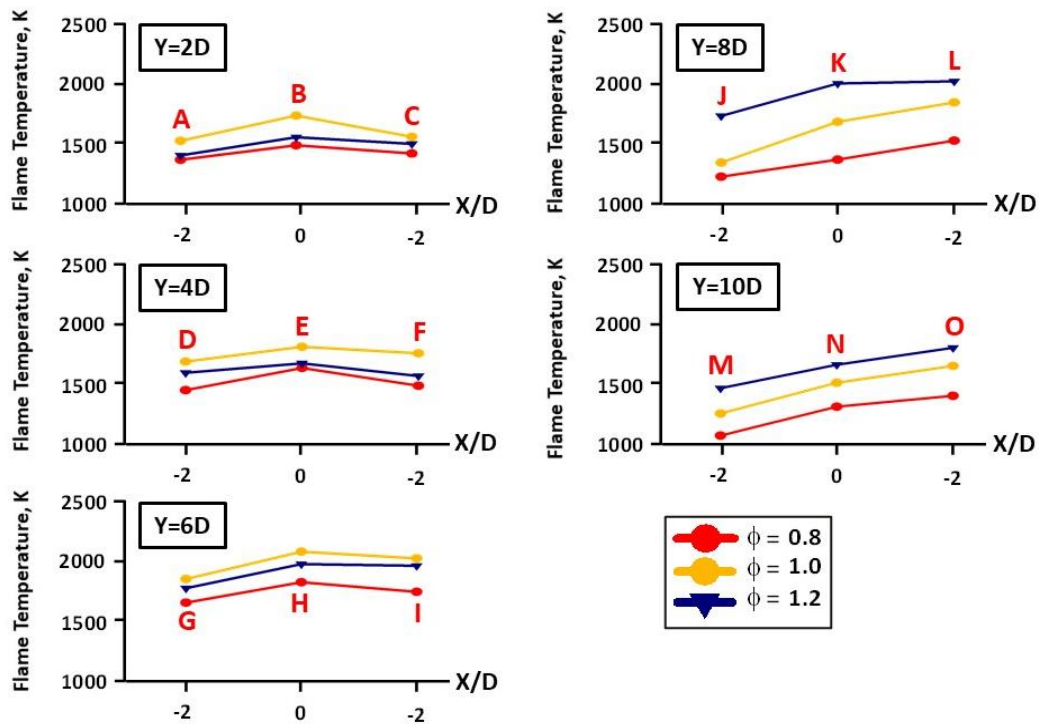


รูปที่ 4.26 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=4.6D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$

รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงอิสระที่มีความสูงห้อง $H=5.8D$ ที่ถูกวัดอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ถูกวัดได้ที่ระยะ $X=-2D$, $0D$ และ $2D$ และในระยะแกน $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามจุดวัด A ถึง O จากรูปที่ 4.28 แสดงผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=5.8D$ พบว่า การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง H ส่งผลให้เปลวไฟเกิดการยกตัวมากยิ่งขึ้น สามารถสังเกตเปลวไฟในส่วนโคนใกล้ปากทางออกยกตัวขึ้นจากปากทางออกอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดวัดอุณหภูมิเปลวไฟที่ระยะ $Y=2D$ ที่ระยะ $X=-2D$ (จุด A) และ $X=2D$ (จุด C) สัมผัสเปลวไฟได้น้อยลง แต่เมื่อเทียบกับที่ระยะ $X=0D$ (จุด B) ซึ่งเป็นจุดที่เปลวไฟสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยตรงจึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าววัดอุณหภูมิได้สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น นอกจากนี้การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงมีผลต่อโครงสร้างเปลวไฟโดยตรงจึงส่งผลให้ความเร็วในการหมุนวนสูงขึ้น ทำให้เปลวไฟจากปากทางออกบานออกเป็นสองข้างทำมุมในแนวแกนลดลงเหลือมุมหมุนควง 13.5° เกิดช่องว่างระหว่างลำเปลวไฟดังแสดงรูปเปลวไฟที่ถูกวัดในรูปที่ 4.27 และความเร็วในการหมุนวนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองศาในการเกิดลำเปลวไฟ ทำให้จุดเทอร์โมคัปเปิ้ลระยะที่ $Y=8D$ และ $10D$ ที่ระยะ $X=-2D$ (จุด J, M) ซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้กับช่องว่างระหว่างลำเปลวไฟ มีโอกาสน้อยลงที่เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสเปลวไฟ จึงส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟในส่วนนี้มีค่าต่ำสุด

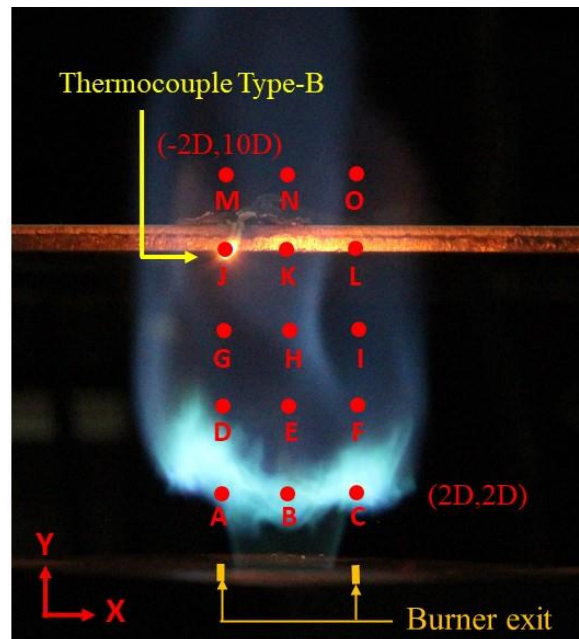


รูปที่ 4.27 เปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=5.8D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)

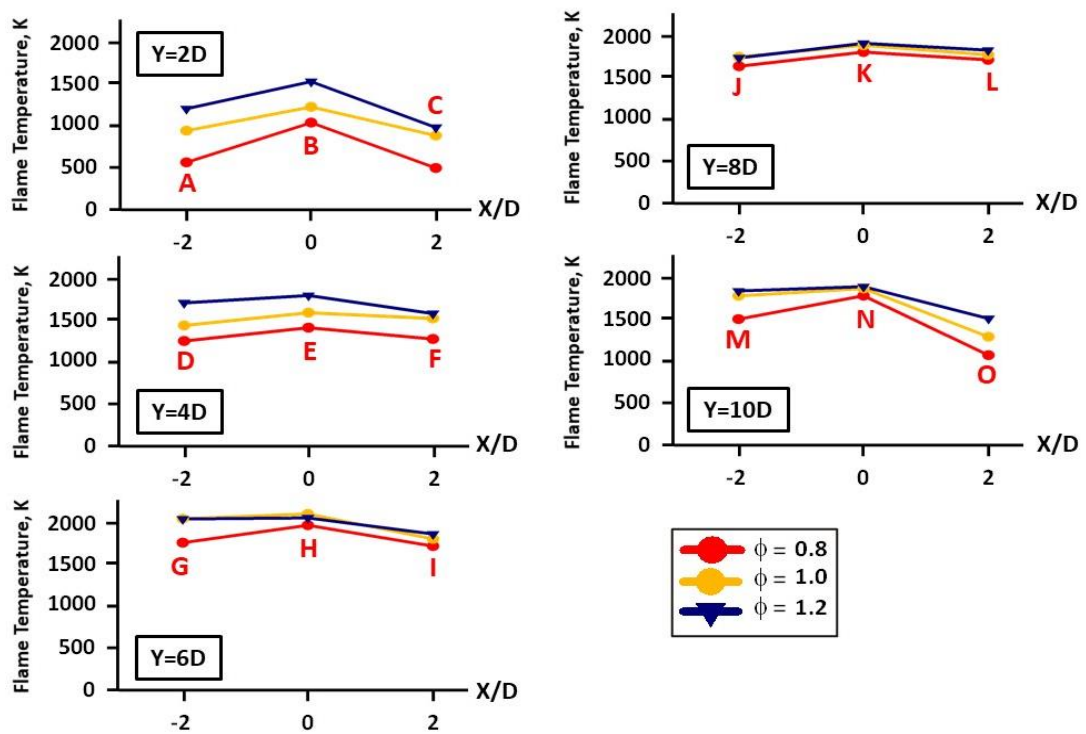


รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=5.8D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟหมุนควงอิสระที่ความสูงห้อง $H=7.0D$ ที่ถูกวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด B เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ถูกวัดได้ที่ระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ และในระยะแกน $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามจุดวัด A ถึง O จากรูปที่ 4.30 แสดงผลการวัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่ความสูงห้อง $H=7.0D$ พบว่าที่ระยะ $Y=2D$ ในบริเวณที่จุด $X=-2D$ (จุด A) และ $X=2D$ (จุด C) เปลวไฟสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิลได้น้อยกว่ากรณี $X=0D$ (จุด B) เนื่องจากเปลวไฟเกิดการยกตัวขึ้น ทำให้ที่บริเวณ $X=0D$ (จุด B) ให้อุณหภูมิสูงที่สุด เมื่อเพิ่มระยะ Y พบว่าเปลวไฟในส่วน $X=-2D$ ใกล้เคียงกับโซนปฏิกิริยาของเปลวไฟหมุนควงทำให้จุดดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเทียบกับระยะ X อื่นๆ และนอกจากนี้พบว่า การเพิ่มห้องสร้างการไหลหมุนควงทำให้เปลวไฟเกิดการบีบตัว ส่งผลให้เปลวไฟในจุดที่ไกลจากปากทางออกมีโอกาสน้อยมากที่จะสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิล และเมื่อสังเกตตำแหน่งที่ $Y=10D$ บริเวณ $X=-2D$ (จุด M) ที่ให้อุณหภูมิเปลวไฟได้สูงกว่าระยะ X อื่นๆ เนื่องจากจุดที่ถูกวัดอุณหภูมิใกล้เคียงกับโซนปฏิกิริยา และโครงสร้างของเปลวไฟที่เกิดการเปลี่ยนแปลงองศาในแนวแกนยังส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงในบริเวณ $X=-2D$ (จุด M) สัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิลได้ดีกว่าในระยะ X อื่นๆ นอกจากนี้สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้โซนปฏิกิริยาของเปลวไฟหมุนควงมีความเข้มข้นและบานออกเป็นวงกว้างมากขึ้น จึงส่งผลให้ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด



รูปที่ 4.29 เปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=7.0D$ ที่จุดวัดอุณหภูมิ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$ ($\phi=1.2, Re=4,000$)



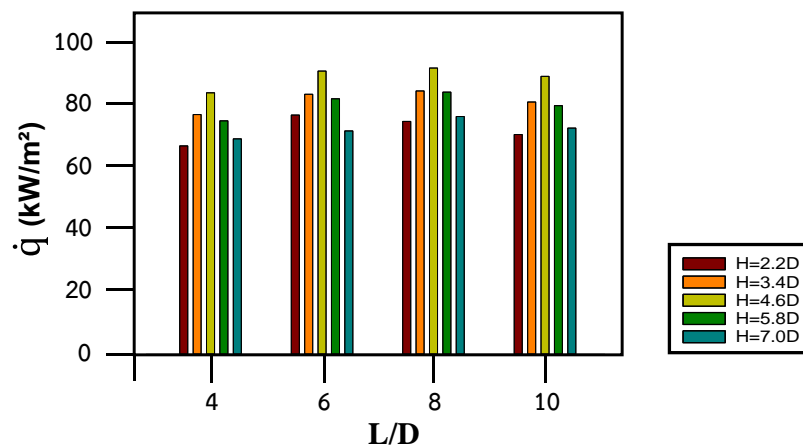
รูปที่ 4.30 อุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่มีความสูงห้อง $H=7.0D$ ถูกวัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ที่ $Y=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ในระยะ $X=-2D, 0D$ และ $2D$

4.4 ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

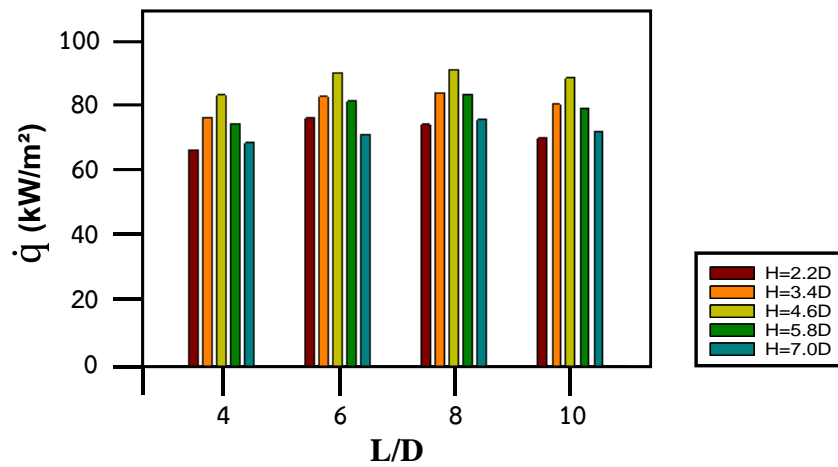
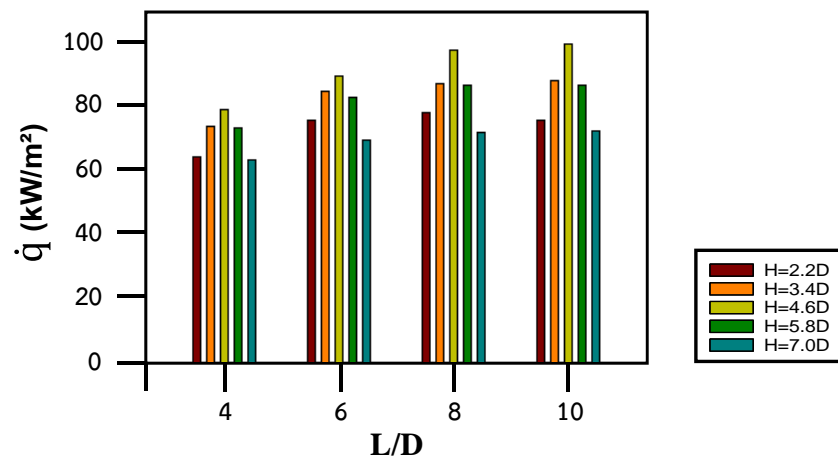
การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสำหรับวิจัยฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ การวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เซ็นเซอร์ฟลักซ์ความร้อนเป็นตัววัด

4.4.1 ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสำหรับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ โดยกำหนดอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ (ก) $\phi=0.8$, (ข) $\phi=1.0$ และ (ค) $\phi=1.2$ ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนที่ $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าที่ระยะ $L=4D$ เปลวไฟหมุนควงที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าอัตราส่วนกรณีอื่น แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนให้สูงขึ้น เปลวไฟที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ ให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเพิ่มระยะระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน เนื่องจากช่องว่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชนเพิ่มขึ้น เปลวไฟปะทะแผ่นพุ่งชนได้น้อยลง จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ ลดลงเช่นกัน นอกจากนี้สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำที่สุดในทุกกรณี เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ที่ได้จากอัตราส่วนของอากาศที่มากเกินไป ถึงแม้ว่าเปลวไฟหมุนควงจะมีลักษณะเป็นสีฟ้ามากที่สุดก็ตาม แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลไปที่ $\phi=1.2$ พบว่าเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชนมีสีส้มปะปนอยู่ในบริเวณที่เปลวไฟสัมผัสกับแผ่นพุ่งชน แต่เปลวไฟไหลราบพื้นผิวที่พุ่งชน ในขณะที่เพิ่มระยะห่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนสมมูลอื่นๆ อีกทั้งความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ซึ่งพบว่าที่ความสูงห้อง $H=4.6D$ ให้มุมหมุนควง 15.5° และให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดเมื่อเทียบในทุกกรณีที่ศึกษา



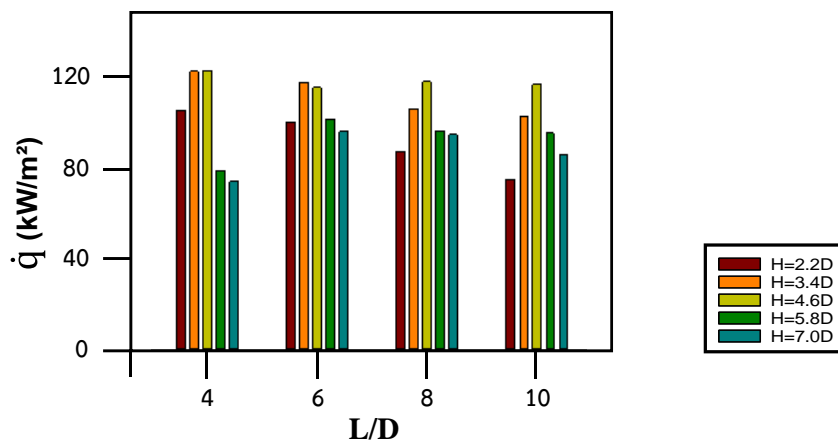
(ก) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$

(ข) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ (ค) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$

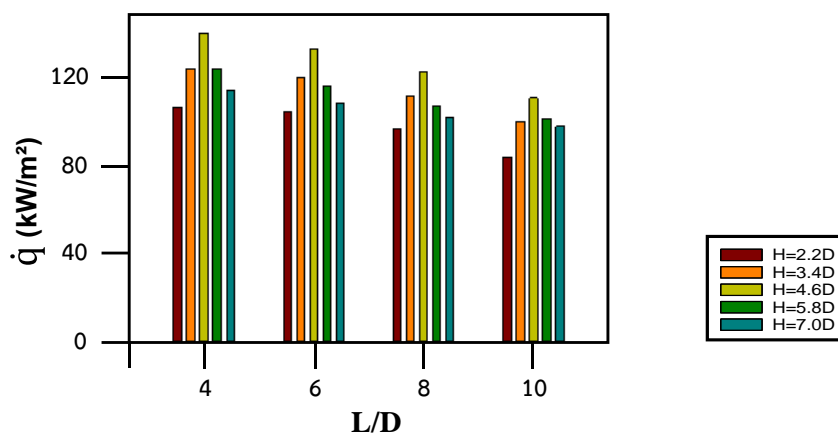
รูปที่ 4.31 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

ผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสำหรับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ โดยกำหนดอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ (ก) $\phi=0.8$, (ข) $\phi=1.0$ และ (ค) $\phi=1.2$ ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ในรูปที่ 4.32 จากผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ระยะ $L=4D$ ให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด พบว่าเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ทำให้เปลวไฟหมุนควงเกิดการยกตัวขึ้นในส่วนของเปลวไฟใกล้ปากทางออก (Neck) ส่งผลให้เปลวไฟในส่วนของโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) สัมผัสพื้นผิวแผ่นพุงชนโดยตรงซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิเปลวไฟที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เป็นตัววัดในบริเวณโซนปฏิกิริยาที่ให้อุณหภูมิสูงที่สุด ที่เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะ $L=4D$ สูงที่สุดเช่นกัน และในบางกรณีความสูงห้อง H มีแค่เปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) ที่

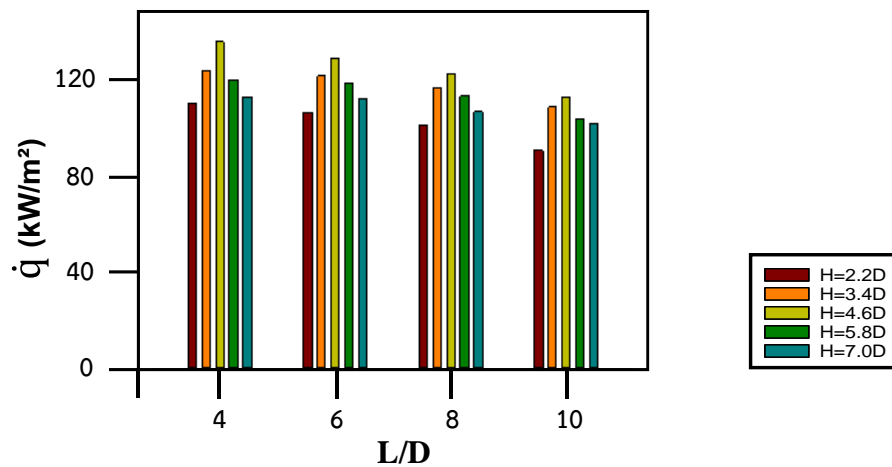
มุมหมุนควงกว้างสัมผัสแผ่นพุงชนเท่านั้นและไม่ได้ไหลราบพื้นผิวแผ่นพุงชน จึงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนให้สูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความสูงห้อง ยังส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว เปลวไฟหมุนควงเริ่มแคบตัวลงเมื่อเพิ่มความสูงห้อง H ส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงมีมุมหมุนควงลดลงสัมผัสพื้นผิวแผ่นพุงชนได้น้อยลง แต่การบานออกเป็นวงกว้างของเปลวไฟหมุนควงจะทำได้ดีในความสูงห้อง H ต่ำ แต่ยังมีข้อเสียทำให้เปลวไฟมีลักษณะเป็นลำสั้นซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลง ซึ่งในบางกรณีความสูงห้อง $H=2.2D$ ให้ค่ารังสีความร้อนจากเปลวไฟปะทะพื้นผิวทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งในกรณีที่ความสูงห้อง $H=2.2D$ ในมุมหมุนควง 24.5° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ทั้งนี้จากผลการกระจายความร้อนในรูปแบบที่ 4.20 พบว่าความปั่นป่วนในการกระจายความร้อนทำได้ดีที่สุดในกรณีความสูงห้อง $H=4.6D$ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวในกรณีความสูงห้อง $H=4.6D$ สูงที่สุด



(ก) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$



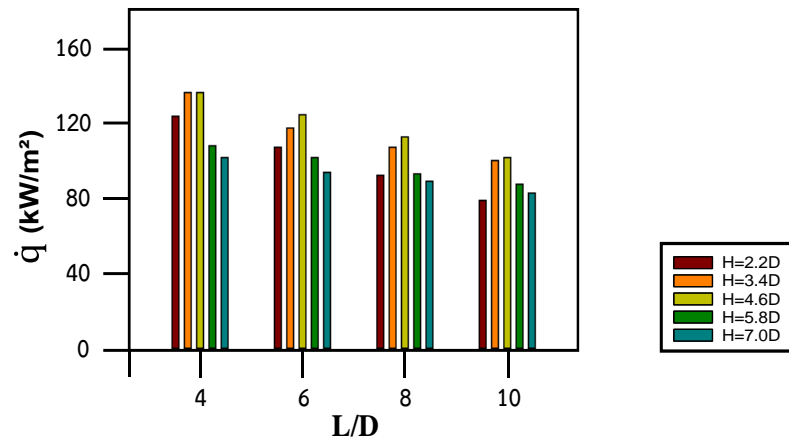
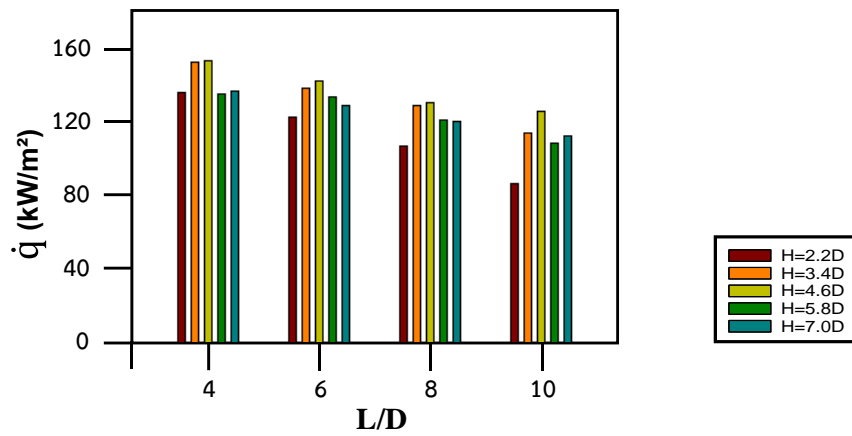
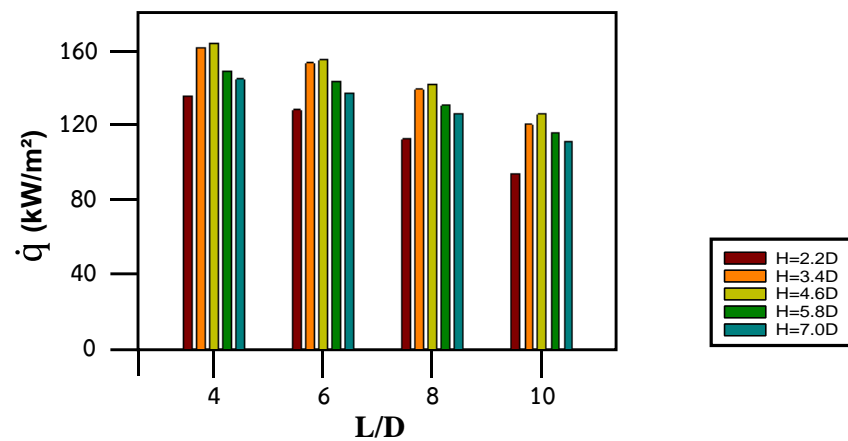
(ข) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$



(ค) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$

รูปที่ 4.32 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

จากผลการวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสำหรับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=6,000$ โดยกำหนดอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ (ก) $\phi=0.8$, (ข) $\phi=1.0$ และ (ค) $\phi=1.2$ ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าการเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ส่งผลให้เปลวไฟมีขนาดสั้นลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับเปลวไฟหมุนควงจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ และ $4,000$ จากผลการทดลองพบว่าเปลวไฟหมุนควงมีการยกตัวจากส่วนโนโซนใกล้ปากทางออก (Neck) ชัดเจนขึ้นส่งผลให้เปลวไฟในส่วนโซนปฏิกิริยา (Reaction zone) สัมผัสแผ่นพุงชนโดยตรง ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ระยะ $L=4D$ มีค่าสูงที่สุดในทุกกรณี เมื่อสังเกตที่อัตราส่วนสมมูลที่ $\phi=0.8$ ขณะเปลวไฟหมุนควงออกจากปากทางออกเกิดการบีบตัวเติมช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลง แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ พบว่าในระยะ L ที่ต่ำอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ เนื่องจากการเผาไหม้มีความสมบูรณ์ แต่เมื่อเพิ่มระยะ L ให้สูงขึ้น ช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้อากาศที่อยู่รอบๆ ปากทางออกเจ็ทถูกดึงเข้ามาเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ที่ได้มีความสมบูรณ์มากกว่ากรณีอัตราส่วนสมมูลกับ $\phi=1.0$ จึงส่งผลให้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงกว่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มระยะ L ส่งผลให้เปลวไฟในส่วนของโซนนอกเขตปฏิกิริยา (Post-combustion zone) มีสีส้มปะปนอยู่บริเวณที่เปลวไฟสัมผัสกับแผ่นพุงชน และด้วยโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$ มีขนาดเล็กเป็นลำสั้น การเพิ่มระยะ L จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงอย่างเห็นได้ชัด

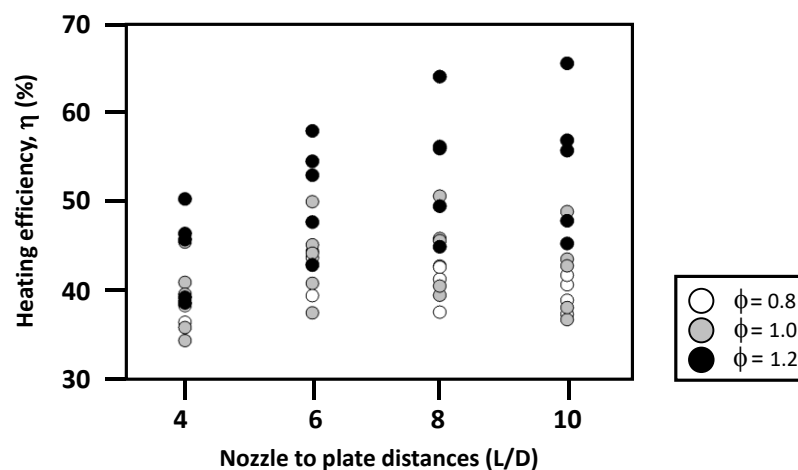
(ก) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ (ข) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ (ค) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$

รูปที่ 4.33 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

4.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน

การวัดประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$, $4,000$ และ $6,000$ ตามลำดับ ในทุกอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการศึกษาตั้งแต่ $\phi=0.8$, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$, และ $10D$ ตามลำดับ ในทุกความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ใช้ในการศึกษา เพื่อทราบถึงความร้อนที่เปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนต่อความร้อนที่พื้นผิวแผ่นฟุ้งชนได้รับ ที่ได้จากการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ในแต่ละการศึกษา

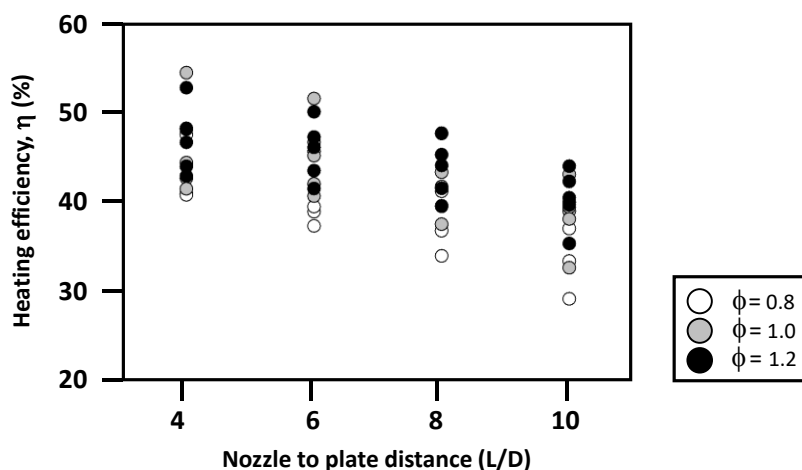
รูปที่ 4.34 ผลประสิทธิภาพทางความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 , 1.2 ตามลำดับ ในทุกความสูงของห้องเปลวไฟหมุนควงที่ใช้ในการศึกษา จากผลการประสิทธิภาพทางความร้อนพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดีที่สุดถึง $\eta=67\%$ เนื่องจากความยาวของเปลวไฟที่ปะทะพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนโดยตรง ทำให้แผ่นฟุ้งชนได้รับความร้อนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราส่วนสมมูลอื่นๆ และนอกจากนี้พบว่าที่ความสูงห้องเท่ากับ $H=4.6D$ ที่มุมหมุนควง 15.5° ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดีที่สุดในทุกระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน เนื่องจากเปลวไฟหมุนควงไหลราบและครอบคลุมพื้นผิวของแผ่นฟุ้งชนได้ดีกว่ากรณีความสูงห้องการไหลหมุนควงอื่นๆ และมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้มีความสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่วัดได้จากรูปที่ 4.31 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกัน



รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($Re=2,000$)

รูปที่ 4.35 ผลประสิทธิภาพทางความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=4,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$, 1.0 , 1.2 ตามลำดับ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน $L=4D$ ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=4.6D$ ที่มุมหมุนควง 15.5° ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดีที่สุดถึง $\eta=55\%$ เนื่องจากบริเวณนี้เป็นจุดที่เปลวไฟในส่วนโซน

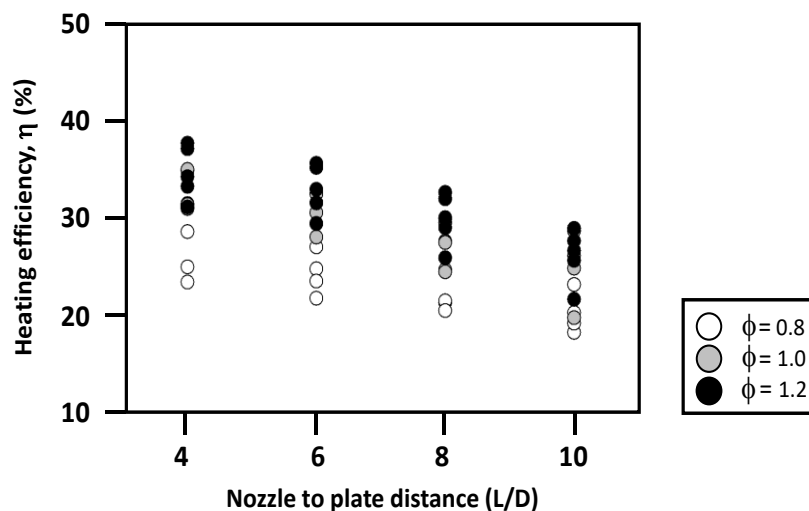
ปฏิกิริยา (Reaction zone) ที่ให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเปลวไฟในส่วนอื่น ที่สัมผัสกับพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนโดยตรง อีกทั้งจากการศึกษาพฤติกรรมการกระจายความร้อนของ $H=4.6D$ ให้ความร้อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความสูงห้องที่ระยะ H อื่นๆ เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ ที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=4.6$ ที่มุมหมุนควง 15.5° ได้สูงที่สุด นอกจากนี้จากผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวยังสอดคล้องกับผลทางประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้ทำการศึกษา ที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดีที่สุดที่ระยะ $L=4D$ และ $6D$ และลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน



รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($Re=4,000$)

รูปที่ 4.36 ผลประสิทธิภาพทางความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0, 1.2$ ตามลำดับ จากผลการวัดประสิทธิภาพทางความร้อนพบว่าการเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ส่งผลให้ความยาวของเปลวไฟลดลง ซึ่งส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อนโดยตรง เมื่อสังเกตจากโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชนพบว่าเปลวไฟสัมผัสแผ่นฟุ้งชนได้น้อยจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลง และพบว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ให้ $Re=6,000$ ให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพียง $\eta=39\%$ เท่านั้น เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเชื้อเพลิงสูง ทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อนและความสามารถในการให้ความร้อนของเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนลดลงเนื่องจากความยาวของเปลวไฟที่ลดลง ซึ่งสามารถเห็นได้จากโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนรูปที่ 4.16-4.19 มีเพียงแคระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=4D$ เท่านั้นที่สัมผัสเปลวไฟในส่วนโซนปฏิกิริยาซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความร้อนได้ดีที่สุด และพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนให้สูงขึ้นเปลวไฟหมุนควงสัมผัสพื้นผิวได้น้อยกว่ากรณี $Re=4,000$ ทำให้พื้นผิวแผ่นฟุ้งชนไม่ได้รับความร้อนเท่าที่ควร และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี

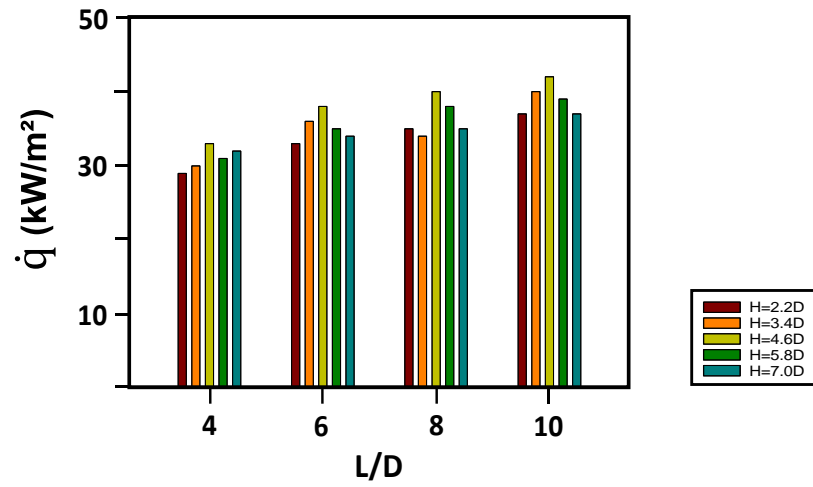
$Re=4,000$ แล้ว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียอัตราเชื้อเพลิงที่มากกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพทางความร้อนที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่สูงกว่าก็ตาม



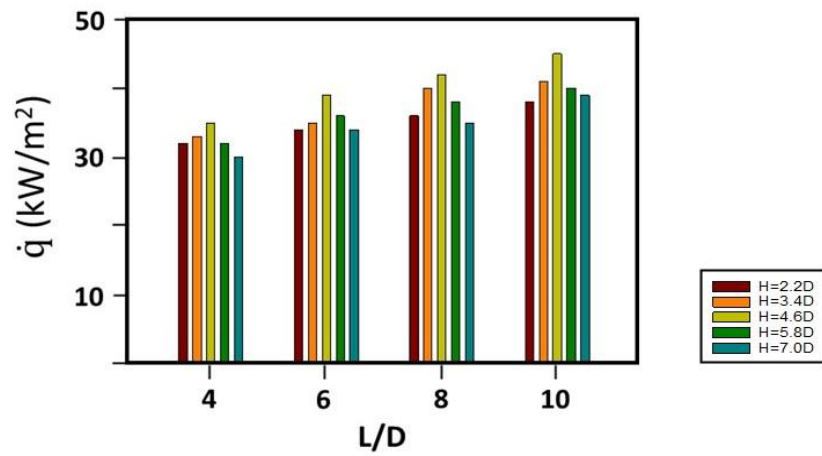
รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($Re=6,000$)

4.4.3 ผลการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

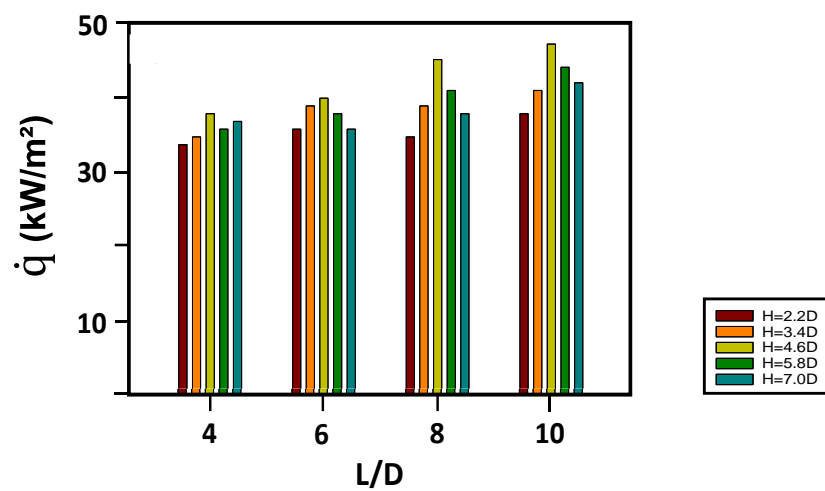
ผลการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสำหรับเจ็ทเปลวไฟหมุนควงโดยกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ (ก) $\phi=0.8$, (ข) $\phi=1.0$ และ (ค) $\phi=1.2$ ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ ในทุกระยะความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง ซึ่งพื้นที่วัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยฟลักซ์ความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 mm จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ ต่ำที่สุด ด้วยลักษณะของโครงสร้างเปลวไฟมีขนาดเป็นลำสั้นบานออกตามแนวแกน ทำให้เปลวไฟปะทะแผ่นพุงชนไหลไม่เสมอพื้นผิวแผ่นพุงชน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$ พบว่าเปลวไฟมีความยาวเพิ่มขึ้น ทำให้เปลวไฟหมุนควงไหลปะทะพื้นผิวแผ่นพุงชนได้ดีกว่ากรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลให้สูงขึ้นเท่ากับ $\phi=1.2$ ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่าสูงที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้ความยาวของเปลวไฟสูงขึ้นและสัมผัสพื้นผิวแผ่นพุงชนมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น เนื่องจากการบานตัวของเปลวไฟหมุนควงที่แปรผันตามช่องว่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุงชน อีกทั้งยังส่งผลให้อากาศที่อยู่รอบๆ ลำเจ็ทเข้ามาผสมในการเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงบีบตัวเข้าตามแนวแกนทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งในการทดลองพบว่าที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=4.6D$ ที่มุมหมุนควง 15.5° ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด



(ก) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$



(ข) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.0$



(ค) กรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$

รูปที่ 4.37 แฟล็กซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

สำหรับผลการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พบว่าการใช้การไหลแบบหมุนควง ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวให้สูงกว่ากรณีเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อโดยเฉพาะที่ เงื่อนไขของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=4.6D$ ในมุมหมุนควง 15.5° ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ดีที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ยัง ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ส่งผลให้เปลวไฟหมุนควงมีขนาดลดลง แต่การเผาไหม้ที่ในโซนปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อ เปลวไฟหมุนควงปะทะกับแผ่นพุงชนในระยะ L ที่ต่ำ ทำให้พื้นผิวแผ่นพุงชนสัมผัสเปลวไฟหมุนควงใน ส่วนของโซนปฏิกิริยาโดยตรงจึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในระยะ $L=4D$ ให้อัตรา การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด และเมื่อเพิ่มระยะระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชนให้สูงขึ้น ด้วยลักษณะ โครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงที่ขนาดเล็กลง การเพิ่มระยะห่างเจ็ทถึงแผ่นพุงชน จึงส่งผลให้อัตรา การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเช่นกัน

4.5 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควงกับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ

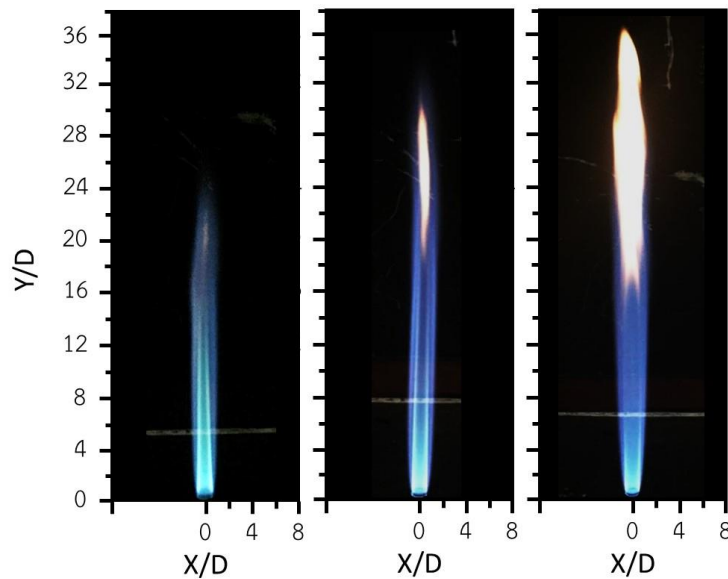
การเปรียบเทียบถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเปลวไฟแบบท่อและ เปลวไฟหมุนควง เพื่อทราบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเปลวไฟทั้งสอง ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างไร ทั้งนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จำเป็นต้องศึกษาความแตกต่างโครงสร้างของเปลวไฟอิสระและเปลวไฟพุงชนที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อ และหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน

ในการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเปลวไฟแบบท่อและ เปลวไฟหมุนควง ในกรณีเปลวไฟหมุนควงเลือกใช้ห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ให้การถ่ายเทความร้อน เฉลี่ยบนพื้นผิวได้ดีที่สุดคือความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=4.6D$ ในมุมหมุนควง 15.5° สำหรับการเปรียบเทียบใช้พื้นที่หน้าตัดของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสู่หัวฉีดทั้งสองชนิดให้มีขนาดเท่ากันเป็น หลัก เนื่องจากหัวฉีดแบบท่อมีข้อจำกัดในการใช้งาน ในการใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูง ส่งผลให้เปลว ไฟไม่มีความเสถียร ง่าย จึงเลือกใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ซึ่งเป็นค่าเรย์โนลด์นัม เบอร์ที่ต่ำที่เปลวไฟแบบท่อมีความเสถียรมากที่สุด และกำหนดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2

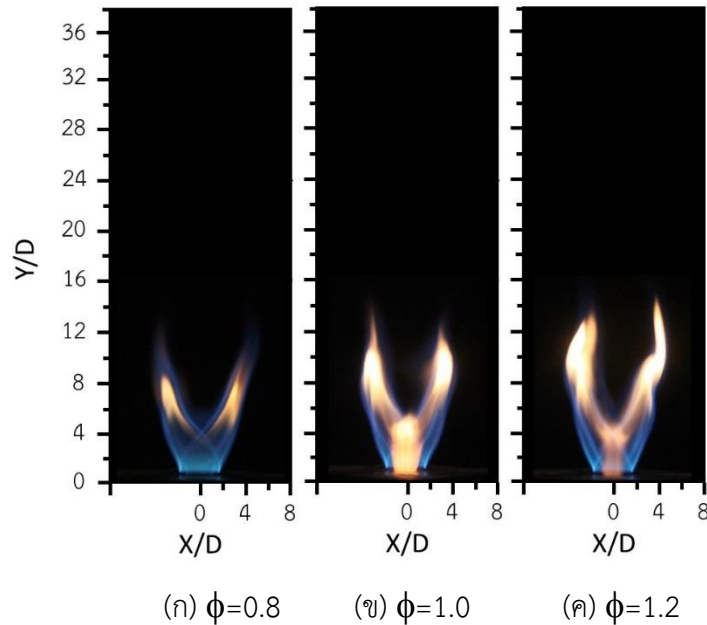
4.5.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟอิสระโดยใช้กล้องดิจิตอล

รูปที่ 4.38 โครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท่อ และรูปที่ 4.39 โครงสร้างเปลวไฟ หมุนควงอิสระ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเปลว

ไฟทั้งสองชนิดจะมีลักษณะเป็นสีฟ้ามากที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ และเริ่มมีสีส้มบริเวณปลายเปลวไฟมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูล นอกจากนี้ในกรณีเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท้อ เปลวไฟที่ได้มีลักษณะเป็นลำยาวให้ความสูงของเปลวไฟถึง $Y=36D$ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเปลวไฟพุ่มนคว พบว่า เปลวไฟพุ่มนควให้ความยาวเปลวไฟสูงสุดที่ $Y=14D$ ที่แตกต่างกันถึงสองเท่าตัว และการบานของเปลวไฟพบว่าเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท้อมีลักษณะเป็นลำยาวมีขนาดในการบานออกเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเปลวไฟแบบท้อตั้งแต่ $X=-1D$ ถึง $X=1D$ แต่กรณีเปลวไฟพุ่มนควพบว่าเปลวไฟแยกออกเป็นสองลำทำมุมกับแนวแกนปากทางออกเจ็ท และมีการขยายตัวในแกน X ตั้งแต่ $X=-6D$ ถึง $X=6D$ ทั้งนี้จากการศึกษาความแตกต่างของโครงสร้างเปลวไฟอิสระระหว่างหัวฉีดทั้งสองชนิด พบว่ากรณีหัวฉีดแบบท้อไม่มีการบังคับทิศทางของเชื้อเพลิงก่อนออกจากปากทางออกหัวฉีด แต่ในกรณีหัวฉีดเปลวไฟพุ่มนควมีการบังคับให้เชื้อเพลิงชนกันในแนวสัมผัสก่อนออกจากปากทางออกหัวฉีด ทำให้โครงสร้างของเปลวไฟมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ความแตกต่างของโครงสร้างเปลวไฟยังส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยตรง

(ก) $\phi=0.8$ (ข) $\phi=1.0$ (ค) $\phi=1.2$

รูปที่ 4.38 โครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท้อในกรณีอัตราส่วนสมมูลต่างๆ

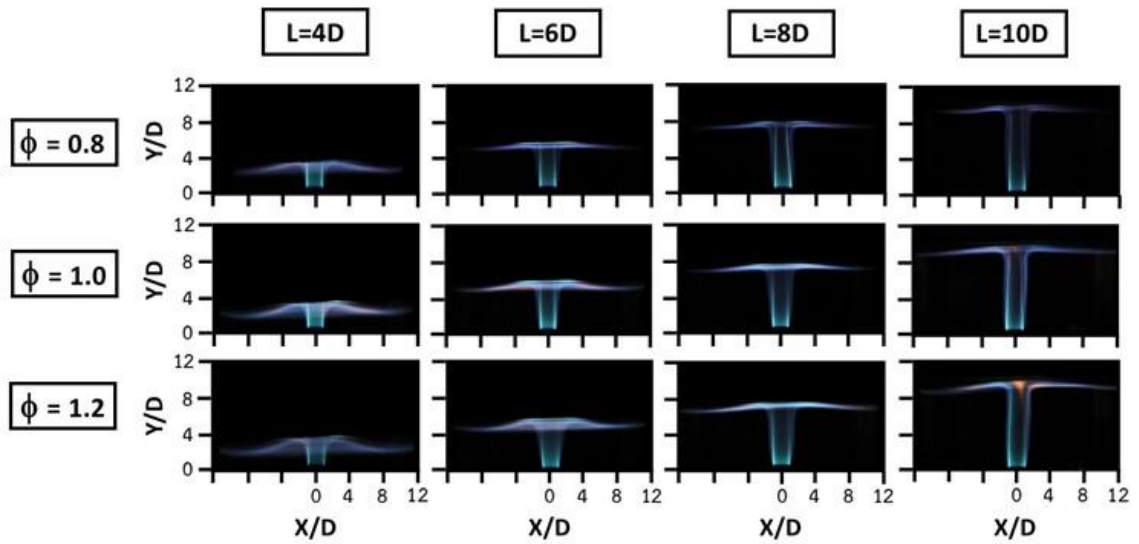


รูปที่ 4.39 โครงสร้างเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบหมุนควงในกรณีอัตราส่วนสมมูลต่างๆ

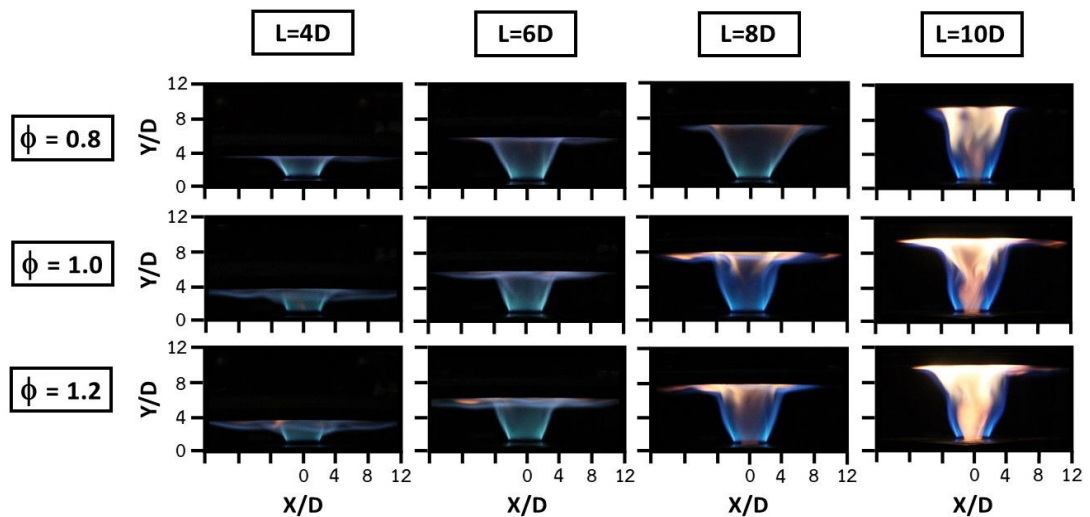
4.5.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชนโดยใช้กล้องดิจิทัล

สำหรับการเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นฟุ้งชนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ จากรูปที่ 4.40 (ก) โครงสร้างเปลวไฟฟุ้งชนจากหัวฉีดแบบท่อ (ข) โครงสร้างเปลวไฟฟุ้งชนจากหัวฉีดหมุนควง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน $L=4D$ และ $L=6D$ เปลวไฟทั้งสองชนิดขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนมีลักษณะเป็นสีฟ้าเป็นส่วนใหญ่ แต่ในกรณีเปลวไฟหมุนควงที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ สังเกตเห็นบริเวณเปลวไฟที่สัมผัสแผ่นฟุ้งชนมีสีส้มปะปนอยู่เล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนไปที่ $L=8D$ เปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อยังคงมีลักษณะเป็นสีฟ้าในทุกอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการศึกษา แต่ในกรณีเปลวไฟหมุนควงพบว่าบริเวณปลายเปลวไฟที่สัมผัสกับแผ่นฟุ้งชนมีสีส้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูล เนื่องจากการเพิ่มช่องว่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน L ลำเปลวไฟหมุนควงดึงอากาศที่อยู่รอบๆ มาเผาไหม้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟขณะเผาไหม้มีสีส้มมากยิ่งขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชนที่ $L=10D$ พบว่าเปลวไฟแบบท่อที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ มีสีส้มปะปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากเปลวไฟหมุนควงที่บริเวณแกนกลางถึงปลายของเปลวไฟที่สัมผัสกับแผ่นฟุ้งชนมีสีส้มมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูล และเมื่อสังเกตเปลวไฟทั้งสองชนิดขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8$ เปลวไฟทั้งสองชนิดสัมผัสแผ่นฟุ้งชนได้น้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลทำให้เปลวไฟมีความยาวมากขึ้น เกิดการขยายตัวมากขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟทั้งสองชนิดสัมผัสพื้นผิวได้มากขึ้นเช่นกัน โดยการเปรียบเทียบโครงสร้างเปลวไฟ

ปะทะแผ่นพุงชนระหว่างเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อกับเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควงพบว่า เปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อพุงชนพื้นผิวแค่บริเวณจุดศูนย์กลางที่เปลวไฟพุงชนเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเปลวไฟหมุนควงที่ไหลราบพื้นผิวแผ่นพุงชน



(ก) โครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นพุงชนจากหัวฉีดแบบท่อ

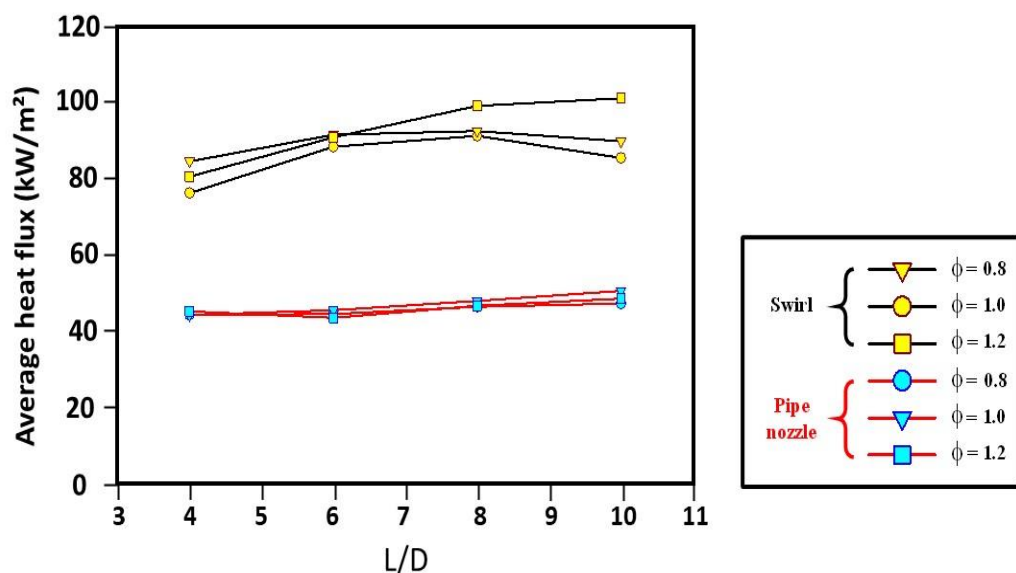


(ข) โครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นพุงชนจากหัวฉีดหมุนควง

รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายโครงสร้างเปลวไฟปะทะแผ่นพุงชน (ก) หัวฉีดแบบท่อ (ข) หัวฉีดหมุนควง

4.5.3 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

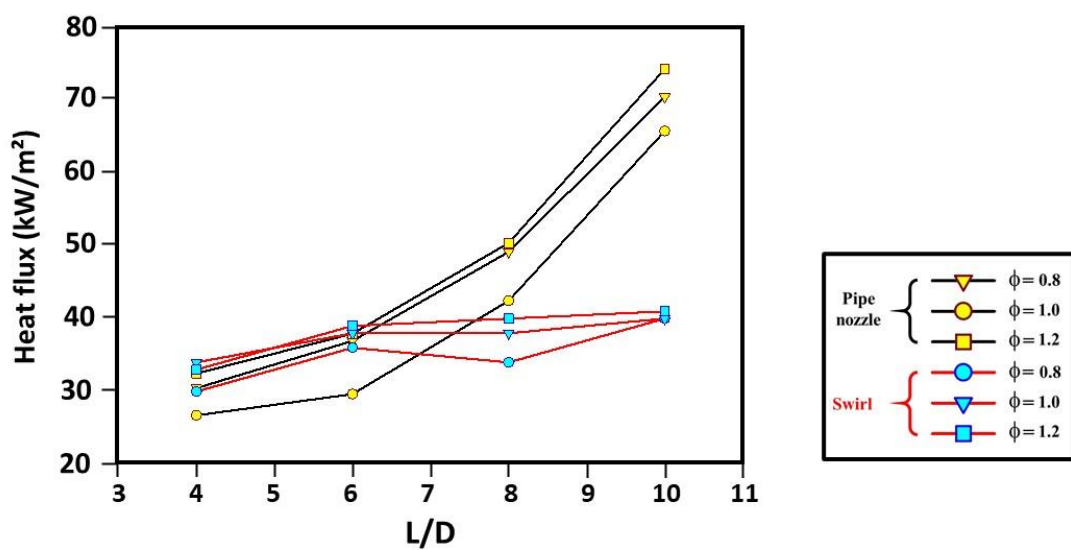
รูปที่ 4.41 ผลการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควงกับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวพบว่าเจ็ทเปลวไฟหมุนควงให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวพุ่งชนได้ดีกว่าเจ็ทเปลวไฟแบบท่อเนื่องจากโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นพุ่งชนบานออกเป็นวงกว้าง ไหลราบพื้นผิวที่พุ่งชน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีเปลวไฟแบบท่อพบว่าเปลวไฟแบบท่อให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวได้ดีเฉพาะจุดที่พุ่งชน ทำให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีเจ็ทเปลวไฟหมุนควงสูงกว่ากรณีเจ็ทเปลวไฟแบบท่อในทุกระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชน



รูปที่ 4.41 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดหมุนควงกับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ ($Re=2,000$)

หลังจากการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวแล้ว สำหรับทดลองนี้เป็นการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เซ็นเซอร์ฟลักซ์ความร้อน เพื่อเปรียบเทียบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟหมุนควงและเจ็ทเปลวไฟแบบท่อ โดยกำหนดที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ เนื่องจากพื้นที่ จากรูปที่ 4.42 แสดงผลการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทเปลวไฟหมุนควง (เส้นสีแดง) กับเจ็ทแบบท่อ (เส้นสีดำ) ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 พบว่าที่ระยะ $L=4D$ และ $6D$ ค่าการถ่ายเทความร้อนของหัวฉีดทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มระยะ L พบว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบท่อจะมีค่าสูงกว่าเจ็ทเปลวไฟหมุนควง เนื่องจากพื้นผิวของเซ็นเซอร์ฟลักซ์ความร้อนมีขนาดเล็ก จากโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงมีลักษณะบานเป็นลำ

เปลวไฟสองข้างบานออกเป็นวงกว้างทำมุมกับแนวแกนขณะปะทะพื้นผิวเซ็นเซอร์ในระยะ L ที่สูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อที่มีลักษณะเป็นลำยาว ซึ่งมีโอกาสที่จะพุ่งชนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ได้ดีกว่ากรณีเปลวไฟหมุนควง และให้ฟลักซ์ความร้อนได้ดีในเฉพาะจุดที่พุ่งชน ทั้งนี้เมื่อนำเจ็ททั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกันฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในระยะ L ที่ต่ำเจ็ทเปลวไฟหมุนควงจะทำได้ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มระยะ L ให้สูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบท่อจะสูงกว่า



รูปที่ 4.42 ผลการวัดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่งเจ็ทเปลวไฟหมุนควง กับเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ ($Re=2,000$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเปลวไฟหมุนควงโดยการฉีดลำเจ็ทเชื้อเพลิง LPG ผสมอากาศจำนวน 2 ลำในแนวสัมผัสของห้องทรงกระบอก จากการศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลวไฟแบบผสมก่อนปะทะโดยตรง ในการเปลี่ยนระดับความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความรุนแรงของการหมุนควง สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000, 4,000$ และ $6,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลระหว่างแก๊ส LPG และอากาศเท่ากับ $\phi=0.8, 1.0$ และ 1.2 และระยะห่างจากทางออกเจ็ทถึงแผ่นฟุ้งชน $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษารณิเปลวไฟแบบทอเพื่อเปรียบเทียบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) จากการศึกษาโครงสร้างเปลวไฟเจ็ทหมุนควงโดยการถ่ายภาพดิจิทัลและแบบ Schlieren พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงมีผลต่อโครงสร้างของเปลวไฟหมุนควง โดยลักษณะของเปลวไฟหมุนควงในส่วนนอกเขตปฏิบัติการบานออกเป็นวงกว้าง แต่เมื่อเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลพบว่าเปลวไฟหมุนควงที่ออกจากปากทางออกมีลักษณะบีบตัว เนื่องมาจากการเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงส่งผลให้ความรุนแรงในการหมุนควงเพิ่มขึ้น ทำให้เปลวไฟหมุนควงขณะออกจากปากทางออกมีลักษณะบีบตัวให้แคบลง ซึ่งในแต่ละความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงตั้งแต่ $H=2.2D, 3.4D, 4.6D, 5.8D$ และ $7.0D$ ให้มุมหมุนควง $24.5^\circ, 18.5^\circ, 15.5^\circ, 13.5^\circ$ และ 10.5° ตามลำดับ และนอกจากนี้พบว่า ที่ความสูงของห้อง $H=4.6D$ ให้การปั่นป่วนการกระจายความร้อนบริเวณปลายเปลวไฟที่ให้มุมหมุนควง 15.5° มากที่สุด สำหรับอัตราส่วนสมมูลที่มาจาก การปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างแก๊ส LPG และอากาศยังส่งผลต่อสีและขนาดของเปลวไฟ โดยการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลพบว่าเปลวไฟหมุนควงมีสีส้มมากขึ้น และเปลวไฟยาวขึ้น เนื่องจากส่วนผสมที่ใช้มีปริมาณเชื้อเพลิงมากเกินไป และสีของเปลวไฟที่มีลักษณะเป็นสีส้มเป็นส่วนมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้เปลวไฟในส่วนบริเวณใกล้ปากทางออกยกตัวสูงขึ้น และความปั่นป่วนในส่วนปลายเปลวไฟจะเริ่มลดลง

(2) จากการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B สัมผัสกับโครงสร้างเปลวไฟหมุนควงโดยตรง พบว่าเมื่อเทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสกับเปลวไฟในส่วนของโซนปฏิบัติการส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่วัดได้มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเปลวไฟในส่วนอื่น ทั้งนี้การเพิ่มความสูง

ของห้องสร้างการไหลหมุนควงทำให้เปลวไฟหมุนควงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไข อย่างไรก็ตาม ในการวัดอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้กำหนดจุดวัดอุณหภูมิที่ตายตัวให้การวัดอุณหภูมิของเปลวไฟในแต่ละครั้งสัมผัสในส่วนโครงสร้างเปลวไฟที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้แนวโน้มของอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควงที่วัดได้ไม่สอดคล้องกับโครงสร้างของเปลวไฟที่ได้จริง

(3) สำหรับผลการศึกษากการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขณะเจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว พบว่าที่ระยะห่างจากทางออกถึงแผ่นพุ่งชน $L=4D$ เป็นระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงแผ่นพุ่งชนที่สัมผัสกับโซนปฏิกิริยาโดยตรง ซึ่งเป็นโซนที่ให้อุณหภูมิเปลวไฟที่สูงที่สุด เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้สูงที่สุดในทุกกรณีการศึกษา นอกจากนี้ในการศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่าที่ความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง $H=4.6D$ ที่ให้มุมหมุนควง 15.5° ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้สูงที่สุดในทุกกรณี เนื่องจากความปั่นป่วนในการแพร่กระจายความร้อนจากการเผาไหม้ระหว่างเปลวไฟและของไหลที่อยู่รอบๆ สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ และให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นวงกว้างอย่างสม่ำเสมอ แต่การเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลมีผลทำให้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ได้ลดลงเนื่องจากบริเวณในการถ่ายเทความร้อนลดลง

(4) ในการหาประสิทธิภาพทางความร้อนพบว่าที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ $Re=2,000$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $\phi=1.2$ ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงถึง $\eta=67\%$ ถึงแม้ว่าการเพิ่มค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง

(5) สำหรับการเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควงและเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ พบว่า ที่เงื่อนไขระยะพุ่งชนที่น้อยกว่า $L=6D$ เจ็ทเปลวไฟหมุนควงให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเจ็ทเปลวไฟจากท่อทั้งกรณีการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งพื้นผิวและเฉพาะจุดกึ่งกลางของหัวฉีด แต่เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชนให้สูงขึ้นมากกว่า $L=6D$ ด้วยโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อให้ความร้อนได้ดีเฉพาะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดกึ่งกลางของหัวฉีดของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงต่ำกว่าเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อให้การถ่ายเทความร้อนต่ำถึง 30% ในทุกอัตราส่วนสมมูลและที่ระยะพุ่งชนมากกว่า $L=8D$ แต่ด้วยโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงบานออกเป็นวงกว้าง และไหลปะทะครอบคลุมบนพื้นผิวเป็นวงกว้าง จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวจากเปลวไฟหมุนควงสูงกว่ากรณีเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อในทุกอัตราส่วนสมมูลและทุกระยะพุ่งชนมีค่าสูงถึง 40%

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควงของเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ Heat flux microsensors เป็นตัววัด เพื่อเพิ่มความเข้าใจในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมากยิ่งขึ้น

(2) ศึกษาการกระจายความเร็วและระดับความปั่นป่วนของเจ็ทเปลวไฟหมุนควงเพื่อเป็นข้อมูลในการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

(3) สำหรับการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟหมุนควง ควรเพิ่มเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดรอบเปลวไฟหมุนควง เพื่อแสดงให้เห็นถึงการกระจายของอุณหภูมิเปลวไฟมากยิ่งขึ้น

(4) ศึกษาแนวทางในการสร้างการหมุนวนเป็นเปลวไฟหมุนควง เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานและเพิ่มโอกาสต่อยอดงานวิจัย

(5) ควรกำหนดค่า Firing rate เพื่อทราบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่วัดได้จริง

(6) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของการไหลแบบหมุนควง (Swirl flow) โดยใช้โปรแกรม ANSYS (Computational Fluid Dynamics) เพื่อทราบถึงพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

บรรณานุกรม

- [1] Ashforth-Frost, S., and Jambunathan, K., 1996, "Effect of nozzle geometry and semi- confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, No 2, pp 155–162.
- [2] Livingood, J.N.B., and Hrycak, P., 1973 "Impingement heat transfer from turbulent air stream jets to flat plates-A literature survey.", pp. 1–63.
- [3] Siamchemi, LPG Gas. On-line. Available from internet, <https://www.siamchemi.com/gas-LPG>. accessed 6 May 2020.
- [4] Hahn, E., LPG Properties & LPG Composition- What Are the Properties of LPG. On-line. Available from internet, <https://www.elgas.com.au/blog/453-the-science-a-properties-of-lpg>, accessed 2 June 2020.
- [5] Boonyopas, W., (2017), Study of heat transfer for multiple flame jet, Thesis for the degree of bachelor's mechanical engineering, Prince of Songkla University.
- [6] PTT Public Company Limited., Combustion Requirements. On-line. Available from internet, [https://dscng.pttplc.com/\(S\(0vwb4uftzyf4zskdig5cdpco\)\)/knowledge/Knowledge-inside?p=Natural_Gas_Combustion](https://dscng.pttplc.com/(S(0vwb4uftzyf4zskdig5cdpco))/knowledge/Knowledge-inside?p=Natural_Gas_Combustion), accessed 12 June 2020.
- [7] Hottel, H.C., Hawthorne, W.R., 1949, "Diffusion in laminar flame jets. In: Proceeding of third symposium on combustion and flame and explosion phenomena", Williams & Wilkins, Baltimore, pp 254–266.
- [8] Beck, K., Bandoim, L., Flame Color Temperature Chart. On-line. Available from internet, <https://sciencing.com/colors-fire-hot-8631323.html>, accessed 12 June 2020.
- [9] Horsley, M.E., Hemeson, A.O., M.R.I. Purvis, A.S. Tariq, "Heat transfer from flames to convex surfaces", *Instn Chem. Engng. Symp. Ser. 2*, Vol. 86, pp. 969-978.
- [10] Zhen, Z., (2006), Effects of impingement plate on thermal performance of premixed impinging flame jet, Thesis for the degree of doctor philosophy, Hong Kong Polytechnic University.
- [11] Hargrave, G. K., Fairweather, M. and Kilham, J. K., Forced., 1987, "Convective heat transfer from premixed flames-part 1: flame structure", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 8, pp. 55-63

- [12] Zhang, Y., Bray, K.N.C., 1999, "Characterization of impinging jet flames", *Combustion and flame*, Vol. 116, pp. 671-674.
- [13] Cremers, M.F.G., Remie, M.J., Schreel, K.R.A.M., Goey de, L.P.H., 2004, "Heat transfer mechanisms of laminar flames of hydrogen and oxygen", *Combustion and Flame*, Vol. 139, pp. 39-51.
- [14] Remie, M.J., Cremers, M.F.G., Schreel, K.R.A.M., Goey de, L.P.H., 2007, "Analysis of the heat transfer of an impinging laminar flame jet, *Int. J.*", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2816-2827.
- [15] Remie, M.J., Särner, G., Cremers, M.F.G., Omrane, A., Schreel, K.R.A.M., Aldén, L.E.M., Goey de, L.P.H., 2008, "Heat-transfer distribution for an impinging laminar flame jet to a flat plate", *Int. J., Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 3144-3152.
- [16] Tuttle, S.G., Webb, B.W., McQuay, M.Q., 2005, "Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part I: Time-averaged results", *Int. J., Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1236-1251.
- [17] Tuttle, S.G., Webb, B.W., and McQuay, M.Q., 2005, "Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part II: Time-resolved results", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1252-1261
- [18] Kuntikana, P., Prabhu, S.V., 2016, "Heat transfer characteristics of premixed methane-air flame jet impinging obliquely onto a flat surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, pp. 133-146.
- [19] Kadama, A.R., Paridaa, R.k, Hindasagerib, V., Kumara, G.N., 2019, "Heat transfer distribution of premixed methane-air laminar flame jets impinging on ribbed surfaces", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 163, pp. 114352.
- [20] Kuntikana, P., Prabhu, S.V., 2019, "Impinging premixed methane-air flame jet of tube burner: thermal performance analysis for varied equivalence ratios", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp.1301-1315.
- [21] Guillaume, D.W., LaRue, J.C., 1995, "Combustion enhancement using induced swirl" *Experiments in Fluids*, Vol. 20, pp.59-60.
- [22] Huang, X.Q., Leung, C.W., Chan C.K., Probert, S.D., 2006, "Thermal characteristics of a premixed impinging circular laminar-flame jet with induced swirl", *Applied Energy*, Vol. 83, pp.401-411.

- [23] Luo D.D., Zhen, H.S., Leung, C.W., Cheung, C.S., “Premixed flame impingement heat transfer with induced swirl”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp.4333-4336
- [24] Zhao, Z., Yuen, D.W., Leung, C.W., Wong, T.T., 2009, “Thermal performance of a premixed impinging circular flame jet array with induced-swirl”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp.159–166.
- [25] Singh, G., Chander, S., Ray, A.B., 2012, “Heat transfer characteristics of natural gas/air swirling flame impinging on a flat surface”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp.165-176.
- [26] Singh, P., Chander, S., 2018, “Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 90, pp.90-108.
- [27] Mahesh, S., Mishra, D.P., 2015, “Characterization of swirling CNG inverse jet flame in recessed coaxial burner”, *Fuel*, Vol. 161, pp.182-192.
- [28] Hindasageri, V., Vedula, R.P., Prabhu, S.V., 2015, “Heat transfer distribution of swirling flame jet impinging on a flat plate using twisted tapes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, pp.1128-1139.
- [29] Jacop Korenberg, 1989, Swirl Combustion Apparatus, United States Patent No. 4879959
- [30] Jorge Richard Angulo, 2017, Inner Swirling Flame Gas Burner, United States Patent No. 9541294B2
- [31] Vinsent M.S. Huang, 1989, Swirl Combustion Burner, United States Patent No. 4884555
- [32] Krishnan,S., Benjamin, M., Wendong, W.J.U., Nehorai, A., 2015, “An Approach to Thermocouple Measurements that Reduces Uncertainties in High Temperature Environments”, *Energy & Fuels*, Vol. 29, pp.3446-3455.
- [33] Siretta Limited., VateLL Corporation, TG-1000 Heat flux sensor. On-line. Available from internet, <https://sensors.siretta.com/heat-flux-sensors/vatell-tg1000-heat-flux-sensor/>, accessed 19 July 2020.

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สำหรับการศึกษา
เปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน

Uncertainty of Reynold number by using premixed flame

$$\frac{\delta y}{y} = \left[\left(\frac{\delta y}{\partial x_1} x_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_2} x_2 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_3} x_3 \right)^2 + \dots \left(\frac{\delta y}{\partial x_n} x_n \right)^2 \right]$$

Table 1. Uncertainty of measured parameter.

No.	Parameter	Symbol	Instrument	Uncertainty
1	Dimensions mixture inlet Square dimensions	D	Vernier scale	± 0.001 mm
2	Mixture flow rate	\dot{Q}	Rotameter	± 0.02 m ³ /s

Table 2. Range of uncertainty in the computed parameter for the experiment data.

Sr.No.	Parameter	Symbol	Values	Rang of uncertainty (%)
3	Velocity of gas mixture	V_m	9.88-29.5	5.043-2.985
4	Reynold number	Re	2,000-6,000	6.071-4.514

To find the Reynold number (Re)

- Density of mixture

$$\rho_m = \sum y_i \rho_i$$

$$\frac{\delta \rho_m}{\rho_m} = \left[\left(\frac{\delta y_{air}}{y_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{air}}{\rho_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta y_{C_3H_8}}{y_{C_3H_8}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{C_3H_8}}{\rho_{C_3H_8}} \right)^2 + \left(\frac{\delta y_{C_4H_{10}}}{y_{C_4H_{10}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{C_4H_{10}}}{\rho_{C_4H_{10}}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \rho_m}{\rho_m} = \left[\left(\frac{0.001}{0.935} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.164} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0455} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.776} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0195} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{2.416} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.00578 = 0.578\% \quad \text{----- Ans.}$$

- Viscosity of mixture

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_i x_i \sqrt{M_i}}{\sum x_i \sqrt{M_i}}$$

$$\frac{\delta \mu_m}{\mu_m} = \left[\left(\frac{\delta \mu_{air}}{\mu_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta x_{air}}{x_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta M_{air}}{M_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_{C_3H_8}}{\mu_{C_3H_8}} \right)^2 + \left(\frac{\delta x_{C_3H_8}}{x_{C_3H_8}} \right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_3H_8}}{M_{C_3H_8}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_{C_4H_{10}}}{\mu_{C_4H_{10}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta x_{C_4H_{10}}}{x_{C_4H_{10}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_4H_{10}}}{M_{C_4H_{10}}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \mu_m}{\mu_m} = \left[\left(\frac{0.01}{18.75} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{0.935} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{28.97} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{8.29} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0455} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{44.1} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{7.53} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0195} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{58.1} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.0267 = 2.67\% \quad \text{-----Ans.}$$

- Velocity of mixture

$$V_m = \frac{\dot{Q}_{Lpg} + \dot{Q}_{air}}{A}$$

$$\frac{\delta V_m}{V_m} = \left[\left(\frac{\delta \dot{Q}_{air}}{\dot{Q}_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{Q}_{LPG}}{\dot{Q}_{LPG}} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{\rho A} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta V_m}{V_m} = \left[\left(\frac{0.02}{9.4} \right)^2 + \left(\frac{0.02}{0.48} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{5} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.0504 = 5.04\% \quad \text{-----Ans.}$$

- Reynolds Number

$$Re = \frac{\rho_m V_m D}{\mu_m}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta \rho_m}{\rho_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_m}{\mu_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta V_m}{V_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[(0.00578)^2 + (0.0267)^2 + (0.0504)^2 + \left(\frac{0.001}{5} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.0607 = 6.07\% \quad \text{-----Ans.}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของค่าน้ำซึลต์นัมเบอร์โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล
ชนิด B เป็นตัววัดอุณหภูมิเปลวไฟหมุนควง

Uncertainty of Nusselt number by using Thermocouple Type-B

$$\frac{\delta y}{y} = \left[\left(\frac{\delta y}{\partial x_1} x_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_2} x_2 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_3} x_3 \right)^2 + \dots \left(\frac{\delta y}{\partial x_n} x_n \right)^2 \right]$$

Table 1. Uncertainty of measured parameter.

No.	Parameter	Symbol	Instrument	Uncertainty
1	Dimensions of Thermocouple Type-B			
	Diameter	D	Linear scale	± 0.01 mm
	Length	L	Linear scale	± 1 mm
2	Temperature measurement	-	PT-100 thermocouple	± 0.05 °C
3	Velocity	V	Hot-Wire	± 0.01 m/s

Table 2. Range of uncertainty in the computed parameter for the experiment data.

Sr.No.	Parameter	Symbol	Values	Rang of uncertainty (%)
1	Reynold number	Re	0.34-1.98	4.788-4.032
2	Nusselt number	Nu	3.18-6.87	4.822-4.072
3	Heat transfer coefficient	h	74.89-161.94	5.092-4.322
4	Temperature of gas	T	1843.61-1086.81	10.52-9.06

To find the Reynold number (Re)

- Reynold number (Re)

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{0.01}{2} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.25} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.786} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.04032 = 4.032\% \text{-----Ans.}$$

To find the Nusselt number (Nu)

- Prandtl number (Pr)

$$Pr = \frac{C_p \mu_g}{k_g}$$

$$\frac{\delta Pr}{Pr} = \left[\left(\frac{\delta C_p}{C_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_g}{\mu_g} \right)^2 + \left(\frac{\delta k_g}{k_g} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Pr}{Pr} = \left[\left(\frac{1}{1704.7} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.786} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0177} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.00572 = 0.572\%$$

- Nusselt number (Nu)

$$Nu = 0.683 Re^{0.46} Pr^{0.33}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[\left(\frac{\delta Re}{Re} \right)^2 + \left(\frac{\delta Pr}{Pr} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta Nu}{Nu} &= \left[(0.040315)^2 + (0.005724)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.04072 = 4.072\% \text{ ----- Ans.} \end{aligned}$$

To find the Heat transfer coefficient (h)

- Heat transfer coefficient (h)

$$h = \frac{Nu k}{D}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{\delta Nu}{Nu} \right)^2 + \left(\frac{\delta k_g}{k_g} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta h}{h} &= \left[(0.04072)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.0177} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.75} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.04322 = 4.322\% \text{ ----- Ans} \end{aligned}$$

To find the Temperature of gas (T)

- Heat loss from radiation (\dot{q}_{rad})

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \epsilon_b (T_b^4 - T_w^4)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_b}{T_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_a}{T_a} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta h}{h} &= \left[\left(\frac{0.01}{5.67} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.257} \right)^2 + \left(\frac{100}{1843.61} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{30} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.054312 = 5.432\% \end{aligned}$$

- Cross-section area of wire (A)

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta \pi}{\pi} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta A}{A} &= \left[\left(\frac{0.001}{3.141} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.75} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.01334 = 1.334\% \end{aligned}$$

- Surface area of bead (A_s)

$$A_s = \pi L D$$

$$\frac{\delta A_s}{A_s} = \left[\left(\frac{\delta \pi}{\pi} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta A_s}{A_s} &= \left[\left(\frac{0.001}{3.141} \right)^2 + \left(\frac{1}{915} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.75} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.01338 = 1.338\% \end{aligned}$$

- Heat loss from conduction (\dot{q}_{cond})

$$\dot{q}_{cond} = \frac{kA}{LA_s} (T_b - T_a)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{cond}}{\dot{q}_{cond}} = \left[\left(\frac{\delta k}{k} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_s}{A_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_b}{T_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_a}{T_a} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta \dot{q}_{cond}}{\dot{q}_{cond}} &= \left[\left(\frac{0.01}{78.16} \right)^2 + (0.01334)^2 + \left(\frac{1}{915} \right)^2 + (0.01338)^2 + \left(\frac{100}{1843.61} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{30} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.05749 = 5.749\% \end{aligned}$$

- Temperature of gas (T)

$$T = T_b + \frac{\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{rad}}{h}$$

$$\frac{\delta T}{T} = \left[\left(\frac{\delta T_b}{T_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{cond}}{\dot{q}_{cond}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{rad}}{\dot{q}_{rad}} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta T}{T} = \left[\left(\frac{100}{1843.61} \right)^2 + (0.05749)^2 + (0.05432)^2 + (0.04322)^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.10524 = 10.524\% \text{ -----Ans.}$$

ภาคผนวก ค
บทความสำหรับเผยแพร่ 1

การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ แบบผสมก่อนจากหัวฉีดแบบท่อ STUDY OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTIC OF PREMIXED FLAME JET FROM PIPE NOZZLE

ณัฐมาศ อุปถัมภ์
วงศธร บุญโยภาส
ชยุต นันทดุสิต

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา
90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟอิสระและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบหัวฉีดที่ไหลปะทะผนังเรียบ ในการทดลองสร้างเปลวไฟโดยใช้วิธีฉีดเชื้อเพลิง LPG ผสมอากาศในแนวสัมผัสภายในห้องทรงกระบอก โดยกำหนดให้แก๊ส LPG มีอัตราการไหลอยู่ที่ 0.3 ลิตรต่อนาที ที่อัตราส่วนสมมูล 0.8, 1.0 และ 1.2 และระยะพุ่งชนที่ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ สำหรับการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟใช้วิธีถ่ายภาพในกรณีของเจ็ทอิสระและเจ็ทไหลปะทะ และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟไหลปะทะโดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าที่ระยะ $L = 10D$ ที่อัตราส่วนสมมูลที่ 1.2 ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงที่สุด ที่ 28 kW/m^2

คำสำคัญ : เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน, หัวฉีดแบบ nozzle, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This research was to study the structure of free flame jet and heat transfer characteristics of flame impinging jet on flat plate. In the experiment, flame was formed by injecting a mixture of LPG and air through the pipe nozzle. The flow rate of LPG gas was fixed at 0.3 liters per minute at equivalence ratio 0.8, 1.0 and 1.2. The jet-to-plate distance was varied at $L= 2D, 4D, 6D, 8D$ and $10D$. The flame jet structure was visualized and recorded with digital camera and the heat transfer rate of impinging flame jet was measured with heat flux sensor mounted on the impingement surface. The results of the study jet-to-plate distance at $L = 10D$ at equivalence ration 1.2 gave the highest heat flux at 28 kW/m^2 .

Keywords: Flame jet, nozzle flame jet, Heat transfer

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโดยวิธีใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนบนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการให้ความร้อนแก่พื้นผิวที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่นการผลิตโลหะ แก้ว และกระดาษ รวมถึงกระบวนการตัด เชื่อม หลอมเหลวโลหะ เป็นต้น เนื่องจากการใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงโดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟพุ่งชนโดยตรง โดยวิธีดังกล่าวสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้อย่างเร็ว ส่งผลทำให้สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการให้ความร้อนและช่วยประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีเดิมที่ใช้กลไกการแผ่รังสีความร้อน

สำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเปลวไฟ เช่น เปลวเพลิงประเภทผสมก่อน (Premixed flame) หรือ เปลวเพลิงผสม

ภายหลัง (Diffusion flame) ระยะห่างระหว่างหัวเผาและพื้นผิวให้ความร้อน ชนิดของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีผลต่อลักษณะและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนบนพื้นผิวเรียบเป็นจำนวนมาก มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเปลวไฟ [1-3] การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟบนพื้นผิวทั้งแบบเฉาะจุดและแบบเฉื่อย [4-7] และการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเปลวไฟ [8 และ 9]

ปัจจุบัน ต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ เพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานและลดต้นทุนในอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานความร้อนสูง อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเจ็ทเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อยหรือหัวฉีดแบบเจาะรูแบบออริฟิส ซึ่งสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงในบริเวณที่เจ็ทไหลปะทะโดยตรงเท่านั้น อีกทั้งเปลวไฟมีความเสถียรที่ต่ำในบางช่วงของอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน โดยพิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ในช่วง $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ทมีค่าเท่ากับ 5 mm . ในการทดลองได้ใช้ระบบหัวเผาแบบท่อ (Pipe) มีลักษณะเป็นทอกลมยาว โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊ส LPG คงที่ที่ 0.3 LPM และนอกจากนี้ได้ใช้กล้องดิจิทัลทำการบันทึกภาพโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟอิสระและเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว

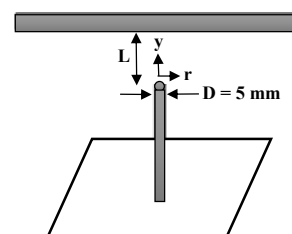
2. โมเดลและชุดทดลอง

2.1 โมเดลของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลหัวฉีดแบบท่อ (Pipe) ที่ใช้ในการสร้างเปลวไฟโดยลักษณะหัวฉีดจะเป็นทอมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D = 5\text{ mm}$ และยาว $S = 10\text{ cm}$ ท่อทางเข้าของแก๊ส LPG ผสมกับอากาศ จะเชื่อมต่อกับห้องพักทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 1 โดยด้านท้ายของท่อทรงกระบอกปิด และติดท่อ 2 ท่อ บริเวณด้านข้างของท่อทรงกระบอก ซึ่งท่อทรงกระบอกนี้จะทำหน้าที่ผสมแก๊ส LPG กับอากาศให้ลงตัวก่อนจะไหลไปยังหัวฉีดแบบท่อ (Pipe)

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ความสูงของแผ่นพุ่งชนและค่าอัตราส่วนสมมูลที่ $0.8, 1.0$ และ 1.2 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความสูงของแผ่นพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ซึ่งความสูงของแผ่นพุ่งชนมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟที่ไหลปะทะ

ในการทดลองจะใช้เปลวไฟแบบผสมมาก่อน โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 0.3 ลิตรต่อนาที และใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ที่เงื่อนไขอัตราการไหล $5.8, 4.7$ และ 3.9 ลิตรต่อนาที โดยค่าความดันของแก๊ส LPG จะอยู่ที่ 1 mbar และค่าความดันของอากาศจะอยู่ที่ 2 mbar

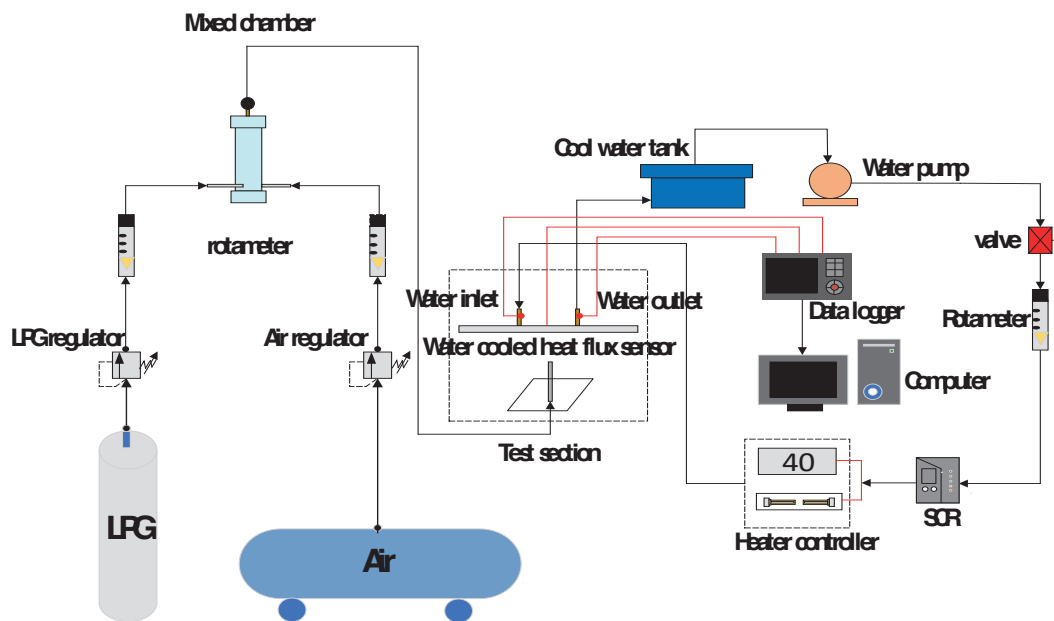


รูปที่ 1 โมเดลหัวฉีดแบบท่อ (Pipe) ที่ใช้ในการสร้างเปลวไฟ

2.2 ชุดทดลอง

ในรูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่ไหลปะทะพื้นผิวเรียบ อากาศจากบีมลมจะไหลผ่านชุดดักความชื้นและวาล์วปรับความดัน ก่อนที่จะไหลเข้าสู่โรตารีเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่แก๊ส LPG จากถังแก๊สขนาด 20 กิโลกรัม ไหลผ่านชุดป้องกันไฟไหม้ย้อน ชุดดักจับความชื้น วาล์วปรับความดัน และโรตารีเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบสำหรับวัดอัตราการไหลแก๊ส LPG ทั้งอากาศและแก๊ส LPG จะไหลเข้าสู่ถังผสม ซึ่งผ่านในถังผสมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทางเข้าที่แก๊ส LPG กับอากาศฉีดเข้าห้องผสมในแนวสัมผัส ส่วนไหลผ่านชั้นของลูกแก้วเพื่อให้แก๊ส LPG และอากาศผสมกันเป็นเนื้อเดียวและส่วนที่สามเป็นช่องว่างเพื่อให้แก๊ส LPG กับอากาศที่ผสมกันดีแล้วจ่ายออกนอกถังผสม และต่อท่อสายยางไปยังหัวฉีดสำหรับสร้างเจ็ทเปลวไฟ

สำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ จะใช้ผนังที่ทำจากแผ่นสแตนเลส โดยตรงกลางของผนังติดตั้งหัววัด Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducer ซึ่งต่อเข้ากับ Data logger เพื่อวัดฟลักซ์ความร้อน โดยหัววัดฟลักซ์ความร้อนนี้จะมีน้ำไหลเข้าออกเพื่อระบายความร้อน



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อน

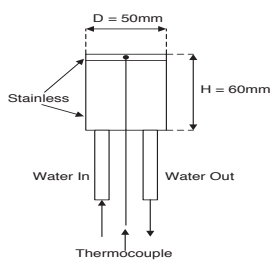
3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟ

ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟได้ใช้กล้องดิจิทัลทำการบันทึกภาพในกรณีที่เป็นเจ็ทเปลวไฟอิสระและเจ็ทเปลวไฟไหลปะทะพื้นผิวฟุ้งชน ในการทดลองได้ทำการบันทึกภาพสเกลเพื่อที่จะนำมาเทียบกับกรณีที่เป็นภาพเจ็ทเปลวไฟ โดยทำการติดตั้งกล้องดิจิทัลที่ตำแหน่งเดิมของทุกตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นที่เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชน โดยทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้อุปกรณ์ Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducer ในการบันทึกข้อมูลอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้ Data logger แล้วทำการบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 3 อุปกรณ์ Heat Flux Sensor

สำหรับการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหาได้จากสมการ

$$\dot{q} = mc_p \Delta T \quad (1)$$

โดยที่ c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ

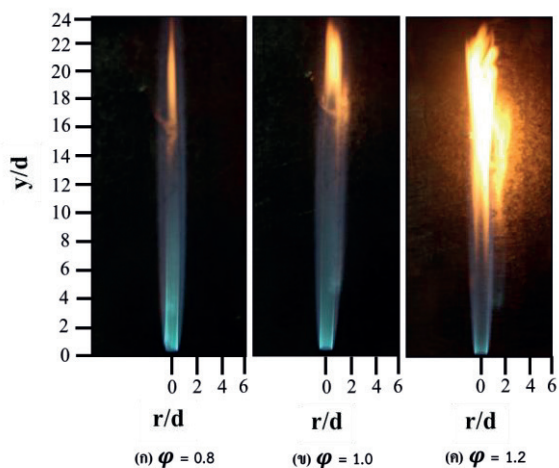
\dot{m} คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก

4. ผลการทดลอง

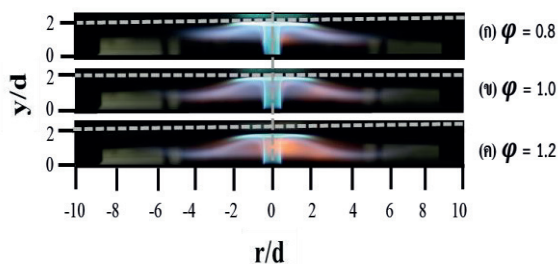
4.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟ

รูปที่ 4 แสดงผลของผลของลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟที่รูป (ก) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และรูป (ค) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 จากรูปพบว่าที่เงื่อนไขที่ค่าอัตราส่วนสมมูล 0.8 มีเปลวไฟส่วนสีน้ำเงินบางส่วนใกล้กับทางออกหัวฉีด และส่วนที่เหลือเป็นเปลวไฟสีส้มโดยเปลวไฟจะมีความยาวอยู่ที่ค่า $y/d = 24$ โดยจะเริ่มเกิดการแยกตัวบริเวณที่ค่า $y/d = 12$ ในขณะที่เงื่อนไขที่ค่าอัตราส่วนสมมูล 1.0 ใกล้กับทางออกหัวฉีดมีเปลวไฟสีน้ำเงิน ส่วนที่เหลือเป็นเปลวไฟสีส้มโดยค่าความยาวของเปลวไฟจะอยู่ที่ค่า $y/d = 23$ และจะเริ่มแยกตัวที่ค่า $y/d = 10$ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นที่ค่าอัตราส่วนสมมูล 1.2 พบว่าเปลวไฟส่วนใหญ่มีสีส้ม และเปลวไฟที่มีสีน้ำเงินจะมีขนาดเล็ก ซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยที่ความยาวของเปลวไฟจะอยู่ที่ค่า $y/d = 22$ และจะเริ่มเกิดการแยกตัวที่ค่า $y/d = 6$



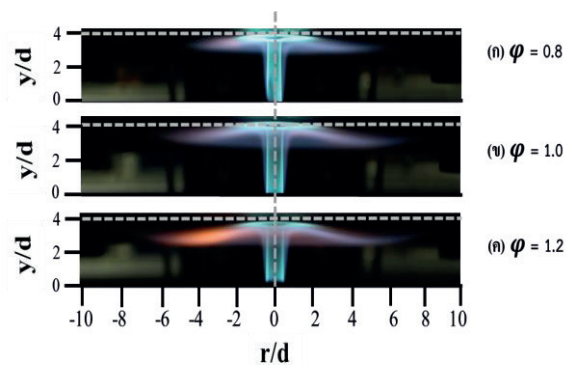
รูปที่ 4 ผลของลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟที่รูป (ก) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และรูป (ค) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

รูปที่ 5 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะพุ่งชน $y/d = 2$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 พบว่าที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 2$ พบว่าลักษณะลำของเปลวไฟจะสั้นและสีของเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วนสมมูล ทั้ง 3 ค่าจะมีสีน้ำเงินคล้ายกัน



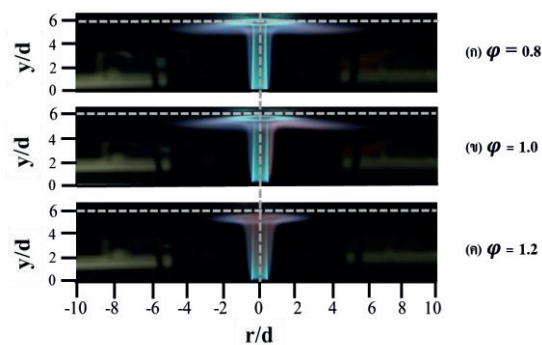
รูปที่ 5 ผลของลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟที่ระยะพุ่งชน $y/d = 2$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

รูปที่ 6 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะพุ่งชน $y/d = 4$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 พบว่าที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 4$ พบว่าลักษณะลำของเปลวไฟยาวขึ้นและสีของเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8 และ 1.0 จะมีลักษณะเปลวสีฟ้า ส่วนที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 จะมีลักษณะเปลวเป็นสีส้มเล็กน้อยบริเวณแผ่นที่พุ่งชน



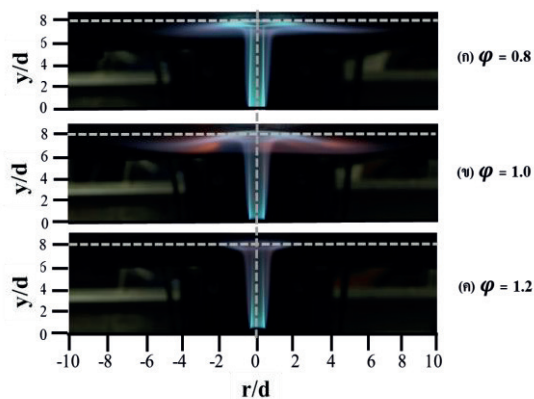
รูปที่ 6 ผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะพุ่งชน $y/d = 4$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

รูปที่ 7 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะพุ่งชน $y/d = 6$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 จะเห็นได้ว่าที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 เปลวจะมีลักษณะเป็นสีส้มเล็กน้อยบริเวณที่ปะทะกับแผ่นพุ่งชน และที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 ลักษณะสีของเปลวไฟจะเป็นสีส้มมากขึ้น



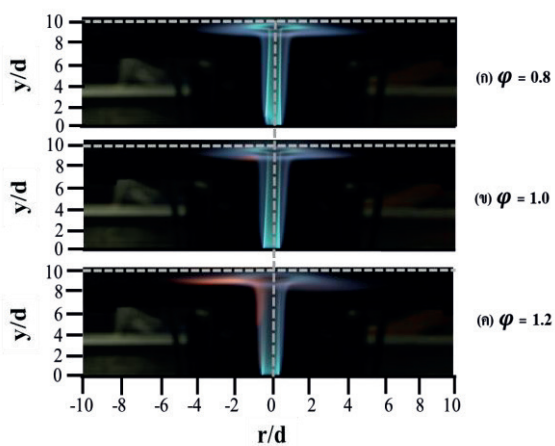
รูปที่ 7 ผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 6$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

รูปที่ 8 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 8$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 พบว่า ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 ลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟจะเป็นสีส้มมากขึ้นจากเดิม และที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 ลักษณะลำของเปลวไฟจะเป็นสีฟ้ามากขึ้น และเป็นสีฟ้าน้อยลง ซึ่งเปลวไฟบริเวณปลายที่พุ่งชนผนังของทั้ง 3 ค่าอัตราส่วนสมมูล จะขนาดความกว้างน้อยลง



รูปที่ 8 ผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 8$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

รูปที่ 9 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 10$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 พบว่าที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 ลักษณะสีของเปลวไฟจะเป็นเปลวสีส้มส่วนใหญ่ จะมีเปลวสีฟ้าเพียงเล็กน้อย และลักษณะเปลวไฟบริเวณปลายที่พุ่งชนพื้นผิวผนังพุ่งชนของทั้ง 3 ค่าอัตราส่วนสมมูลจะมีลักษณะความกว้างของเปลวไฟที่แคบลง

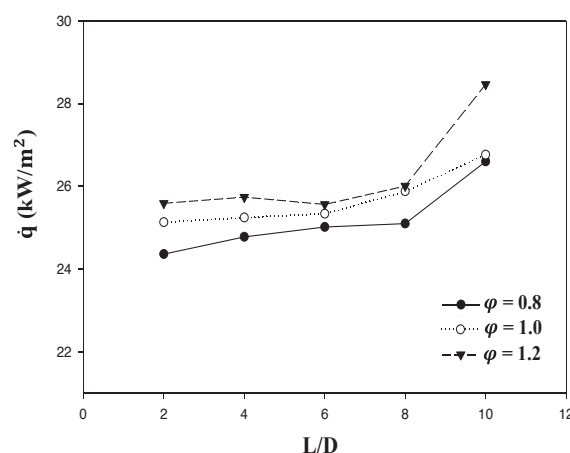


รูปที่ 9 ผลของลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ค่าอัตราส่วน $y/d = 10$ โดยที่รูป (ก) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, รูป (ข) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 และ รูป (ค) มีค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2

จากรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 9 แสดงลักษณะโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะ $y/d = 2, 4, 6, 8$ และ 10 ตามลำดับ โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนสมมูลให้อยู่ที่ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยจะเห็นว่าที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8 เปลวไฟจะเป็นสีฟ้าทั้งหมดที่ค่าอัตราส่วน y/d ทุกระยะ เนื่องจากเป็นเปลวไฟที่อยู่ในสภาวะส่วนผสมบาง (fuel-lean mixture) ซึ่งอากาศที่ใช้จะมากกว่าการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และเมื่อทำการลดอัตราการไหลของอากาศให้อยู่ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล =

1.0 จะเห็นว่าที่ทุกระยะ y/d เปลวไฟจะมีเปลวสีส้มเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่ค่าอัตราส่วนสมมูลนี้เป็นค่าอัตราส่วนที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศขึ้นจนถึงที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 จะเห็นว่าเปลวไฟจะมีลักษณะเป็นเปลวสีส้มบริเวณปลายมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เปลวไฟอยู่ในสภาวะส่วนผสมหนา (fuel-rich mixture) ซึ่งอากาศที่ใช้จะน้อยกว่าการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเห็นว่าอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อลักษณะและค่าอัตราส่วนสมมูลของเปลวไฟ

4.2 การวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว



รูปที่ 10 ผลของความสูงของระยะพุ่งชนที่มีผลต่อค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวที่เงื่อนไขที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, 1.0 และ 1.2

รูปที่ 10 แสดงผลของความสูงของระยะพุ่งชนที่มีผลต่อค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวที่เงื่อนไขที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8, 1.0 และ 1.2 จากรูปพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน L/D เพิ่มขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนถึงที่ค่าอัตราส่วน $L/D = 4$ หลังจากนั้นค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงจนถึงที่ค่าอัตราส่วน $L/D = 6$ หลังจากนั้นค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8 และ 1.0 ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ที่ค่าอัตราส่วน $L/D = 2$ จนถึงค่าอัตราส่วน $L/D = 10$ และที่เงื่อนไขที่ค่าอัตราส่วน $L/D = 10$ ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 จะมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากบริเวณปลายของเปลวไฟจะมีอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นจะทำให้บริเวณที่อุณหภูมิสูงของเปลวไฟกระทบกับพื้นผิวที่รับความร้อนโดยตรงจึงส่งผลให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น

5.สรุปผล

จากการทดลองสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

(1) ค่าอัตราส่วนสมมูลมีผลต่อลักษณะสีของเปลวไฟ โดยที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 0.8 เปลวไฟจะมีลักษณะเป็นเปลวสีฟ้าส่วนใหญ่ และมีเปลวสีส้มเพียงเล็กน้อยบริเวณปลาย ที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.0 เปลวไฟจะมีลักษณะเป็นสีฟ้า และมีเปลวไฟสีส้มเกิดมากขึ้นที่บริเวณปลายของเปลวไฟ และที่ค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 เปลวไฟส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสีส้ม และมีเปลวสีฟ้าเพียงเล็กน้อยที่บริเวณทางออกของหัวเจ็ท

(2) ความสูงของระยะแผ่นฟุ้งจะส่งผลต่อการแสดงลักษณะสีและการกระจายตัวของเปลวไฟที่ฟุ้งชน โดยที่ค่าระยะฟุ้งชนต่ำ ลักษณะสีของเปลวไฟจะมีลักษณะคล้ายกันและการกระจายตัวของเปลวไฟออกด้านข้างจะกว้าง แต่เมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มสูงขึ้นลักษณะสีของเปลวไฟจะเริ่มต่างกัน และการกระจายตัวของเปลวไฟที่ออกด้านข้างจะแคบลง

(3) ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน L/D เพิ่มขึ้น และค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงที่สุดที่เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสมมูล = 1.2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่น่าจะนำไป ออกแบบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ใช้เจ็ทเปลวไฟ ฟุ้งชนของแต่ละกรณี

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1997). Heat transfer characteristics of a radial jet reattachment flame, *J. Heat transfer*, Vol. 119, pp. 258-264.
- [2] Zhang, Y. and Bray, K. N. C., (1999). Characterization of impinging jet flame, *J. Combustion and flame*, Vol. 116, pp. 671-674.
- [3] Foat, T., Yap, K. P. and Zhang, Y., (2001). The visualization and mapping of turbulent premixed impinging flame, *J. Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 839-851.
- [4] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1997). Surface condition effects on flame impingement heat transfer, *J. Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 15, pp. 323-335.
- [5] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1998). Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 16, pp. 247-259.
- [6] Mishra, D. P., (2002). Experimental Studies of LPG-air Premixed Flame Impingement Heat Transfer, *Proceedings of International Symposium on Recent Trends in Heat and Mass Transfer*, pp. 45-66.
- [7] Tuttle, S. G., Webb, B. W., and McQuay, M. Q., (2005). Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part I: Time-averaged results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1236-1251.
- [8] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1996). Combustion measurement from an impinging radial reattachment flame, *J. Combust. Flame*, Vol. 106, pp. 69-80.
- [9] Mishra, D. P., (2004). Emission Studies of Impinging Premixed Flames, *J. Fuel*, Vol. 83, pp. 1743-1748.

ภาคผนวก ง
บทความสำหรับเผยแพร่ 2

การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ แบบผสมก่อนจากหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควง

Study of Heat Transfer Characteristic Premixed Flame Jet From Swirl Chamber

ณัฐมาศ อุปถัมภ์^{1*}, วงศธร บุญโญภาส¹ และ ชยุต นันทดุสิต¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

*ติดต่อ: E-mail: chayut.n@psu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 074-28-7035, เบอร์โทรสาร 074-55-8830

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟไอสระและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนผนังเรียบจากหัวฉีดแบบท่อและหัวฉีดที่เป็นห้องทรงกระบอกสร้างการไหลหมุนควงขนาด 20 mm และความสูงของห้อง 32 mm ในการทดลองใช้เปลวไฟแบบผสมก่อนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยกำหนดให้แก๊ส LPG มีอัตราการไหลคงที่ 0.3 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล 0.8, 1.0 และ 1.2 สำหรับการศึกษาโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟใช้วิธีถ่ายภาพในกรณีของเจ็ทไอสระและเจ็ทไหลปะทะ และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟไหลปะทะโดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าที่ทุกอัตราส่วนสมมูลของหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ระยะพุ่งชน $L=2D$, $4D$ และ $6D$ พบว่าให้ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดแบบท่อถึง 20% เมื่อระยะพุ่งชนมีความสูงขึ้นค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จะต่ำกว่าหัวฉีดแบบท่อ 50%

คำหลัก: เปลวไฟหมุนควง, หัวฉีดแบบ nozzle, เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน, โครงสร้างเปลวไฟ, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This research was to study the structure of swirling flame and pipe nozzle flame for ability heat transfer characteristics of flame impinging jet on flat plate. Diameter of swirl chamber 20 mm and high of swirl chamber 37 mm are used to obtain swirling flame jet. In the experiment, premixed LPG-Air in mixed chamber before to flame jet. The flow rate of LPG gas was fixed at 0.3 liters per minute and equivalent ratio varied 0.8, 1.0 and 1.2. The flame jet structure was visualized and recorded with digital camera and the heat transfer rate of impinging flame jet was measured with heat flux sensor mounted on the impingement surface. the result of study all equivalent ratio from swirling flame jet at distance $L=2D$, $4D$ and $6D$ gave highest heat flux more than pipe nozzle flame jet up to 20%. When distance increased, Heat flux lower than 50%

Keywords: Swirling flame jet, Nozzle flame jet, Flame structure, Impinging flame jet, Heat transfer

1. บทนำ

กระบวนการให้ความร้อนสามารถพบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตโลหะ แก้ว และกระดาษ รวมถึงกระบวนการตัด เชื่อม หลอมเหลวโลหะ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการที่ให้ความร้อนที่สูง จะใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนโดยวิธีใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนบนพื้นผิวโดยตรง เนื่องจากการใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงโดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟพุ่งชนโดยตรง โดยวิธีดังกล่าวสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้อย่างเร็ว ส่งผลทำให้สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการให้ความร้อนและช่วยประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีเดิมที่ใช้กลไกการแผ่รังสีความร้อน

สำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเปลวไฟ เช่น เปลวเพลิงประเภทผสมก่อน (Premixed flame) หรือ เปลวเพลิงผสมภายหลัง (Diffusion flame) ระยะห่างระหว่างหัวเผาและพื้นผิวให้ความร้อน ชนิดของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีผลต่อลักษณะและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนบนพื้นผิวเรียบเป็นจำนวนมาก มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเปลวไฟ [1-3] การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟบนพื้นผิวทั้งแบบเฉพาะจุดและแบบเฉลี่ย [4-7] และการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเปลวไฟ [8 และ 9]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่ใช้เปลวไฟมีอยู่เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารที่เริ่มใช้เปลวไฟเป็นหลัก ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดปัญหาการขาดทุนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยมีแนวความคิดนำเทคโนโลยีของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมาใช้

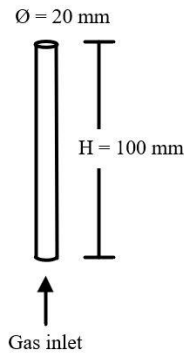
โดยการปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยการใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควง เนื่องจากการหมุนควงของเจ็ทได้เพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆ ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวที่เร็วและมีระดับความแปรปรวนในเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดาและอาจจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณรอบๆ เจ็ทเพิ่มสูงขึ้นหรือในกรณีของการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว กลุ่มเจ็ทหมุนควงอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงก่อนพุ่งชนพื้นผิวและการไหลแบบหมุนควงบน พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง รวมถึงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงก่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาค้นคว้าผลของความสูงห้องทรงกระบอกสร้างเปลวไฟหมุนควงที่มีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟอิสระและเจ็ทเปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชน รวมถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่เสื่อนไชระยะจากปากทางออกของหัวฉีดถึงพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะ

2. โมเดลและชุดทดลอง

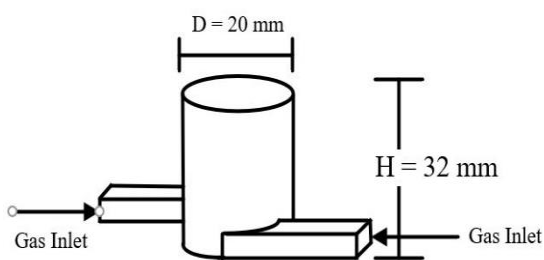
2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

โมเดลที่ใช้ศึกษาเปลวไฟอิสระ เปลวไฟขณะปะทะแผ่นพุ่งชน รวมไปถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนมีสองแบบคือ 1. หัวฉีดแบบท่อ 2. หัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควง โดยรูปที่ 1 แสดงโมเดลหัวฉีดแบบท่อที่ใช้ในการสร้างเปลวไฟ ลักษณะหัวฉีดจะเป็นท่อเหล็กทรงกระบอกกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=8$ mm และยาว $H=100$ mm ซึ่งส่วนผสมระหว่างแก๊ส LPG และอากาศที่ได้จากห้องถังผสมจะเข้าสู่หัวฉีดแบบท่อโดยตรง



รูปที่ 1 โมเดลหัวฉีดแบบ nozzle
ใช้ในการสร้างเปลวไฟ

รูปที่ 2 โมเดลหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควง โดยห้องสร้างการไหลหมุนควงเป็นห้องทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 20$ mm ที่ระยะความสูงของห้องเท่ากับ $H = 32$ mm ท่อทางเข้าของแก๊ส LPG ผสมกับอากาศจำนวน 2 ท่อขนาด 5×5 mm ที่ได้จากการผสมก่อนหน้านี้จากถังผสม ต่อเข้ากับห้องทรงกระบอกในแนวสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 1 โดยด้านท้ายของท่อเป็นทรงกระบอกปิด และปล่อยให้เปลวไฟหมุนควงที่เกิดจากของไหล ไหลชนกันในแนวสัมผัสเพื่อออกอีกด้านหนึ่งของปากท่อทรงกระบอก



รูปที่ 2 โมเดลหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควง

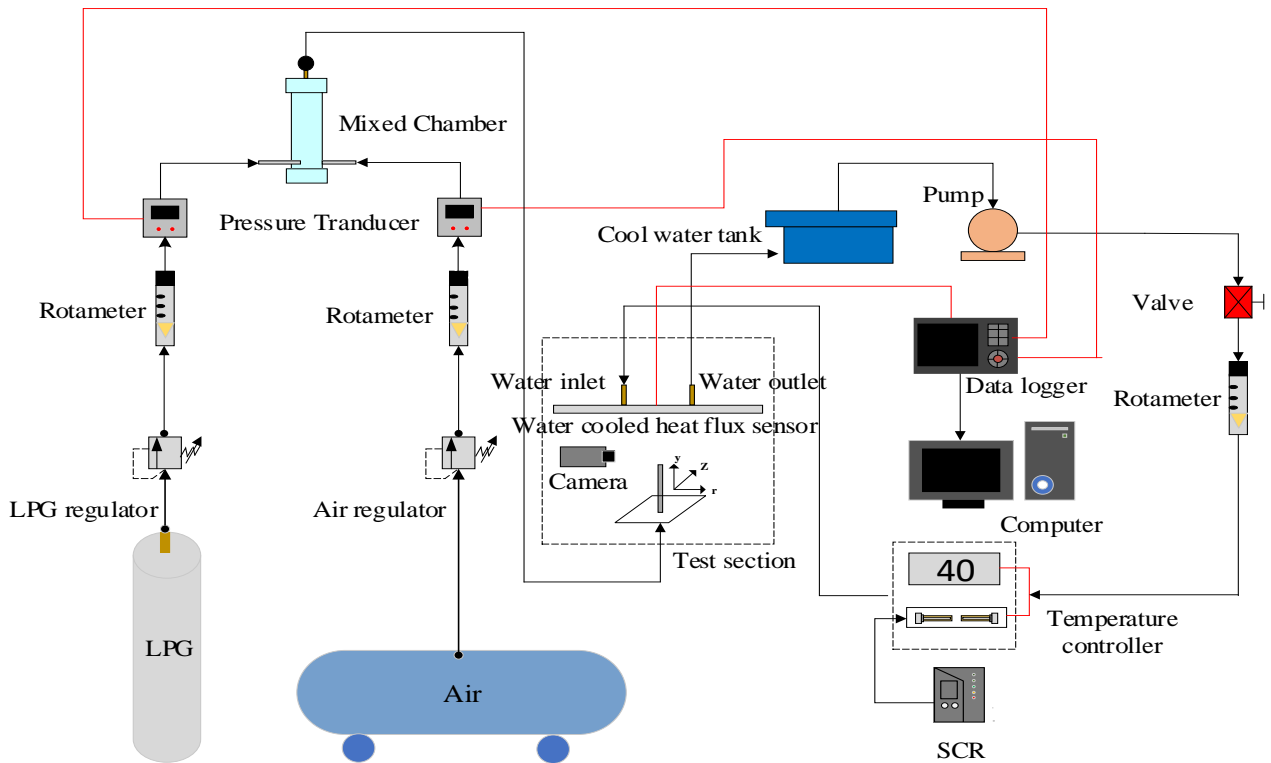
ในการทดลองใช้เปลวไฟแบบผสมมาก่อน โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 0.3 ลิตรต่อนาที ที่อัตราส่วนสมมูล 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ ในการทดลองค่าความดันของแก๊ส LPG อยู่ที่ 1 mbar และค่าความดันอากาศอยู่

ที่ 2 mbar วัดโดย PT-100 ค่าความถูกต้อง ± 0.1 องศาเซลเซียส

2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่ไหลปะทะพื้นผิวเรียบ อากาศจากปั๊มลมจะไหลผ่านชุดดักความชื้นและวาล์วปรับความดัน ก่อนที่จะไหลเข้าสู่โรตารีเมเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่แก๊ส LPG ไหลผ่านชุดป้องกันไฟไหลย้อน ชุดดักจับความชื้น วาล์วปรับความดัน และโรตารีเมเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบสำหรับวัดอัตราการไหลแก๊ส LPG ทั้งอากาศและแก๊ส LPG ผ่านเข้าสู่ Pressure Transducer ซึ่งอ่านค่าความดันโดย Data Logger ก่อนไหลเข้าสู่ถังผสม (Mixed Chamber) ซึ่งในถังผสมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทางเข้าที่แก๊ส LPG กับอากาศฉีดเข้าห้องผสมในแนวสัมผัส ส่วนไหลผ่านชั้นของลูกแก้วเพื่อให้แก๊ส LPG และอากาศผสมกันเป็นเนื้อเดียวและส่วนที่สามเป็นช่องว่างเพื่อส่งแก๊ส LPG กับอากาศที่ผสมกันแล้วจ่ายออกนอกถังผสม และต่อท่อสายยางไปยังหัวฉีดสำหรับสร้างเจ็ทเปลวไฟ

สำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ จะใช้ผนังที่ทำจากแผ่นสแตนเลส โดยตรงกลางของผนังติดตั้งหัววัด Thermo gage Circular Foil Heat Flux Transducer ซึ่งต่อเข้ากับ Data logger เพื่อวัดค่าพลักซ์ความร้อนในหน่วยของ mV ซึ่งในระบบมีการไหลเวียนของน้ำผ่านวาล์วก่อนเข้าสู่โรตารีเมเตอร์เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าที่ 40 องศาผ่านการควบคุมด้วย Temperature Controller ที่ค่าความถูกต้อง ± 0.1 องศาเซลเซียส โดยมีฮีตเตอร์ให้ความร้อนภายในระบบและมี SCR ควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ตามลำดับ น้ำที่หมุนเวียนภายในระบบออกจากเซ็นเซอร์พลักซ์ความร้อน ผ่านถึงน้ำหมุนเวียนและเข้าสู่ระบบอีกครั้ง



รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อน

3. วิธีการทดลอง

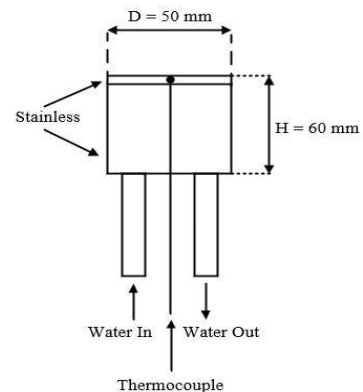
3.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟ

ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟได้ใช้กล้องดิจิทัลทำการบันทึกภาพในกรณีที่เป็นเจ็ทเปลวไฟอิสระและเจ็ทเปลวไฟไหลปะทะพื้นผิว ในการทดลองได้ทำการบันทึกภาพสเกลเพื่อที่จะนำมาเทียบกับกรณีที่เป็นภาพเจ็ทเปลวไฟ โดยทำการติดตั้งกล้องดิจิทัลที่ตำแหน่งเดิมที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ จากเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อและหัวฉีดแบบมีห้องทรงกระบอกสร้างการไหลหมุนวน

3.2 การวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน โดยทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้อุปกรณ์ในรูปที่ 4 คือ Thermo gage Circular Foil Heat Flux Transducer โดยมีควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการไหลเวียนภายในระบบ Heat Flux Sensor

ที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งควบคุมโดยระบบ SCR เปิด-ปิดการทำงานของฮีตเตอร์ในขณะที่น้ำผ่านก่อนเข้าสู่พื้นผิวของ Heat Flux Sensor บริเวณที่เปลวไฟพุ่งชน ในการบันทึกอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ Data logger ทำการบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำการบันทึกข้อมูลหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งเก็บผลเป็นระยะเวลา 3 นาที

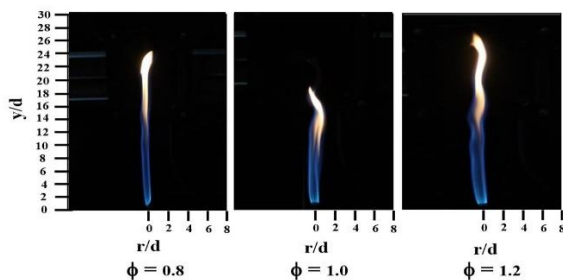


รูปที่ 4 อุปกรณ์ Heat flux sensor

4. ผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟ

โครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟที่ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ หัวฉีดแบบท่อ และหัวฉีดสร้างเปลวไฟหมุนควง ซึ่งโครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท่อในรูปที่ 5 ที่อัตราส่วนสมมูล 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนสมมูลที่ 0.8 เปลวไฟจะมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นสีน้ำเงิน โดยเริ่มแยกตัวเป็นสีส้มที่ความยาว $Y=12D$ และมีความยาวสูงสุดที่ $Y=24D$ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลไปที่ 1.0 แสดงให้เห็นถึงเปลวไฟสีน้ำเงินที่ปากทางออกได้อย่างชัดเจนที่สุดจากกรณีศึกษา และเปลวไฟจะเริ่มแยกตัวเป็นสีส้มที่ $Y=6D$ และลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีส่วนใหญ่เป็นสีน้ำเงินอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้สมบูรณ์

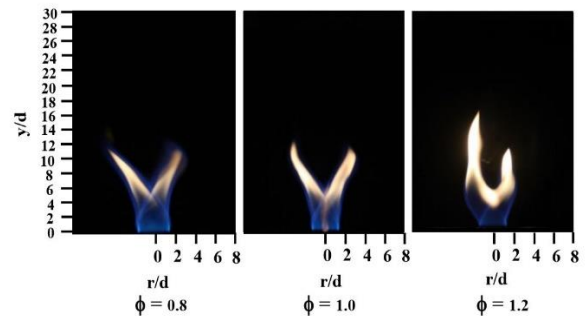


รูปที่ 5 ผลของลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบท่อ

ในส่วน of ลักษณะโครงสร้างเปลวไฟจากหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควงแสดงในรูปที่ 6 ที่เกิดการใช้เทคนิคในการสร้างเปลวไฟโดยการสร้างแกนไหลให้ส่วนผสมเข้ามาสองทาง และชนกันในแนวสัมผัส ที่ความสูงของห้อง $H=32$ mm จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนสมมูลที่ 0.8 แสดงให้เห็นลักษณะของเปลวไฟสีน้ำเงินจากปากทางออก ก่อนจะแยกตัวเป็นเปลวไฟสีส้มที่ $Y=4D$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วนสมมูลที่ 1.0 พบว่าเปลวไฟสีน้ำเงินเป็นสัดส่วนระหว่างสีของเปลวไฟได้อย่างชัดเจนที่สุด และให้ความยาวเปลวไฟที่เล็กที่สุดเท่ากับ $Y=12D$ และที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 เปลวไฟที่

เกิดขึ้นมีความยาวสูงสุดที่ $Y=18D$ ซึ่งเกิดจากการแยกตัวระหว่างเปลวไฟที่ $Y=2D$ เปลวไฟส่วนปลายมีลักษณะบานออกเป็นวงกว้างและมีสีส้มเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.8 และ 1.0

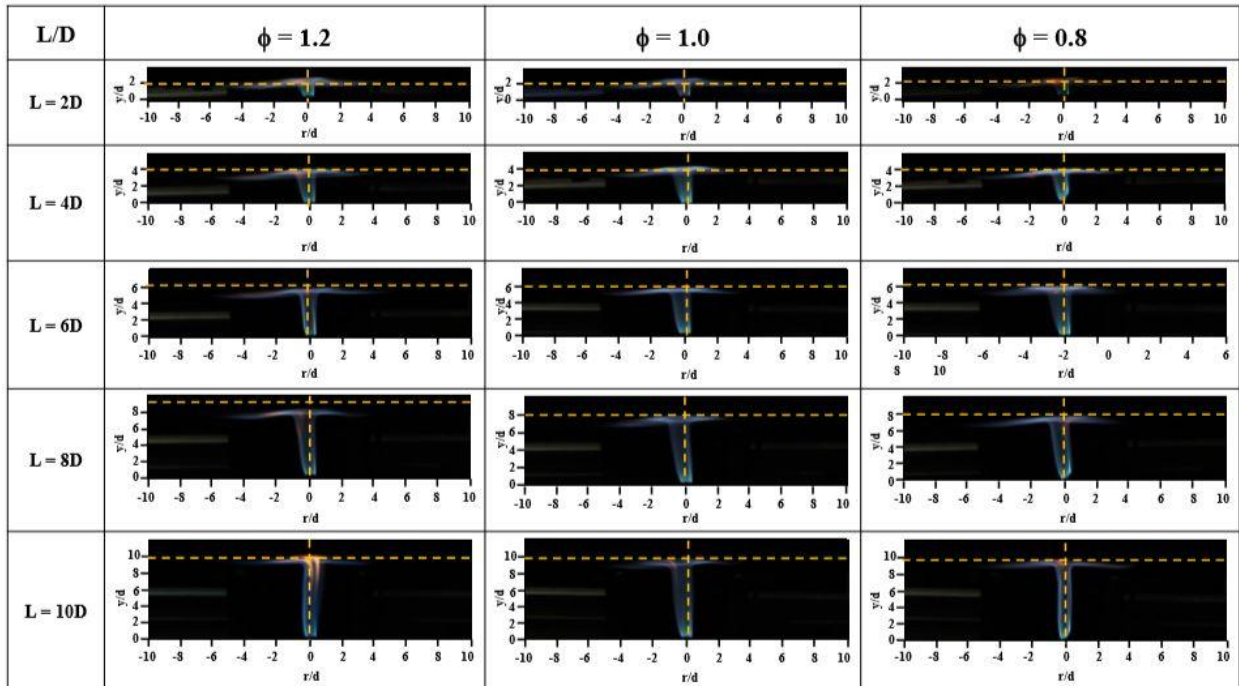
ทั้งนี้ผลของความสูงเปลวไฟอิสระที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อมีความสูงมากกว่าเปลวไฟอิสระที่ได้จากหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควงที่เป็นผลมาจากการความสูงในส่วน of ปากทางออกจากห้องเผาไหม้ส่งผลให้เปลวไฟอิสระที่ได้มีความยาวที่แตกต่างกัน



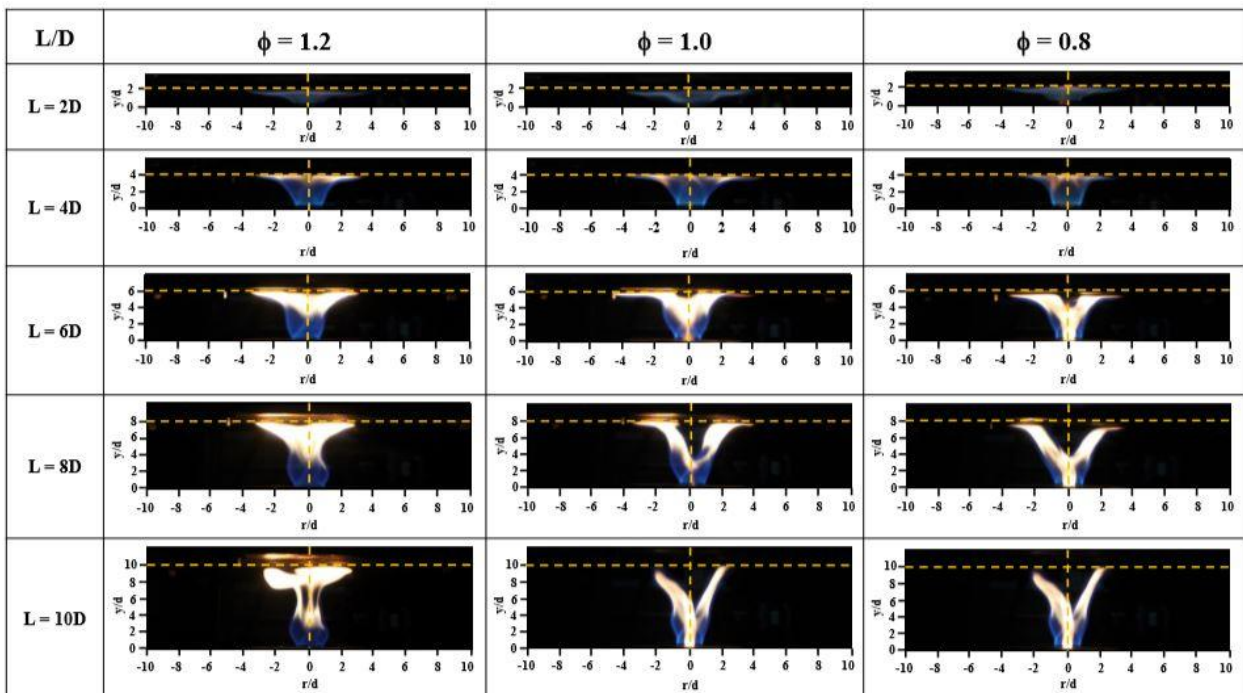
รูปที่ 6 ผลของลักษณะโครงสร้างของเปลวไฟอิสระจากหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควง

จากรูปที่ 7 แสดงผลของเปลวไฟที่มีต่อโครงสร้างเปลวไฟที่ระยะพุ่งชนที่ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยรูปที่ 7 ก) แสดงลักษณะของเปลวไฟพุ่งชนที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อ พบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ทุกระยะ L/D ลำเปลวไฟที่ออกมาในตอนต้นมีลักษณะเป็นสีน้ำเงิน และมีสีส้มติดอยู่ที่ปลายเปลวไฟปะปนอยู่ โดยเปลวไฟจะมีสีส้มอย่างเห็นได้ชัดตามระยะ L/D ที่เพิ่มขึ้น และเห็นได้ชัดเจนที่สุดในระยะ $L=10D$

เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 พบว่าที่ลำของเปลวไฟจะมีสีน้ำเงินและมีบางส่วนที่เปลวไฟมีสีส้ม นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 เปลวไฟที่กระทบกับแผ่นพุ่งชนในส่วนใกล้กับหัวฉีดเป็นลำสีฟ้าชัดเจนที่สุด เมื่อเพิ่มระยะของแผ่นพุ่งชนเปลวไฟยังคงเป็นสีน้ำเงิน และที่ระยะ $L=10D$ ในส่วนปลายของเปลวไฟที่มีสีส้มเพียงเล็กน้อย



ก) โครงสร้างลักษณะการไหลของเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ



ข) โครงสร้างลักษณะการไหลของเปลวไฟจากหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควง

รูปที่ 7 แสดงผลของระยะพุ่งชนที่มีต่อโครงสร้างเปลวไฟจากหัวฉีด ก) โครงสร้างลักษณะการไหลของเปลวไฟจากหัวฉีดแบบท่อ ข) โครงสร้างลักษณะการไหลของเปลวไฟจากหัวฉีดที่มีห้องสร้างการไหลหมุนควง

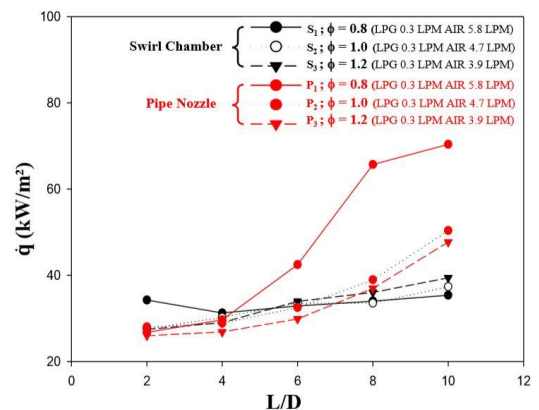
รูปที่ 7 ข) แสดงลักษณะการเปลวไฟที่ได้จากห้องสร้างการไหลหมุนควง พบว่าที่ทุกๆ อัตราส่วนสมมูล ที่ระยะ L/D ส่งผลต่อลักษณะเปลวไฟอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 เปลวไฟที่ได้ออกมาในตอนต้นจะมีลักษณะเป็นสีน้ำเงิน โดยที่ระยะ $L=4D$ เปลวไฟจะเริ่มบานออกเป็นวงกว้าง และที่ปลายของเปลวไฟจะมีลักษณะเป็นสีส้มใหญ่ขึ้นแปรผันตรงระยะ L/D ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของเปลวไฟที่อัตราส่วนสมมูลระหว่าง 1.0 และ 0.8 โดยเปลวไฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกัน จะเริ่มแยกออกเป็นสองที่ระยะ $L=6D$ และจะเริ่มบานออกเป็นสองทางกว้างขึ้นตามระยะ L/D ที่เพิ่มขึ้น แต่หากเปรียบเทียบในเรื่องของสีเปลวไฟ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 พบว่าเปลวไฟใกล้หัวฉีดมีลักษณะเป็นสีน้ำเงินเข้มในทุกๆ ระยะ L/D เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศไปที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 เกิดเปลวไฟสีส้มอยู่ตรงกลางหัวฉีด และจะมีลักษณะกว้างขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะ L/D ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 9 แสดงผลของความสูงของระยะพุ่งชนที่มีต่อค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่เงื่อนไขอัตราส่วนสมมูลที่ 0.8, 1.0 และ 1.2 จากหัวฉีดสองแบบ เส้น P_1 , P_2 และ P_3 แสดงค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟที่ได้จากหัวฉีดแบบท่อ จากรูปพบว่าที่ระยะ $L=2D$ และ $4D$ ค่า ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามระยะ L/D ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ที่ระยะ $L=6D$ ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และที่เงื่อนไขของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 พบว่าให้ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในกรณีของเปลวไฟที่สร้างจากหัวฉีดแบบท่อ

เส้น S_1 , S_2 และ S_3 แสดงผลความสูงของระยะพุ่งชนที่มีต่อค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน โดยที่ระยะ $L=4D$ และ $6D$ ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะ L/D เมื่อสังเกตที่ระยะ $L=2D$ พบว่าค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 มีค่ามากที่สุดในตอนต้น และเมื่อเพิ่มระยะ L/D พบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ให้ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในทุกกรณี

จากผลค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกันตามรูปที่ 9 เมื่อนำผลค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากหัวฉีดทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบในทุกอัตราส่วนสมมูลและทุกระยะ L/D ที่ใช้ในการศึกษาพบว่า ในช่วงระยะแรกค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควงให้ค่าสูงกว่ากรณีหัวฉีดแบบท่อ เมื่อระยะ L/D เพิ่มขึ้นที่ $L=8D$ ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดแบบห้องสร้างการไหลหมุนควงที่ได้มีค่าน้อยกว่ากรณีหัวฉีดแบบท่อ 50%



รูปที่ 9 ผลค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบหัวฉีดสองชนิด

5. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) จากหัวฉีดทั้งสองชนิดลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจะมีสีฟ้ามากที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 พบว่า เปลวไฟที่ออกมาจากหัวฉีดทั้งสองชนิดมีความยาวมากที่สุด ในส่วนบริเวณปลายของเปลวไฟจะมีลักษณะบานออกเป็นวงกว้าง และมีสีส้มอย่างชัดเจน
- 2) ผลของระยะพุ่งชนส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างเปลวไฟและลักษณะการกระจายตัวของเปลวไฟได้อย่างชัดเจน โดยที่ระยะเริ่มต้นทุกอัตราส่วนที่ได้จากบริเวณปากหัวฉีดทั้งสองชนิดพบว่าเปลวไฟมีลักษณะเป็นสีฟ้าเมื่อเพิ่มระยะ L/D ส่วนปลายของเปลวไฟจะมีสีส้มแปรผันตามระยะความสูงที่เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 พบว่าจากหัวฉีดทั้งสองแบบเปลวไฟที่บานออกปะทะเข้ากับแผ่นพุ่งชนมีลักษณะเป็นสีส้มปะปนและจะเห็นชัดมากที่สุดที่ระยะ $L=10D$
- 3) เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของหัวฉีดสร้างเปลวไฟทั้งสองชนิดแล้ว พบว่าที่ระยะ $L=2D, 4D$ และ $6D$ ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้เปลวไฟจากหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควงบานออกเป็นวงกว้างและให้ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอส่งผลให้ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีจากหัวฉีดแบบท่อถึง 20% แต่เมื่อระยะความสูงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ $L=8D$ ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดแบบท่อมีค่าสูงกว่าหัวฉีดแบบมีห้องสร้างการไหลหมุนควงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากการแยกตัวของเปลวไฟหมุนควงเป็นสองทางตามระยะ L/D ที่สูงขึ้นและความสูงของเปลวไฟที่แปรผันตรงตามระยะปากทางออกของหัวฉีด ทำให้ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟหมุนควงที่ได้มีค่าน้อยกว่าในกรณีหัวฉีดแบบท่อต่ำสุดที่ 50%

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1997). Heat transfer characteristics of a radial jet reattachment flame, J. Heat transfer, Vol. 119, pp. 258-264.
- [2] Zhang, Y. and Bray, K. N. C., (1999). Characterization of impinging jet flame, J. Combustion and flame, Vol. 116, pp. 671-674.
- [3] Foat, T., Yap, K. P. and Zhang, Y., (2001). The visualization and mapping of turbulent premixed impinging flame, J. Combustion and Flame, Vol. 125, pp. 839-851.
- [4] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1997). Surface condition effects on flame impingement heat transfer, J. Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 15, pp. 323-335.
- [5] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1998). Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface, Exp. Thermal Fluid Sci, Vol. 16, pp. 247-259.
- [6] Mishra, D. P., (2002). Experimental Studies of LPG-air Premixed Flame Impingement Heat Transfer, Proceedings of International Symposium on Recent Trends in Heat and Mass Transfer, pp. 45-66.
- [7] Tuttle, S. G., Webb, B. W., and McQuay, M. Q., (2005). Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part I: Time-averaged results, International Journal of



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

HTE – 271



Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1236-1251.

[8] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1996). Combustion measurement from an impinging radial reattachment flame, J. Combust. Flame, Vol. 106, pp. 69-80.

[9] Mishra, D. P., (2004). Emission Studies of Impinging Premixed Flames, J. Fuel, Vol. 83, pp. 1743-1748.

ภาคผนวก จ
บทความสำหรับเผยแพร่ 3



การศึกษาโครงสร้างเปลวไฟและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน ของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบผสมก่อน

STUDY OF FLAME STRUCTURE AND HEAT TRANSFER OF PREMIXED ARRAY SWIRLING FLAME JET

ณัฐมาศ อุปถัมภ์

วงศธร บุญโยภาส

ธิติวัดณ์ ไชยกิจ

พิชยะ ชิตณรงค์

ชยุต นันทดุสิต

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนและการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเปลวไฟหมุนควงไหลปะทะผนังเรียบ ในการทดลองสร้างกลุ่มเปลวไฟโดยใช้วิธีฉีดเชื้อเพลิง LPG ผสมอากาศในแนวสัมผัสภายในห้องทรงกระบอก โดยความสูงของห้องทรงกระบอก (ห้องสร้างการไหลหมุนควง) ที่ $H=2.2D$, $4.6D$ และ $7.0D$ มีการจัดเรียงตัวของหัวฉีดในลักษณะแบบแถวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ $S=2D$ จำนวน 16 รู โดยกำหนดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 1000 ที่อัตราส่วนสมมูล 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ และระยะฟุ้งชนที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$ สำหรับการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟใช้วิธีถ่ายภาพขณะกลุ่มเจ็ทไหลปะทะแผ่นฟุ้งชน และศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงไหลปะทะ จากผลการศึกษาพบว่าที่ความสูงห้องทรงกระบอกที่ $4.6D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวได้สูงที่สุดในทุกระยะ L/D

คำสำคัญ : เปลวไฟฟุ้งชน, เปลวไฟหมุนควง, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This research was to study the structure of array swirling flame and heat transfer characteristics of flame impinging jet on flat plate. In the experiment, swirling flame was formed by injecting a mixture of LPG and air in a cylindrical chamber tangentially. The cylindrical chamber was varied high of swirl chamber (H) at $2.2D$, $4.6D$ and $7.0D$, fixed inter jet spacing (S) $2D$ inline 16 jet on same steel plate burner. In the experiment fixed Reynolds number at 1000 from equivalence ratio 0.8, 1.0 and 1.2. The jet-to-plate distance (L) was varied at $2D$, $4D$, $6D$, $8D$ and $10D$. The array swirl impinging flame jet structure was visualized and recorded with digital camera including measurement on the average heat flux of impinging flame. The results of study showed that the array flame at $H=4.6D$ with equivalence ratio at 1.2 gave highest average heat flux for all L/D .

Keywords: Impinging flame, Swirling flame, Heat transfer

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโดยวิธีใช้เจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนบนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการให้ความร้อนแก่พื้นผิวที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่นการผลิตโลหะ แก้ว และกระดาษ รวมถึงกระบวนการตัด เชื่อม หลอมเหลวโลหะ เป็นต้น เนื่องจากการใช้เปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวโดยตรงเป็นวิธีการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงโดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟฟุ้งชนโดยตรง โดยวิธีดังกล่าวสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้อย่างเร็ว ส่งผลทำให้สามารถลดระยะเวลาของ

กระบวนการให้ความร้อนและช่วยประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีเดิมที่ใช้กลไกการแผ่รังสีความร้อน

สำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวโดยตรงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเปลวไฟ เช่น เปลวเพลิงประเภทผสมก่อน (Premixed flame) หรือ เปลวเพลิงผสมภายหลัง (Diffusion flame) ระยะห่างระหว่างหัวเผาและพื้นผิวให้ความร้อน ชนิดของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีผลต่อลักษณะและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ

ที่พุ่งชนบนพื้นผิวเรียบเป็นจำนวนมาก มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเปลวไฟ [1-3] การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟบนพื้นผิวทั้งแบบเฉพาะจุดและแบบเฉลี่ย [4-7] และการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเปลวไฟ [8 และ 9]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่ใช้เปลวไฟมีอยู่เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารที่เริ่มใช้เปลวไฟเป็นหลัก ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดปัญหาการขาดต้นทุนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยมีแนวคิดการนำเทคโนโลยีของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมาใช้ โดยการปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทเปลวไฟหมุนควง เนื่องจากการหมุนควงของเจ็ทได้เพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆ ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวที่เร็วและมีระดับความแปรปรวนในเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดาและอาจจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณรอบๆ เจ็ทเพิ่มสูงขึ้นหรือในกรณีของการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว กลุ่มเจ็ทหมุนควงอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงก่อนพุ่งชนพื้นผิวและมีการไหลแบบหมุนควงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทหมุนควง รวมถึงพฤติกรรมการไหลของกลุ่มเจ็ทหมุนควงก่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นพุ่งชน โดยพิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ในช่วง $L = 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกที่ 5 mm โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 ที่ค่าเรย์โนลด์ส์มีเบอร์เท่ากับ 1000 และนอกจากนี้ได้ใช้กล้องดิจิทัลทำการบันทึกภาพลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟขณะพุ่งชนพื้นผิวเพื่อทราบถึงโครงสร้างของกลุ่มเปลวไฟหมุนควงที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

2. โมเดลและชุดทดลอง

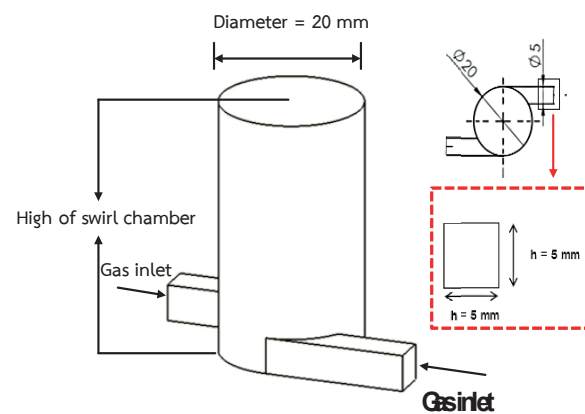
2.1 โมเดลของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงแบบกลุ่มที่ทำจากแผ่นเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเป็นทางเข้าของส่วนผสมขนาด 5 mm และเส้นผ่าน

ศูนย์กลางที่ปากทางออกเท่ากับ 20 mm ที่จัดเรียงตัวในแผ่นเหล็กในลักษณะแบบแถว (In line) จำนวน 4×4 ทั้งหมด 16 รู โดยระยะห่างระหว่างกลุ่มเจ็ทเปลวไฟถูกติดตั้งที่ (Separated of jet, S) 2D ทั้งนี้การไหลของส่วนผสมเข้าไปยังแขนทั้งสองข้างดังแสดงตามโมเดลรูปที่ 1 โดยส่วนผสมที่ไหลชนกันในแนวสัมผัสภายในห้องทรงกระบอกที่มีความสูงตั้งแต่ (High of swirl chamber, H) 2.2D, 4.6D และ 7.0D ตามลำดับ

การศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์มีเบอร์ครั้งที่ 1000 และใช้อัตราส่วนสมมูลที่ 0.8, 1.0 และ 1.2 ซึ่งอีกตัวแปรสำคัญสำหรับการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิวที่พุ่งชนคือระยะห่างระหว่างปากทางออกกับแผ่นพุ่งชน (Separated distance burner to plate, L) ที่ 4D, 6D, 8D และ 10D ตามลำดับ

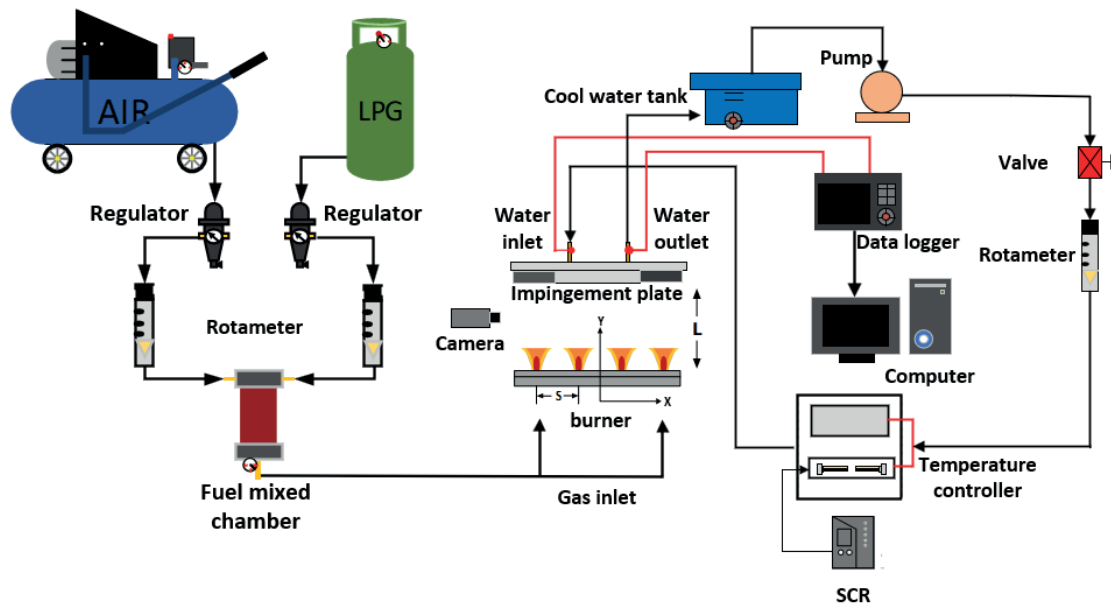
ในการทดลองจะใช้เปลวไฟแบบผสมมาก่อน โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ผสมกันก่อนจะเข้าสู่ตัวเจ็ท โดยค่าความดันของแก๊ส LPG จะอยู่ที่ 2 mbar และค่าความดันของอากาศจะอยู่ที่ 3 mbar



รูปที่ 1 โมเดลเจ็ทหมุนควง

2.2 ชุดทดลอง

ในรูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองสำหรับศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่มีผลต่อการลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนบนพื้นผิวจากส่วนผสมที่ถูกผสมจากอากาศและเชื้อเพลิง LPG ก่อนเข้าสู่หัวเจ็ท โดยอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกกรองความชื้นผ่านชุดดักจับความชื้น อัตราการไหล



รูปที่ 2 โมเดลชุดทดลอง

ของอากาศและเชื้อเพลิงถูกควบคุมผ่านโรตاميเตอร์ก่อนเข้าสู่ถังผสมที่ภายในมีลูกเหล็กเพื่อช่วยในการผสมสัดส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนจะตรงเข้าสู่หัวเจ็ท ในการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเปลวไฟพุ่งจะใช้แผ่นพุ่งชนกว้าง 360 ยาว 360 ที่ระยะห่างระหว่างปากทางออกกับเจ็ทที่ $L = 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ และบันทึกผลผ่านกล้องดิจิทัล

ซึ่งโครงสร้างของเปลวไฟมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง ในการทดลองเพื่อหาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนจะใช้แผ่นสแตนเลสหนา 5 mm มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ 16D ทั้งนี้กล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีลักษณะยื่นออกมาที่มีความสูงเท่ากับ 25 mm โดยภายในมีลักษณะกลวงเต็มไปด้วยน้ำสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนขณะที่กลุ่มเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว อีกทั้งรอบแผ่นพุ่งชนสแตนเลสจะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนขณะการทดลอง ในการทดลองจะใช้น้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจากถึงน้ำเย็นผ่านตัววาล์วเข้าสู่โรตاميเตอร์เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำเข้า (water inlet) ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในแผ่นพุ่งชนกำหนดที่ 40 ± 1 °C ด้วยชุดฮีตเตอร์ที่ถูกรักษาอุณหภูมิของน้ำเข้าและน้ำออกจากแผ่นพุ่งชนถูกวัดผ่านเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด PT-100 (± 0.01 °C) ถูกบันทึกผลผ่าน data logger และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างแผ่นพุ่งชนกับเจ็ทที่ $L = 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟ

ในการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟได้ใช้กล้องดิจิทัลทำการบันทึกภาพขณะกลุ่มเจ็ทเปลวไฟไหลปะทะพื้นผิวพุ่งชน โดยทำการติดตั้งกล้องดิจิทัลที่ตำแหน่งเดิมของทุกตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน ซึ่งแผ่นพุ่งชนขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามที่มีลักษณะกลวงเต็มไปด้วยน้ำ ในการทดลองหาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวจะใช้น้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนขณะที่กลุ่มเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว โดยการควบคุมน้ำเข้าแผ่นพุ่งชน (water inlet) ที่อุณหภูมิ 40.0 ± 0.1 °C และอุณหภูมิน้ำออก (water outlet) จะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด PT-100 ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผ่นพุ่งชนและหลังจากออกจากแผ่นพุ่งชนสามารถทราบถึงการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวดังสมการที่ (1) และ (2)

สำหรับการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1)$$

โดยที่ c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ

\dot{m} คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก

สำหรับพลั๊กการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุน
ควงหาได้จากสมการ

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน
 \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

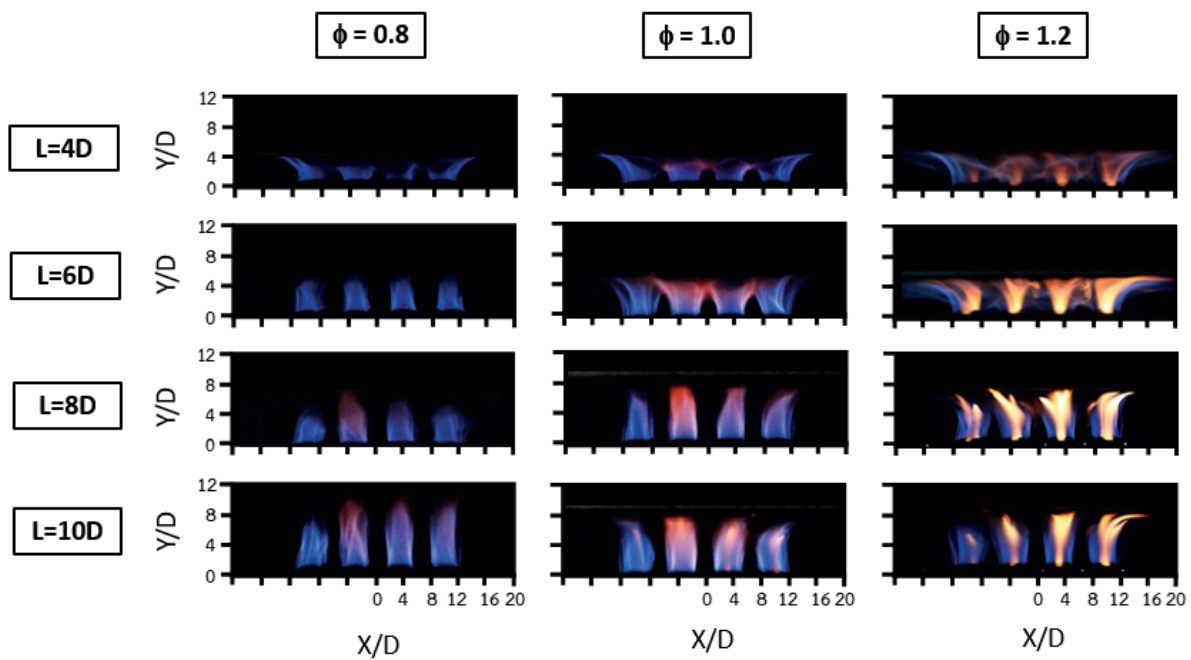
4. ผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างการไหลของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะ ปะทะแผ่นฟุ้งชน

จากการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะ
ปะทะแผ่นฟุ้งชนที่ระยะ $L = 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ จาก
การทดลองได้ศึกษาตัวแปรที่ความสูงของห้องที่ $H=2.2D, 4.6D$
และ $7.0D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ
โดยมีค่าเรย์โนลด์คังที่เท่ากับ 1000 โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด
เพื่อศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ขณะกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงฟุ้งชนพื้นผิวถูกบันทึกผลโดยกล้อง
ดิจิทัล

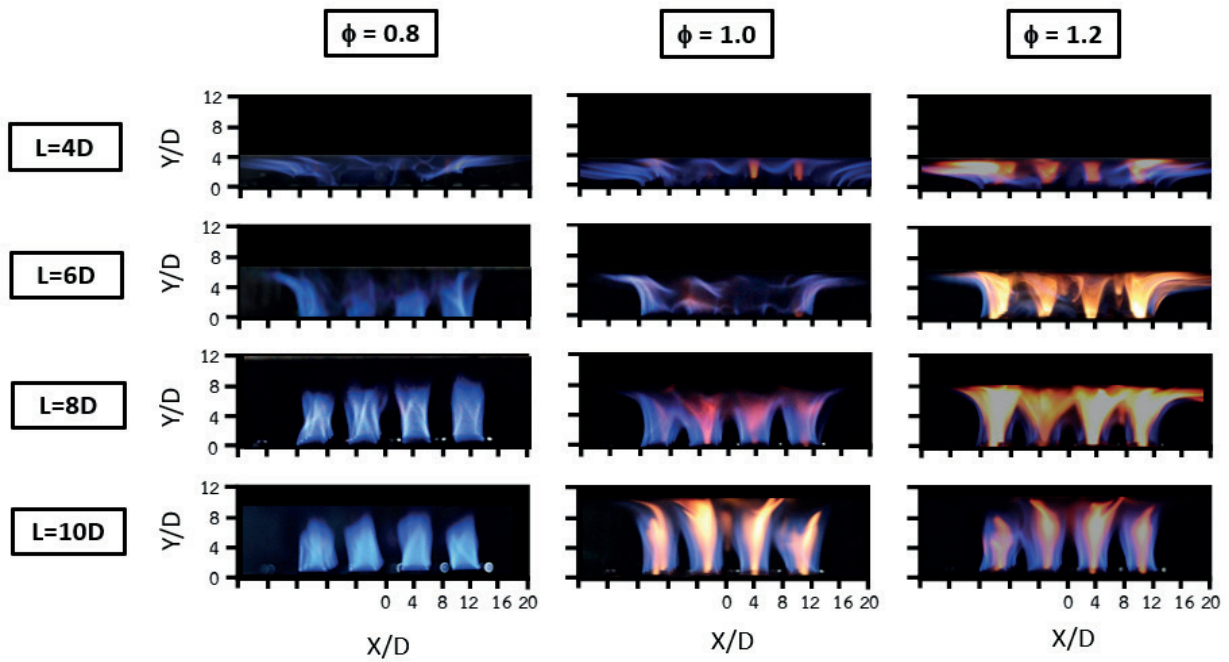
จากผลการทดลองในรูปที่ 3 แสดงภาพกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุน
ควงที่ความสูงของห้อง $H = 2.2D$ อัตราส่วนสมมูลที่ $0.8, 1.0$ และ
 1.2 ตามลำดับ ขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนในระยะที่เปลี่ยนไปพบว่า ใน
ระยะฟุ้งชนที่ $L=4D$ กลุ่มเปลวไฟหมุนควงทุกอัตราส่วนสมมูล
กลุ่มเจ็ทเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนตลอดหน้าตัด แต่เมื่อเพิ่ม
ระยะ $L=6D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 กลุ่มเปลวไฟสัมผัสกับ
แผ่นฟุ้งชนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ 1.0 และ 1.2 อย่างเห็นได้
ชัด และเมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนเพิ่มขึ้นสังเกตได้ว่ากลุ่มเปลวไฟที่ได้
จากอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ไม่ได้สัมผัสกับแผ่นฟุ้งชน ในส่วน
อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 มีเพียงแคปลายของกลุ่มเปลวไฟ
เท่านั้นที่สัมผัสบริเวณพื้นผิวของแผ่นฟุ้งชน เมื่อเปรียบเทียบกับ
อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ในทุกระยะห่างระหว่างเจ็ทและแผ่น
ฟุ้งชนกลุ่มเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวแผ่นฟุ้งชนตลอดระยะความสูงของ
แผ่นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลมีผลสีของ
เปลวไฟ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นกลุ่มเปลวไฟจะมีลักษณะเป็น
สีส้มอย่างชัดเจน



รูปที่ 3 กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ $H=2.2D$ ขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนในระยะต่างๆ

เมื่อเพิ่มความสูงของห้องหมุนควงส่งผลต่อโครงสร้างกลุ่ม
เปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนดังแสดงในรูปที่ 4 แสดง
ภาพกลุ่มเปลวไฟขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้ง
ชนกับเจ็ทในระยะต่างๆ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $0.8, 1.0$
และ 1.2 ตามลำดับ การเพิ่มความสูงของห้องทรงกระบอกที่สร้าง
การไหลหมุนควงไปที่ $H=4.6D$ พบว่าเปลวไฟที่ได้มีขนาดความสูง
เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระยะ $H=2.2D$ นอกจากความสูงของเปลวไฟ
ที่เพิ่มขึ้นแล้ว การบานตัวของเปลวไฟยังกว้างขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เมื่อ

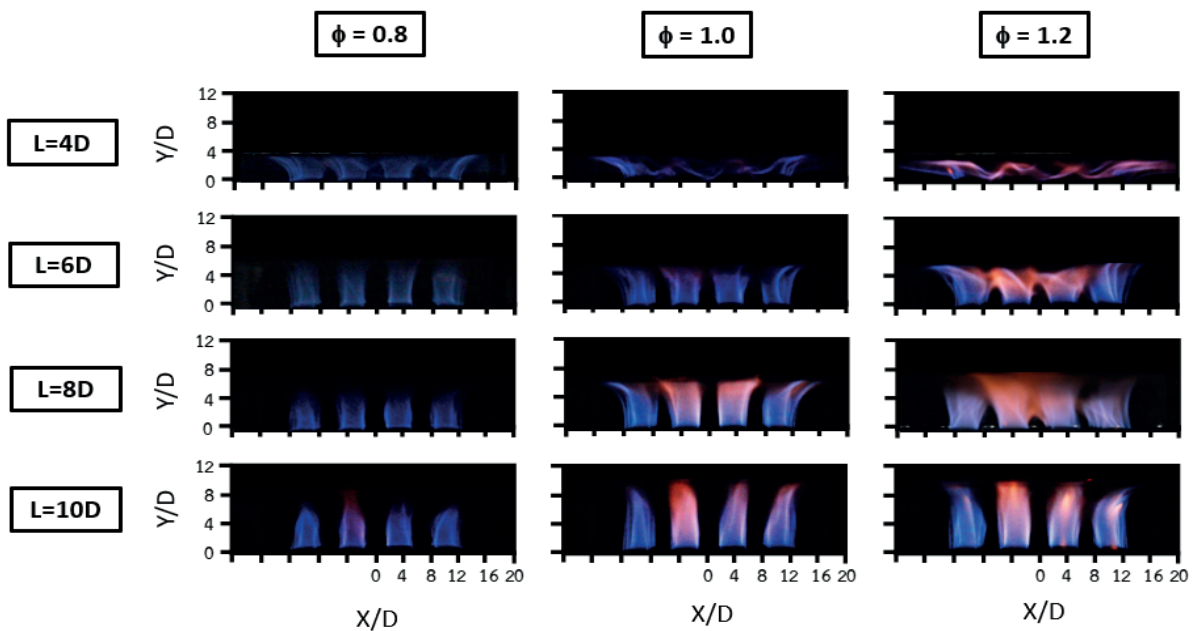
สังเกตที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$ และ $6D$ พบว่าในทุกอัตราส่วนสมมูลที่
ใช้ในการศึกษากลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงปะทะกับพื้นผิวแผ่นฟุ้ง
ชนโดยตรง และเมื่อเพิ่มระยะ $L=8D$ ยังคงเป็นกลุ่มเจ็ทเปลวไฟที่
อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 เท่านั้นที่มีเพียงแคปลายเปลวไฟ
สัมผัสบริเวณพื้นผิวที่ฟุ้งชน และเมื่อเพิ่มระยะ $L=10D$ จะมีเพียง
แคไอรอนที่ได้จากกลุ่มเจ็ทเปลวไฟเท่านั้นที่ปะทะกับแผ่นฟุ้งชน
ในอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 และ 1.2 กลุ่มเปลวไฟหมุนควง
ปะทะกับแผ่นฟุ้งชนตลอดระยะความสูงที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4 กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ $H=4.6D$ ขณะปะทะแผ่นพุงชนในระยะต่างๆ

จากผลการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ $H=7.0D$ ขณะปะทะแผ่นพุงชนที่ระยะห่างระหว่างแผ่นพุงชนกับเจ็ทในระยะห่างต่างๆในรูปที่ 5 จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มความสูงห้องทรงกระบอกไปในระยะหนึ่ง จากกรณีเปลวไฟที่เริ่มบานออกใน $H=4.6D$ และเริ่มแคบตัวลงเมื่อเพิ่มความสูง $H=7.0D$ ในระยะพุงชนที่ $L=10D$ ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 และ 1.2 บริเวณปลายเปลวไฟของกลุ่มเจ็ทหมุนควงสัมผัสกับแผ่นพุงชนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

และยังคงเป็นที่ยึดราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ที่โครงสร้างของเปลวไฟมีขนาดสั้นและให้เพียงรังสีความร้อนจากกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงเท่านั้นที่ปะทะกับแผ่นพุงชน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มความสูงของห้องทรงกระบอกสร้างการไหลหมุนควงมากขึ้น เปลวไฟจะบีบตัวให้แคบลงเนื่องจากการไหลวนภายในมีความเร็วมากขึ้นตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นพุงชนไหลไม่เต็มหน้าตัด จนเกิดเป็นช่องว่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นพุงชนกับเจ็ทเพิ่มขึ้น

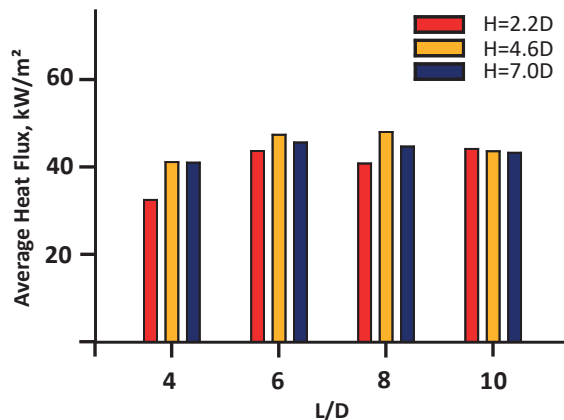


รูปที่ 5 กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงที่ $H=7.0D$ ขณะปะทะแผ่นพุงชนในระยะต่างๆ

4.2 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

โครงสร้างเปลวไฟมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นที่ $H=2.2D$, $4.6D$ และ $7.0D$ อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์คงที่ที่เท่ากับ 1000 ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับเจ็ทที่ $L=4D$, $6D$, $8D$ และ $10D$

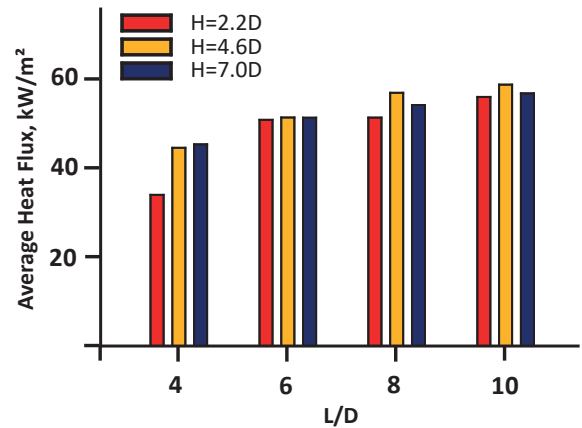
จากผลการทดลองที่ความสูงของห้องทรงกระบอกสร้างการไหลหมุนควงที่ $H=2.2D$ ในระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับเจ็ทต่างๆ แสดงในรูปที่ 6 พบว่าที่ระยะฟุ้งชนเท่ากับ $L=6D$ จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยได้สูงที่สุดในทุกกรณี L/D เมื่อเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนกับโครงสร้างของกลุ่มเปลวไฟหมุนควงขณะฟุ้งชนพื้นผิว สามารถบอกได้ว่ากลุ่มเปลวไฟหมุนควงที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 กลุ่มเปลวไฟหมุนควงปะทะกับพื้นผิวโดยตรง แต่เมื่อเพิ่มระยะ L/D ให้สูงขึ้น ทำให้มีเพียงแครงสีความร้อนที่ปะทะกับแผ่นฟุ้งชนเท่านั้น จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงเมื่อเพิ่มระยะ L/D



รูปที่ 6 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8

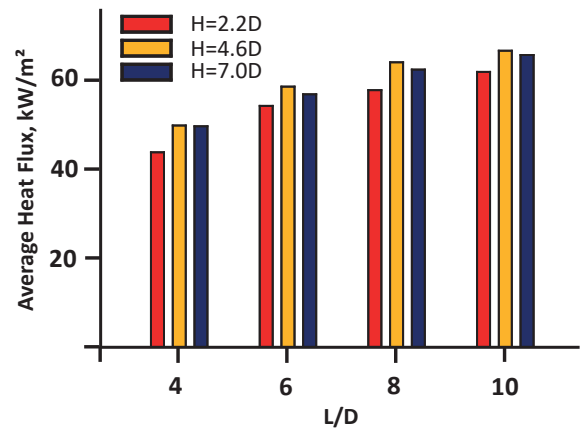
จากผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ทุกระยะความสูงของห้องทรงกระบอกสร้างการไหลหมุนควงและทุกระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับเจ็ทแสดงในรูปที่ 7 พบว่า มีเพียงความสูงของห้องทรงกระบอก $H=4.6D$ ที่กลุ่มเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนเต็มหน้าตัดบริเวณพื้นผิวที่ฟุ้งชน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ $H=4.6D$ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณี H/D อื่นๆ ทั้งนี้ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้น ทำให้กลุ่มเปลวไฟหมุนควงมีขนาดความสูงเพิ่มขึ้นอีกด้วยและสามารถสังเกตได้จากการเพิ่ม L/D

นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่าการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวเนื่องมาจากการเปลี่ยนสีของเปลวไฟที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิของเปลวไฟขณะฟุ้งชนพื้นผิวที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0

ในรูปที่ 8 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงฟุ้งชนได้สูงที่สุดในทุกกรณีอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะฟุ้งชนพื้นผิวพบว่า ในทุกระยะ L/D กลุ่มเปลวไฟหมุนควงปะทะพื้นผิวตลอดหน้าตัดแผ่นฟุ้งชน ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวโดยตรง อีกทั้งการเพิ่ม L/D ให้สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 8 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2

จากผลการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวพบว่าที่ความสูงของห้องทรงกระบอก $H=4.6D$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุด เนื่องจากกลุ่มเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะพื้นผิวไหลปะทะแผ่นฟุ้งชนตลอดหน้าตัดในทุกระยะ L/D อีกทั้งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะบรรยากาศเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมอากาศบริเวณโดยรอบ จึงส่งผลให้เกิดการดึงอากาศมาผสมกับการเผาไหม้ (Entrainment) ทำให้การเผาไหม้ที่ได้สมบูรณ์จึงเป็นส่วนที่ทำให้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงที่สุดในทุกกรณีที่ใช้ศึกษา

5.สรุปผล

จากการทดลองสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. โครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความสูงของห้องสร้างการไหลหมุนควง (H/D) ที่ชี้ให้เห็นถึงการบานตัวของเปลวไฟเมื่อเพิ่มระยะ H/D ถึงระยะหนึ่ง นอกจากนี้อัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการทดลองแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเปลวไฟอย่างเห็นได้ชัด ไม่ว่าจะเป็นความสูงของเปลวไฟ สีของเปลวไฟที่เปลี่ยนตามอัตราส่วนสมมูล อีกทั้งการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะพื้นผิวพบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นฟุ้งชนกับเจ็ทส่งผลต่อลักษณะของเปลวไฟเช่นกัน ที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชน โดยที่ค่าระยะฟุ้งชนต่ำลักษณะสีของเปลวไฟจะมีลักษณะคล้ายกันและการกระจายตัวของเปลวไฟออกด้านข้างจะกว้างแต่เมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มสูงขึ้นลักษณะสีของเปลวไฟจะเริ่มต่างกัน และการกระจายตัวของเปลวไฟที่ออกด้านข้างจะแคบลง

2. โครงสร้างของกลุ่มเจ็ทเปลวไฟหมุนควงขณะปะทะแผ่นฟุ้งชนส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวของแผ่นฟุ้งชนอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ในระยะ L/D ที่ต่ำกลุ่มเปลวไฟหมุนควงปะทะแผ่นฟุ้งชนตลอดหน้าตัดในทุกกรณี แต่เมื่อเพิ่ม L/D ให้สูงขึ้นกลุ่มเปลวไฟในบางกรณีมีเพียงรังสีความร้อนเท่านั้นที่ปะทะกับแผ่นฟุ้งชน อีกทั้งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะบรรยากาศเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมอากาศบริเวณโดยรอบ จึงส่งผลให้เกิดการดึงอากาศมาผสมกับการเผาไหม้ (Entrainment) ในอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ที่ $H=4.6D$ จึงให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวได้สูงที่สุดในทุกกรณีที่ศึกษา

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1997). Heat transfer characteristics of a radial jet reattachment flame, *J. Heat transfer*, Vol. 119, pp. 258-264.
- [2] Zhang, Y. and Bray, K. N. C., (1999). Characterization of impinging jet flame, *J. Combustion and flame*, Vol. 116, pp. 671-674.
- [3] Foat, T., Yap, K. P. and Zhang, Y., (2001). The visualization and mapping of turbulent premixed impinging flame, *J. Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 839-851.
- [4] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1997). Surface condition effects on flame impingement heat transfer, *J. Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 15, pp. 323-335.
- [5] Baukal, C. E. and Gebhart, B., (1998). Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface, *Exp. Thermal Fluid Sci*, Vol. 16, pp. 247-259.
- [6] Mishra, D. P., (2002). Experimental Studies of LPG-air Premixed Flame Impingement Heat Transfer, *Proceedings of International Symposium on Recent Trends in Heat and Mass Transfer*, pp. 45-66.
- [7] Tuttle, S. G., Webb, B. W., and McQuay, M. Q., (2005). Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part I: Time-averaged results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1236-1251.
- [8] Mohr, J. W., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., (1996). Combustion measurement from an impinging radial reattachment flame, *J. Combust. Flame*, Vol. 106, pp. 69-80.
- [9] Mishra, D. P., (2004). Emission Studies of Impinging Premixed Flames, *J. Fuel*, Vol. 83, pp. 1743-1748.

ภาคผนวก ฉ
บทความสำหรับเผยแพร่ 4

Heat Transfer Characteristic for Premixed Flame Jet from Swirl Chamber

Open
Access

Nuttamas Uppatam¹, Wongsathon Boonyopas¹, Chattawat Aroonrujiphan¹, Natthaporn Kaewchoothong¹, Somchai Sae-ung¹, Chayut Nuntadusit^{1,2,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

² Energy Technology Research Center (ETRC), Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 December 2019

Received in revised form 29 August 2020

Accepted 31 August 2020

Available online XXXX

ABSTRACT

The objective of this research is to study flame structure and heat transfer characteristics for the premixed flame jet from the swirling chamber. In this study, LPG and air was utilized as gas fuel and oxidizer for a premixed flame. The equivalence ratios (ϕ) of LPG and air were considered at 0.8, 1.0, and 1.2 under a Reynolds number $Re = 4,000$. The swirl flame was generated by double tangential inlets in cylindrical chamber. The diameter of chamber was fixed at $D = 20$ mm and the hydraulic diameter of the inlet was $D_h = 5$ mm. In this study, the effect of chamber geometry on flame structure was investigated by varying the chamber from $H = 2.2D_h$ to $7.0D_h$. The structures and temperature of the free flame jet was record with camera and measured with a thermocouples. The heat transfer rate of impinging flame jet was also measured at distance from chamber outlet to flame impingement surface varying from $L = 4D_h$ to $10D_h$. The results show that the maximum of flame temperature occurs at $\phi=1.2$. Impinging flame jet for case of chamber height at $H = 4.6D_h$ and impingement distance at $L = 4D_h$ give the highest heat transfer for all equivalence ratios due to the reaction zone of combustion appearing near the heat transfer surface.

Keywords:

Swirling jet

Swirling chamber

Flame structure

Heat transfer

Copyright © 2019 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

1. Introduction

Impinging flame jets have been extensively used in several industrial applications for heating, grilling or drying process, for examples, annealing of glass, processing of heating and metal and glass including cutting and welding, drying of textiles film and paper [1-4] and drying or grilling of food products [5-8]. The impinging flame jets can produce high heat transfer rate on the impingement surface. However, it demands high fuel consumption for producing a flame jet. Viskanta [9, 10] and Tuttle et al. [11, 12] explained that the thermal performance of a flame jet impingement system is

* Corresponding author. Tel.: 07428-7035 ; Fax. : 07455-8830
E-mail address: chayut.n@psu.ac.th (C.Nuntadusit).

depended on many factors, such as nozzle geometry, fuel-oxidizer type, the flow rate of fuel-oxidizer, impingement surface condition, and configuration between jet nozzle and impingement surface.

Most of past studies focused on a flame jet from the pipe nozzle. The flame jet can locally be heating in the impingement region. The swirling flame jet can be improved demerit of the non-swirling flame jet from the pipe nozzle. Swirling jet is one of the methods for obtaining uniform heat transfer and higher heat transfer rate on the impingement surface. This is due to the mixing characteristics of the swirling jet promote the spreading rate and turbulence intensity in the jet before impingement. Recently, many researchers [13-16] studied the flame structure and heat transfer characteristics of swirling flame jet, which generated with different techniques such as twisted tape insert, swirling vane installed in pipe nozzle. Huang et al. [13] studied the heat transfer characteristics of a premixed impinging circular flame jet with induced swirling under the stoichiometric air/fuel condition ($\phi = 1.0$) with the Reynolds number varied from $Re = 800$ to $1,700$. They reported that the heat flux on the impingement plate was more uniform and the flame temperatures became higher when compared with a similar flame jet without swirling. Zhao et al. [14] evaluated the thermal performance of premixed impinging circular flame jet arrays with induced swirling at $\phi = 1.0$ to 1.8 under $Re = 500$ to $2,500$. They concluded that the thermal performance increased with increasing the Re and the ϕ , while decreased with increasing nozzle-to-plate distance. Zhen et al. [15] studied the emission characteristics of impinging swirling and non-swirling for inverse diffusion flames (IDF) using the hood method. They found that the swirling IDF emitted less NO_x and CO under most of the experimental conditions. Then, Singh et al. [16] investigated the effect of swirling impinging flame on heat transfer characteristics at $\phi = 1.0$ to 1.5 under $Re = 3,500$ to $6,000$. They reported that average heat flux increased significantly with Re while the variation of heat flux was not too considerable with the change of equivalence ratio. Besides, the heat flux distributions on impingement surface were more uniform with swirling flame jet as compared to non-swirling flame jet.

Recently, heat transfer characteristics of swirling impinging flame jet using twisted tapes are conducted by Hindsageri et al. [17], who used four twisted types of twist ratios 2, 3.2, 4.5, and 7.5 to obtain the swirling flame jet at $\phi = 0.7$ to 1.5 and $Re = 500$ to $2,500$. They found that the swirling flame jet could enhance the heat flux by 40–140% at low Reynolds number. Kotb and Saad [18] compared the thermal and emission characteristics of co-and counter swirl inverse diffusion flames using liquefied petroleum gas (LPG). The results showed that the centerline temperature profile of the co-swirling IDF was higher than the centerline temperature profile of the counter-swirl IDF for all values of ϕ used in their study. Kuntikana and Prabhu [19] studied the influence of equivalence ratios on the thermal performance of the Impinging flame jet at $Re = 500$ to $1,000$. They reported that the maximum thermal performance reached when the mixture was near stoichiometric. And the burner exit was spaced from the impingement surface such that the premixed cone tip touched the surface. Additionally, the 3D swirling flame structure using stereo-PIV was investigated by Boushaki et al. [20], who employed at the swirl number of 0.8 to 1.4 and the ϕ of 0.8 to 1.0. They found that the flame induced a larger radial flow spreading rate with higher mean velocities and higher turbulence intensity in jet structure.

As aforementioned above, the previous studies focused mostly on the effect of burner exit-to-target distance ratio and the equivalence ratios on heat transfer characteristics of the impinging swirling flame jet. However, most of the swirl generators have complex geometry, and some generators are not suitable for using in practical industry. In this study, we applied the swirl chamber to generate swirling premixed flame jet by double tangential inlets in a cylindrical chamber. The effect of chamber geometry on premixed swirling flame structure was investigated by varying the chamber height with fixed chamber diameter and inlet configuration. The heat transfer rate for all

swirling flame jet was also studied at different jet impingement distances and equivalence ratios between LPG and air.

2. Experimental setup and procedure

2.1 Experimental model and parameters

Fig. 1 shows the details of a swirling chamber for generating swirling flame jet used in this present work. The swirling chamber has cylindrical geometry and made of steel pipe having a diameter (D) of 20 mm. The bottom of the chamber has connected to double inlets with a square cross-section. The hydraulic diameter (D_h) of the square tangential pipe was equal to 5 mm. The flow from double inlets was injected tangentially to the main chamber to generate swirl flow in the chamber. The effect of chamber height on the structure of swirling flame jet was investigated by varying at $H = 2.2D_h - 7.0D_h$.

In this study, the LPG (Propane 70%, Butane 30%) and air was considered as gas fuel and oxidizer for the premixed flame jet. The equivalence ratios (ϕ) of 0.8 to 1.2 for LPG-air was varied at $\phi = 0.8$ for fuel-lean, $\phi = 1.0$ for stoichiometric and $\phi = 1.2$ for fuel-rich. All case of equivalence ratios were conducted at a constant Reynolds number (Re) of 4,000 which based on the mean mixing velocity.

For heat flux measurement of impinging flame jet, the effect of distance from chamber exit to impingement flat surface was evaluated in the range from $L = 4D_h$ to $10D_h$. Likewise, the essential parameters examined in this work were summarized in Table 1.

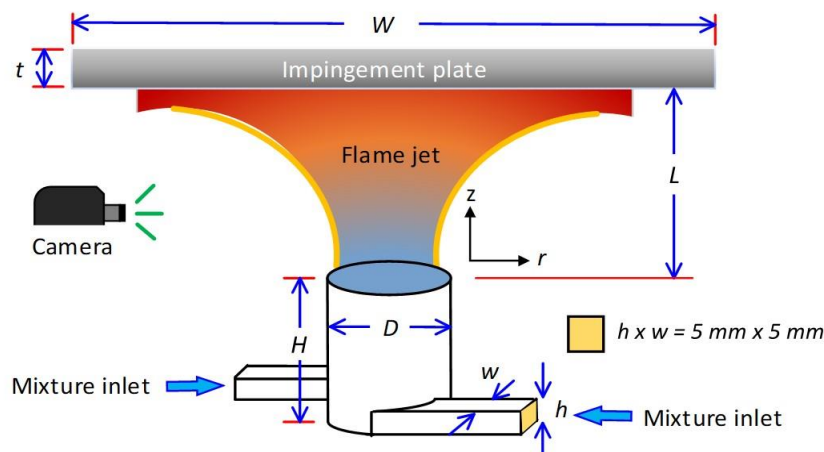


Fig. 1. Details of a swirling chamber used this study.

Table 1

Experimental parameters for this study

Parameters and symbol	Values
Diameter of swirl chamber, D	20 mm
Inlet geometry ($w \times h$)	5 mm x 5 mm
Hydraulic diameter of double inlets, D_h	5 mm
Chamber height, H	$2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$
Chamber exit-to-impingement surface distance, L	$4D_h$, $6D_h$, $8D_h$, and $10D_h$
Equivalence ratio, ϕ	0.8, 1.0, and 1.2
Reynolds number of LPG-air mixture, Re	4,000

2.2 Experimental apparatus

Fig. 2 illustrates the schematic diagram of an experimental apparatus for this study. The experimental setup was composed of two main parts, viz., flame jet generation part and impingement plate cooling part.

For the flame jet generation part, LPG gas was supplied from the LPG storage tank. The compressor pump generated the airflow. LPG and air were then passed the pressure regulators with humidity filters and pass through the calibrated rotameters with flow control valves to the mixing chamber. The mixing chamber was installed with some metal balls about $\frac{3}{4}$ of the mixing chamber. The diameter of the metal ball was 3 mm. This metal balls helped for mixing between LPG and air and also prevent flashback of flame. The pressure of the gas mixture before entering the swirl chamber was about 250 Pa.

For impingement plate cooling part, the impingement plate was cooling by circulating the cooling water. Moreover, the heat transfer rate from the impinging flame jet was evaluated from the amount of heat to water. The water from a cooling tank was circulated by a 1 hp of water pump passed a flow control valve to the rotameter to control the flow rate. Then, it was passed to the temperature control chamber contained with 1300W heaters to control the water temperature by using a temperature controller and power controller. A thermocouples type K was monitored at the chamber outlet. The temperature was controlled at 40°C to avoid condensation on the flame impingement surface. After that, the water flowed into the impingement plate. Fig. 3 shows the detail of the impingement plate with the cylindrical water chamber. The cylindrical water chamber was made of stainless steel of 150 mm in diameter and 25 mm in height. The cylindrical water chamber was fixed by the high-temperature cement insulator of square shape of 20 mm x 20 mm and a thickness of 25 mm. For measurement, the flame jet impinged on the surface of cylindrical water chamber. The water inlet and water outlet were on the rear side of the cylindrical water chamber. The rear side was also insulated to protect the heat loss from the water chamber. Furthermore, the digital data logger (midi LOGGER GL840) was used to measure the temperature of water inlet and outlet from the water chamber.

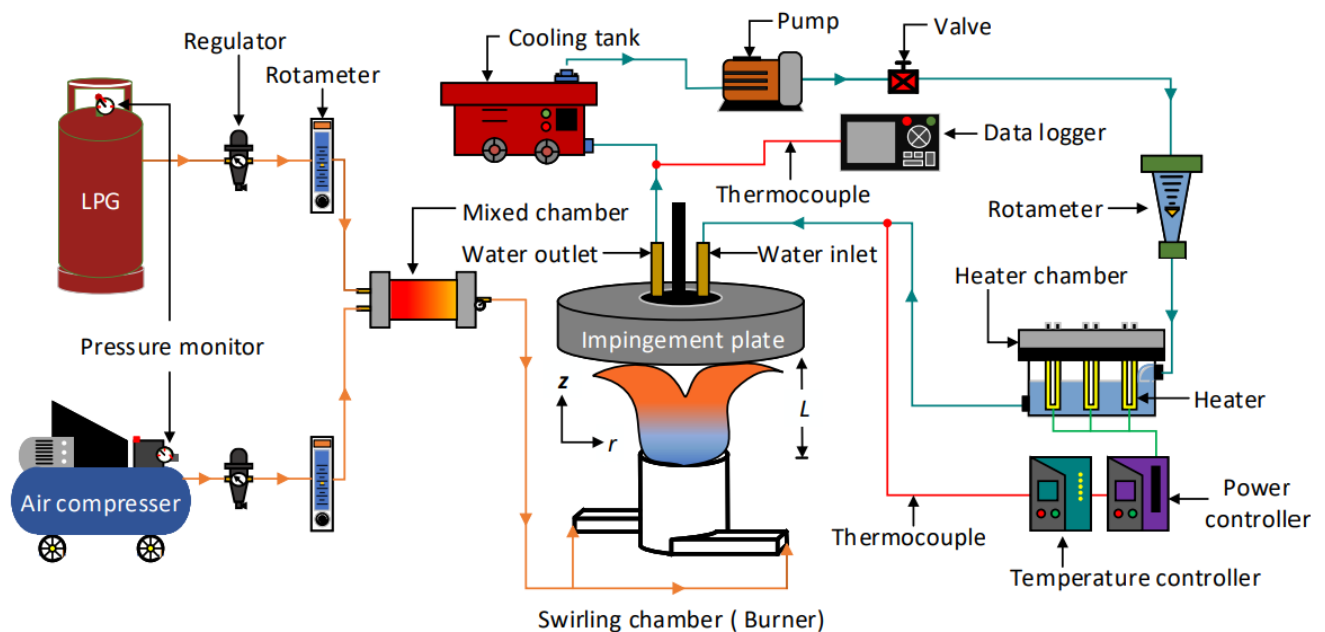


Fig. 2. Schematic diagram of the experiment setup

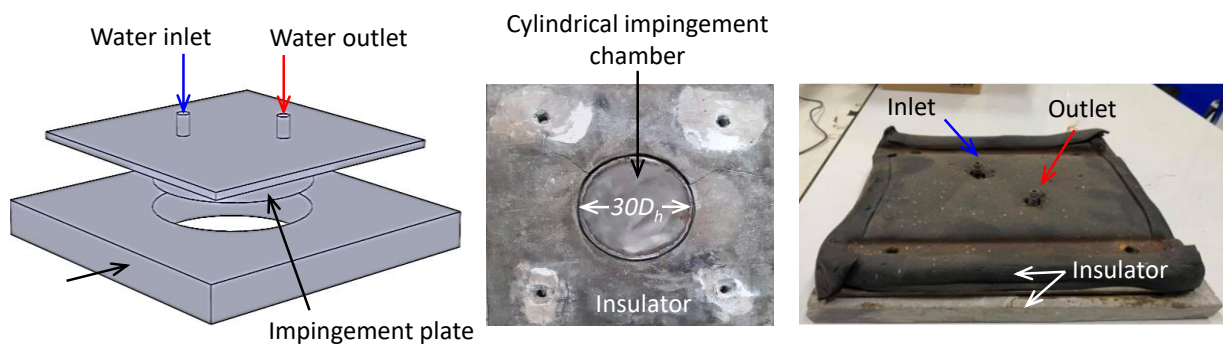


Fig. 3. Detail of impingement plate consisting of cylindrical water chamber equipped in the middle of insulator plate.

2.3 Flame structure and average heat flux measurements

To investigate the structure of swirling flame jet, the free flame jet and impinging flame jet were captured with a digital camera. Moreover, the temperature (T_f) of the free swirling flame jet was measured by a type-B thermocouple (70% Pt 30% Rh and 94% Pt 6% Rh), which placed in the flame controlled position with X-Y transverse system. For accuracy measurements, the bead thermocouple was considered the convective and radiative heat losses to surrounding evaluated with a heat balance correlation of the bead, which suggested by Krishnan et al. [21]. The temperature measurement positions of the swirling flame jet structure in this work were evaluated in the range of $2 < Z/D_h < 10$ and $-2 < r/D_h < 2$, as shown in Fig. 4.

For average heat transfer measurement, the water temperature both inlet and outlet from the cylindrical impingement chamber was monitored by a data logger. When the temperature reached a steady-state, the water temperature was started recorded for about 5 min (about 300 data) and then averaged for water temperature at inlet and outlet.

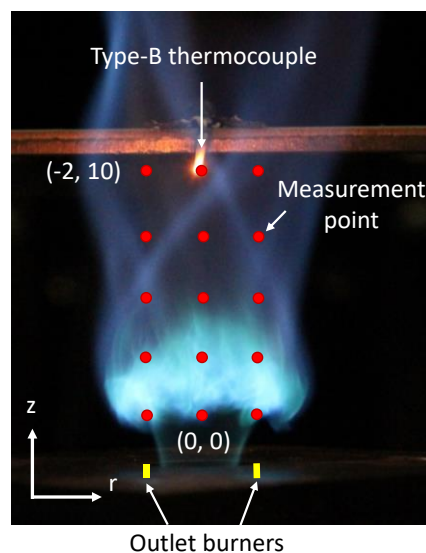


Fig. 4. Temperature measurement positions in swirling flame jet.

3. Data reduction

All experimental tests of the premixed flame jet from a swirling chamber were carried out at fixed Reynolds number (Re) of 4,000 based on the mean mixture velocity (V_m) before entering the swirling chamber and the hydraulic diameter (D_h) of the inlet.

$$Re = \frac{\rho_m V_m D_h}{\mu_m} \quad (1)$$

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_j X_j \sqrt{M_j}}{\sum X_j \sqrt{M_j}} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum y_i \rho_i \quad (3)$$

where ρ_m is the density of mixture gas between LPG and air, μ_m is the viscosity of mixture gas, X_j and M_j are respective the mole fraction and the molar mass of component j.

The evaluation of the equivalence ratio (ϕ) is as follow:

$$\phi = \frac{\text{actual fuel / air ratio}}{\text{stoichiometric fuel / air ratio}} \quad (4)$$

The average heat flux from a swirling flame jet can calculate from Eq. (5).

$$\dot{q} = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A} \quad (5)$$

where \dot{m} is the mass flow rate of water, c_p is the specific heat of water, ΔT is the different water temperature between inlet and outlet, and A is the heat transfer area.

The experimental uncertainties were evaluated according to the method described by Moffat [22]. The maximum uncertainty of the Reynolds number and the equivalence ratio was about 4.3% - 4.8%. The temperature recorded with a type-B thermocouple was less than 2%, and heat flux was less than 5%.

4. Results and discussion

4.1 Flame structure

4.1.1 Flame visualization of the free swirling flame jet

Fig. 5 shows a snapshot photograph of the free swirling flame jet for case of $H = 4.6D_h$, $\phi = 1.0$, and $Re=4,000$. The swirling flame jet structure consisted of three main zones, viz., neck zone, reaction zone and post-combustion flame zone. The neck zone is the region next to the burner exit which the diameter of flame are equal to the chamber diameter. The reaction zone appears next to the neck zone, which chemical reaction of combustion occurs significantly due to intense mixing. And the post-combustion flame zone is the region outside the reaction zone, which the flame jet separated to forming two plumes. The total length of these zones is defined as the flame length (L_f).

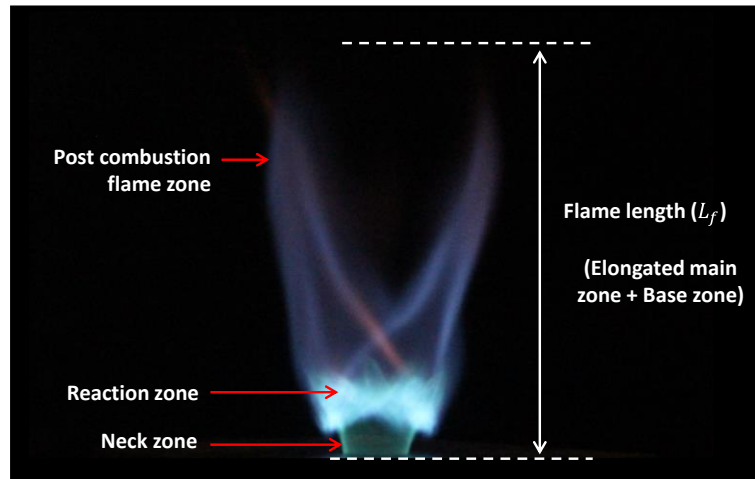


Fig. 5. Snapshot photograph of a free swirling flame jet for case of $H = 4.6D_h$, $\phi = 1.0$, and $Re=4,000$.

Fig. 6 demonstrates some snapshot photographs for the free swirling flame jet. The effect of swirling chamber height and equivalence ratio was shown with varied at $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$, $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$. It is observed that the chamber height provide the effect on the spreading of flame structure and the equivalence ratio show effect on the size and position of the reaction zone in flame structure.

The post-combustion flame zone covers a more extensive and more extended region when the equivalence ratio (ϕ) increases. In case of chamber height $H = 2.2D_h$, the post combustion zone of flame is the shortest when compared with other cases. Whereas, free swirling flame jet gain the longest length when the chamber height H increases because the swirling flow in the chamber was confined and the strength of tangential velocity decreases when compared to the jet axial velocity. The two jets from the double inlets separated clearly and formed two plumes of post-combustion flame zone. The separation between the two jets appears the largest for chamber height $H = 4.6D_h$, especially at $\phi = 1.2$. In contrast, the separation becomes narrower at $H = 4.6D_h$ and $\phi = 0.8$. The reaction zone for case of $H = 4.6D_h$ gains the larger area than case of $H = 2.2D_h$ and $7.0D_h$, specifically at $\phi = 1.0$ and 1.2 . Additionally, the results show that the orange flame region will appear in post-combustion zone when increasing the ϕ .

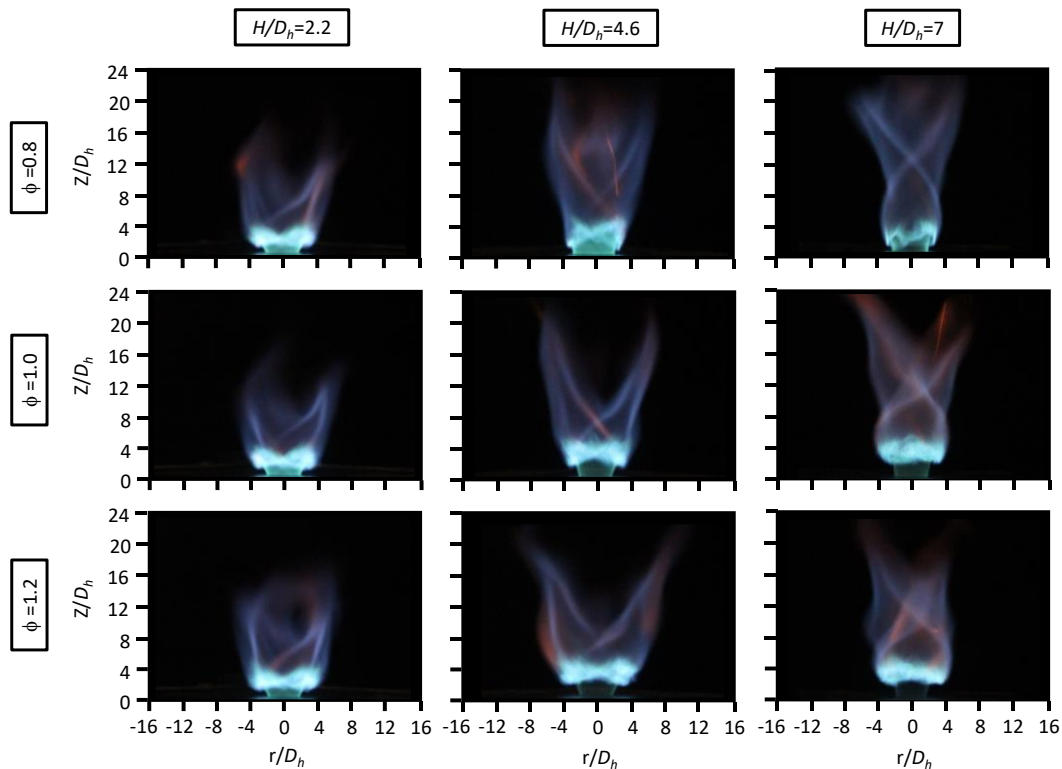


Fig. 6. Comparison of free swirling flame jet structure at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8, 1.0, \text{ and } 1.2$ under $Re=4,000$.

4.1.2 Temperature distributions of free swirling flame jet

Fig. 7 shows the radial temperature distributions in the free swirling jet at a different distance from the chamber exit $Z = 2D_h, 4D_h, 6D_h, 8D_h$, and $10D_h$ for different chamber heights $H = 2.2D_h, 4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8, 1.0$, and 1.2 under $Re=4,000$. It should be noted that the flame temperature is less than the adiabatic flame temperature due to the heat losses to surrounding and air entrainment [23].

The results show that the variation on equivalence ratio from stoichiometric condition to rich or lean mixture condition results in a decrease in the flame temperature. For fuel-lean ($\phi = 0.8$), the flame temperature gives the lowest for all of the chamber height. While, the flame temperature appears at stoichiometric mixture condition ($\phi = 1.0$), especially at $Z = 6D_h$ for case of chamber height at $H = 4.6D_h$. For fuel-rich ($\phi = 1.2$), the flame temperature gains the highest for all the height of swirl chamber because the swirling flame jet mixed with the surrounding air and the mixing become stoichiometric as going far from the exit.

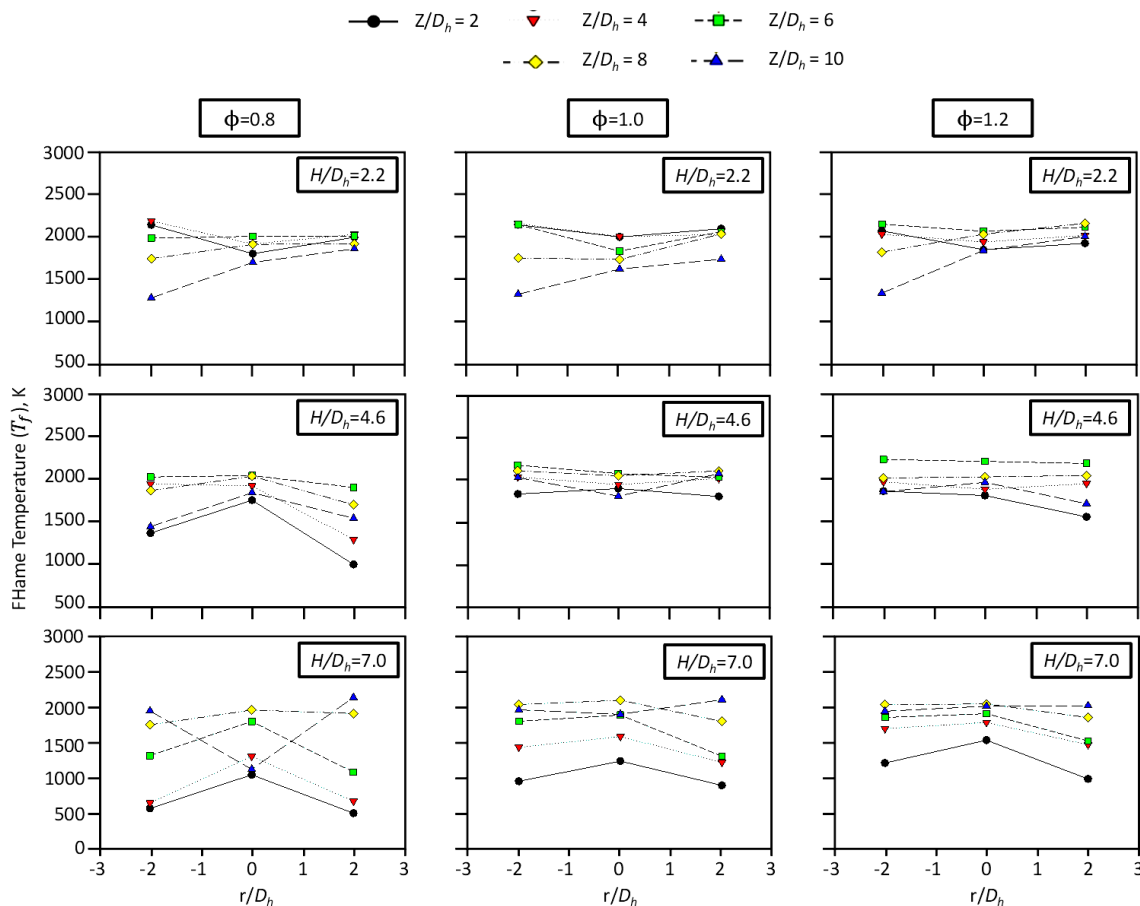


Fig. 7. Comparison of radial temperature distributions in free swirling jet at position $Z = 2D_h, 4D_h, 6D_h, 8D_h,$ and $10D_h$ for different chamber heights $H = 2.2D_h, 4.6D_h,$ and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8, 1.0,$ and 1.2 under $Re=4,000$.

4.1.3 Flame visualization of impinging swirling flame jet

To understand the effect of impingement distance on swirling flame jet impingement structure, Fig. 8-11 shows the snapshot photograph of impinging flame jet structure for case $L = 4D_h, 6D_h, 8D_h,$ and $10D_h,$ respectively. Each figure compare the flame structure at different chamber heights $H = 2.2D_h, 4.6D_h,$ and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8, 1.0,$ and 1.2 under $Re=4,000$.

For case of $L = 4D_h,$ the swirling flame jet at chamber height $H = 2.2D_h$ spreads on the impingement surface better than case of $H = 4.6D_h$ and $7.0D_h.$ However, it is found that the reaction zone for case of $H = 4.6D_h$ will attach on the impingement surface when the ϕ increases. Besides, the results show that the impinging flame jet at $H = 7.0D_h$ and $\phi=0.8$ (fuel-lean) spreads over the region between the impingement plate and chamber exit due to the smallest impingement distance and the richest of LPG fuel. This leads to the complex flame structure above the impingement surface.

For case of $L = 6D_h,$ it is found that the post-combustion zone of flame jet impinges obliquely on the impingement surface. There is no flame impingement on the center region of the surface for case of $H = 2.2D_h$ and $4.6D_h.$ This is due to the separated flame jet in the post-combustion zone as found in the free swirling jet. For case of $H = 7.0D_h,$ the impinging flame jet covers an overall area on the surface. When increase the equivalence ratio, the size of the reaction zone in flame structure increase

and move more near the surface as increase the chamber height. The flame color on the impingement surface become the red-blue color for case of $\phi=1.2$.

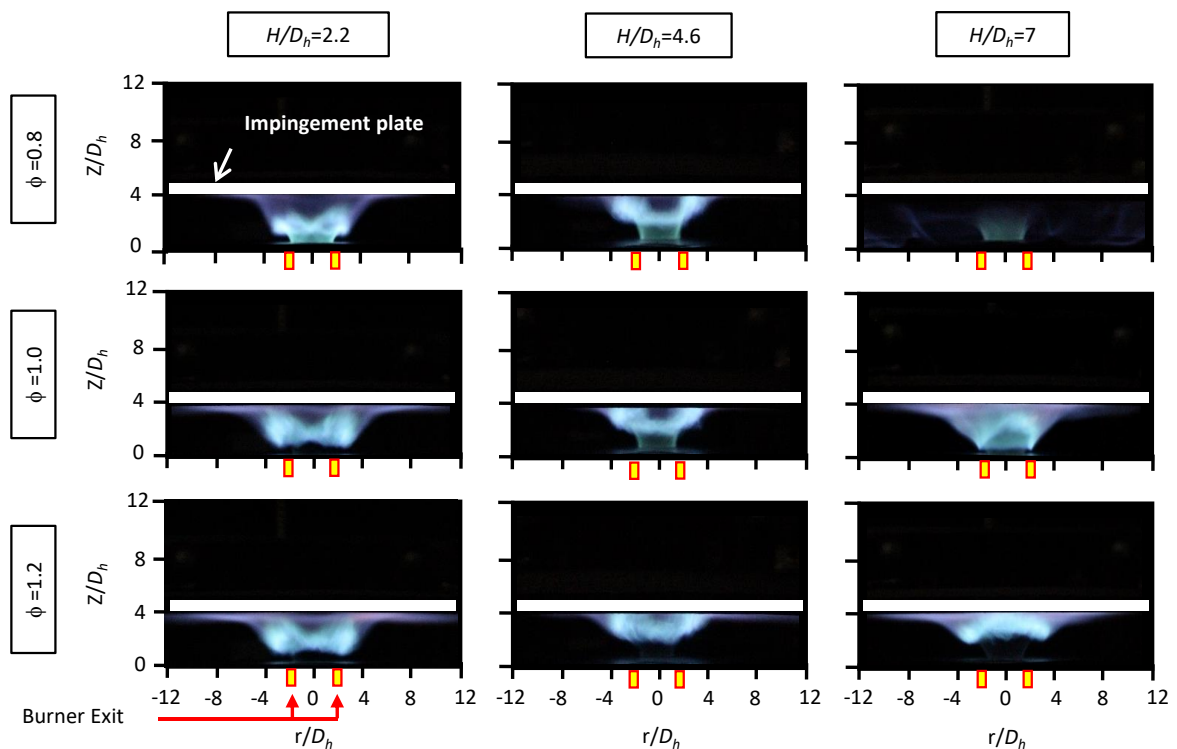


Fig. 8. Comparison of impinging flame jet structure for case $L = 4D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$.

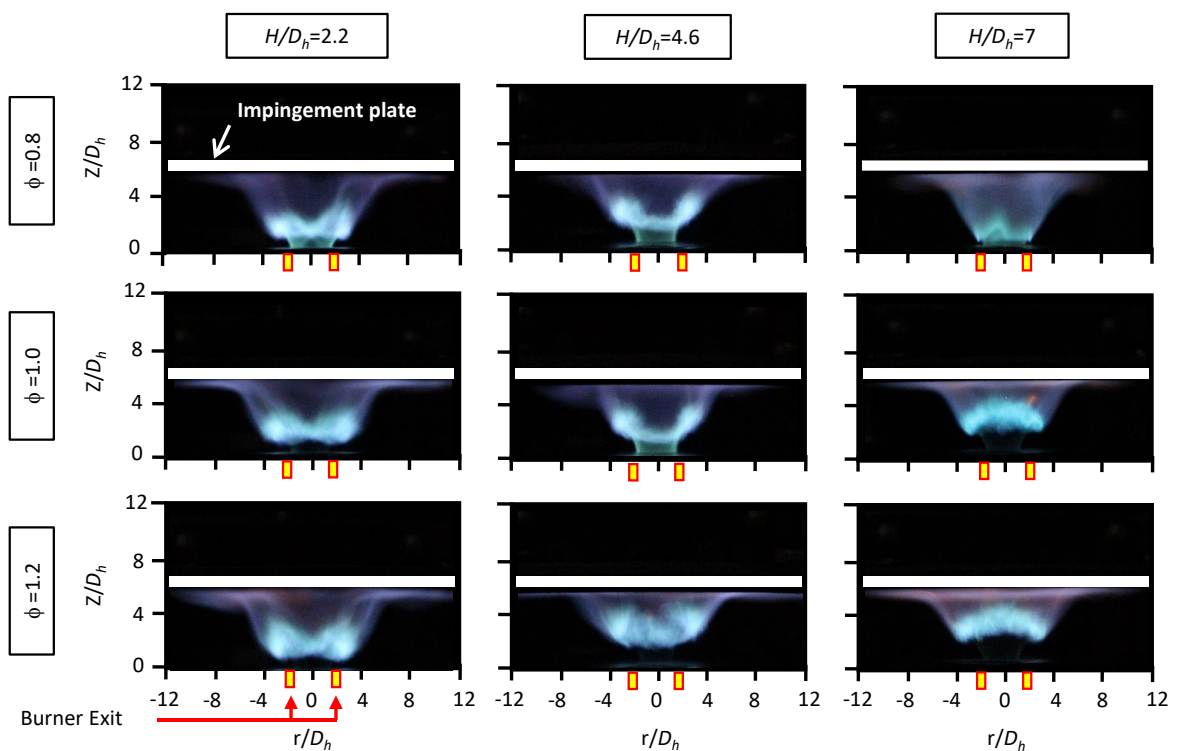


Fig. 9. Comparison of impinging flame jet structure for case $L = 6D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$.

For case of $L = 8D_h$, the swirling flame jet in the post-combustion flame zone clearly separated and impinged on the impingement surface. The separation of the two post-combustion zones in flame jet become larger when compared to case of $L = 6D_h$. This phenomenon was the same for case of $L = 10D_h$. As increasing the impingement distance, the reaction zone of combustion in all flame structure is farther from the impingement surface. The surface was impinged by the post-combustion zone of the flame jet. Furthermore, it should be noted that the post-combustion zone appears orange in the color of the flame tip because the combustion was incompletely. Whereas, some swirling flame jet in the post-combustion zone shows blue color because the surrounding air is more induced into swirling flame when impinging distance increases. This leads to more completed combustion.

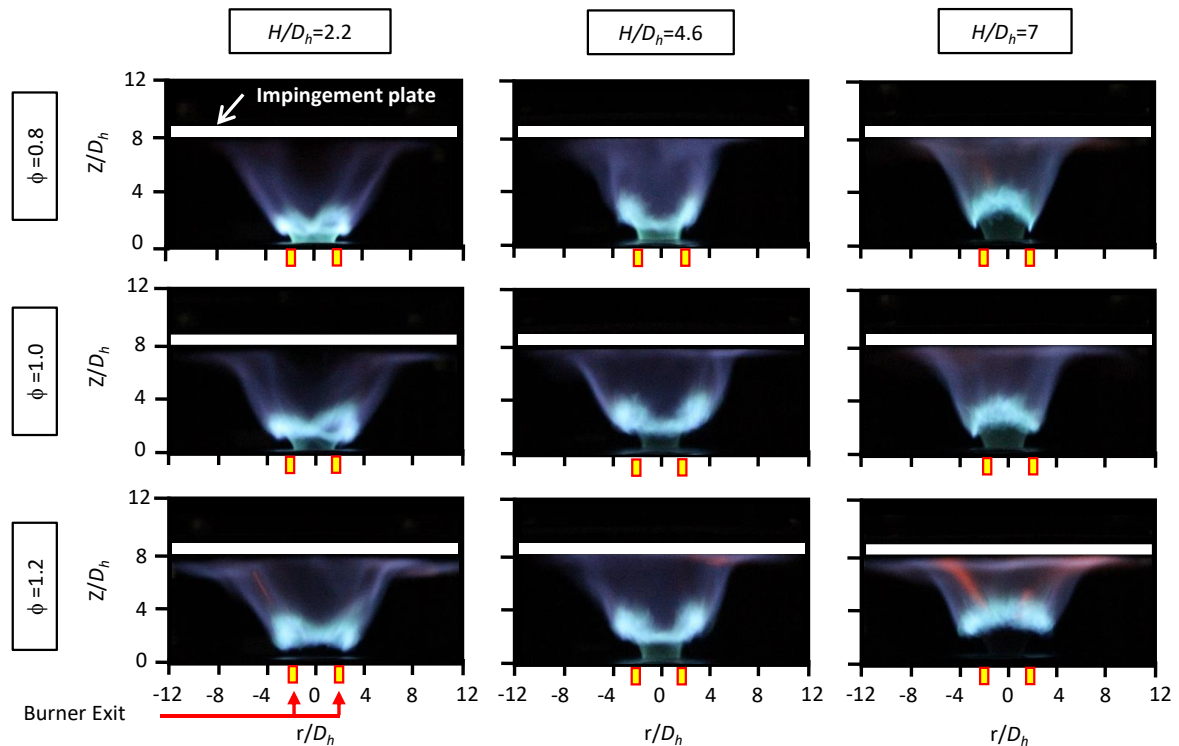


Fig. 10. Comparison of impinging flame jet structure for case $L = 8D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h, 4.6D_h,$ and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8, 1.0,$ and 1.2 under $Re=4,000$.

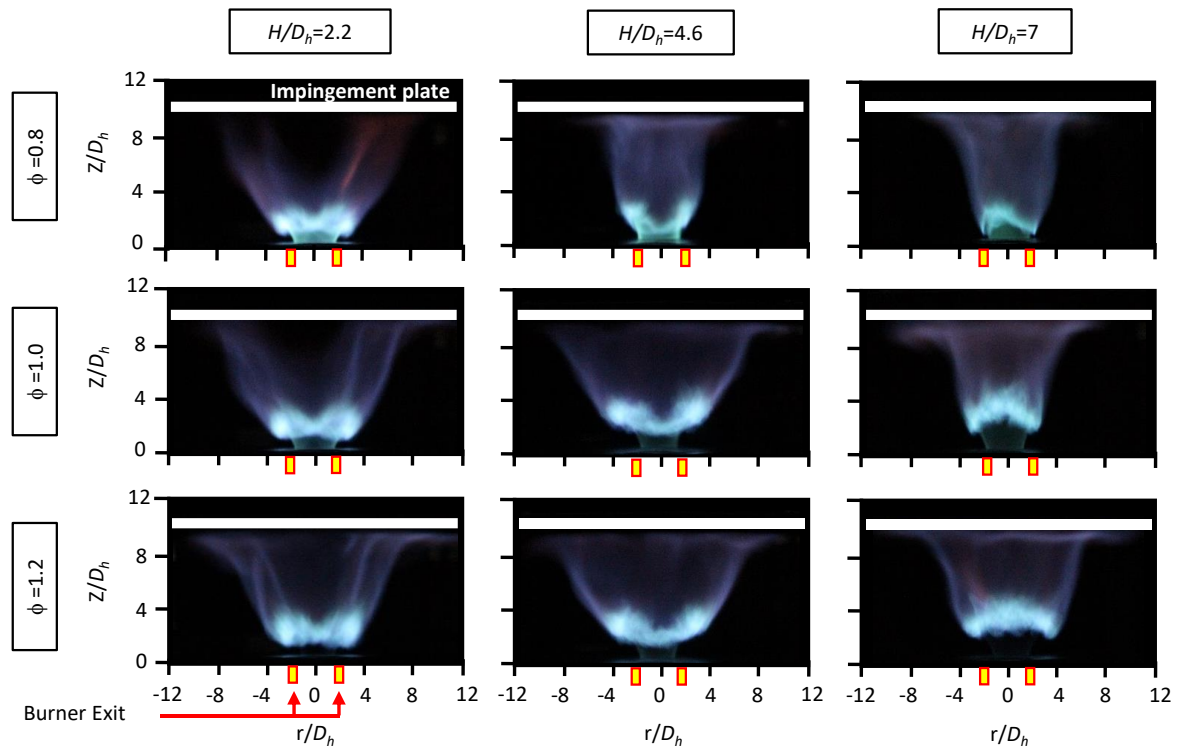


Fig. 11. Comparison of impinging flame jet structure for case $L = 10D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$.

4.2 Overall average heat flux

Fig. 12 shows the overall average heat flux for different impingement distance $L = 4D_h$, $6D_h$, $8D_h$, and $10D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$.

It is found that the average heat flux in case of $L = 4.6D_h$ provides the highest for all ϕ and chamber height H when compared with other impingement distances, especially at $L = 4D_h$ (up to about 10-15%) because the reaction zone directly exposed on the impingement surface that gives the highest flame temperature. Average heat flux values in case of $H = 2.2D_h$ give the lowest for $\phi=1.0$ and 1.2 . Whereas, the average heat flux at $\phi=0.8$, $L = 4D_h$ and $6D_h$ in case of $H = 7.0D_h$ offers the lowest heat flux as swirling flame structure was short and not attached on the impingement surface. This leads to the lowest heat flux. Moreover, the results show that the average heat flux for fuel-rich ($\phi=1.2$) produce the highest of above 5-10% for all values of impingement distance, except case of $L = 4D_h$ when compared to other ϕ cases. Because swirling flame jet in the post-combustion zone impinges directly and also gain the most uniform heat flux on the impingement surface.

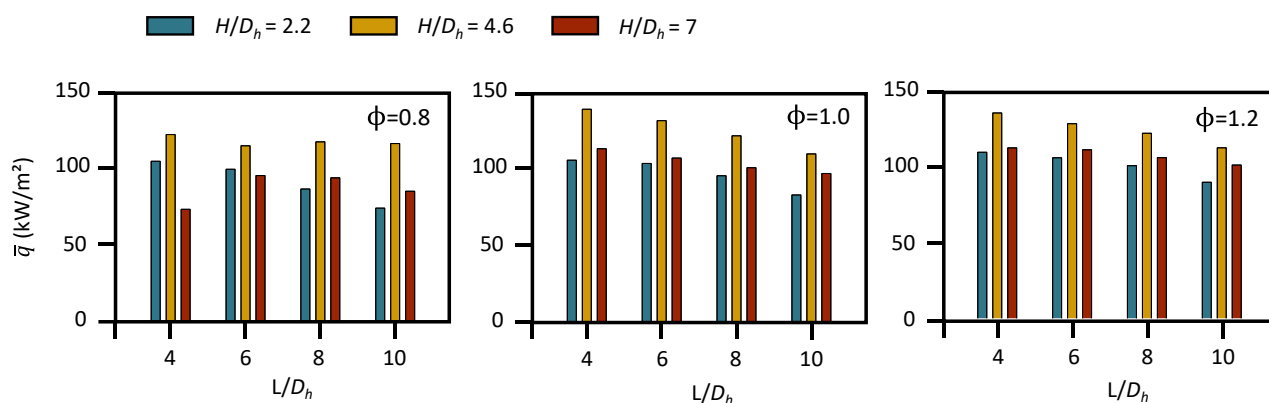


Fig. 12. Comparison of overall average heat flux for different impingement distance $L = 4D_h$, $6D_h$, $8D_h$ and $10D_h$ at different chamber heights $H = 2.2D_h$, $4.6D_h$, and $7.0D_h$ and $\phi = 0.8$, 1.0 , and 1.2 under $Re=4,000$.

5. Conclusions

The main objective of this research was to study the heat transfer characteristics for the premixed flame jet from a swirl chamber. The effect of chamber height on fame structure and heat transfer characteristics were investigated. The effect of equivalence ratios (ϕ) was also studied at 0.8, 1.0, and 1.2 for $Re = 4,000$. All experimental results can be concluded as follows:

1. The flame structure of both free and impinging flame has been changed significantly, which depends on the chamber height and the impingement distance. Whereas, the reaction zone in the flame structure is the main factor of heat transfer enhancement of impinging jet.

2. The swirling flame in the reaction zone gives the highest temperature when compared to the other flame zone. Furthermore, the flame temperature at the fuel-lean mixture ($\phi=0.8$) becomes the lowest while the maximum temperature occurs at the fuel-rich mixture ($\phi=1.2$) because the swirling flame can induce the ambient air entrainment due to the completed combustion.

3. The overall average heat flux depends on the chamber height and the impingement distance. The effect of swirling flame can increase the average heat flux on the impingement surface by 10–15% for case of equivalence ratio $\phi=1.0$, swirling height $H = 4.6D_h$ and impingement distance $L = 4D_h$.

Acknowledgment

This research was funded by a grant from the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand and by Energy Technology Research Center (ETRC), Prince of Songkla University.

References

- [1] Livingood, J.N.B., and Hrycak, P. "Impingement heat transfer from turbulent air stream jets to flat plates-A literature survey." *NASA TM X-2778*, (1973): 1–63.
- [2] Martin, H. "Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces." *Advances in Heat Transfer* 13, (1977): 1–60.
- [3] Downs, S.J. and James, E.H., "Jet impingement heat transfer - A literature survey." *ASME, AIChE, and ANS, National Heat Transfer Conference and Exhibition*, 24th, Pittsburgh, PA, Aug. 9-12, (1987): 11
- [4] Viskanta, R., "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets." *Experimental Thermal and Fluid Science* 6, no. 2, (1993): 111–134.
- [5] Sarkar, A., Nitin, N., Karwe, M.V., and Singh, R.P., "Fluid flow and heat transfer in air jet impingement in food processing." *Journal of Food Science* 69, no. 4, (2004): 113–122.

- [6] Kaewchoothong, N., Wae-Hayee, M., Vessakosol, P., Niyomwas, B. and Nuntadusit, C., "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle with Air Entrainment Holes." *Advanced Materials Research* 931–932, (2014): 1213–1217.
- [7] Nuntadusit, C., Wae-hayee, M. and Kaewchoothong, N., "Heat transfer enhancement on a surface of impinging jet by increasing entrainment using air-augmented duct." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127, (2018): 751–767.
- [8] Wae-hayee, M., Yeranee, K., Suksuwan, W., Alimalbari, A., Sae-ung, S., and Nuntadusit, C., "Heat transfer enhancement in rotary drum dryer by incorporating jet impingement to accelerate drying rate." *Drying Technology* 0, no. 0, (2020): 1–11.
- [9] Viskanta, R., "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets." *Experimental Thermal and Fluid Science* 6, no. 2, (1993): 111–134.
- [10] Viskanta, R., "Convective and radiative flame jet impingement heat transfer." *The Ninth International Symposium on Transport Phenomena in Thermal-Fluids Engineering*, (1996): 46–60.
- [11] Tuttle, S.G., Webb, B.W., and McQuay, M.Q., "Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part I: Time-averaged results." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, no. 7, (2005): 1236–1251.
- [12] Tuttle, S.G. Webb, B.W., and McQuay, M.Q., "Convective heat transfer from a partially premixed impinging flame jet. Part II: Time-resolved results." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, no. 7 (2005): 1252–1266.
- [13] Huang, X.Q., Leung, C.W., Chan, C.K., and Probert, S.D., "Thermal characteristics of a premixed impinging circular laminar-flame jet with induced swirl." *Applied Energy* 83, no.4, (2006): 401–411.
- [14] Zhao, Z., Yuen, D.W., Leung, C.W., and Wong, T.T., "Thermal performance of a premixed impinging circular flame jet array with induced-swirl." *Applied Thermal Engineering* 29, no. 1, (2009): 159–166.
- [15] Zhen, H.S., Leung, C.W., and Cheung, C.S., "Emission of impinging swirling and non-swirling inverse diffusion flames." *Applied Energy* 88, no. 5, (2011): 1629–1634.
- [16] Singh, G., Chander, S., and Ray, A., "Heat transfer characteristics of natural gas/air swirling flame impinging on a flat surface." *Experimental Thermal and Fluid Science* 41, (2012): 165–176.
- [17] Hindasageri, V., Vedula, R.P., and Prabhu, S.V., "Heat transfer distribution of swirling flame jet impinging on a flat plate using twisted tapes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91, (2015): 1128–1139.
- [18] Kotb, A., and Saad, H., "A comparison of the thermal and emission characteristics of co and counter swirl inverse diffusion flames." *International Journal of Thermal Sciences* 109, (2016): 362–373.
- [19] Kuntikana, P., and Prabhu, S.V., "Impinging premixed methane-air flame jet of tube burner: thermal performance analysis for varied equivalence ratios." *Heat Mass Transfer* 55, no. 5, (2019): 1301–1315.
- [20] Boushaki, T., Merlo, N., de Persis, S., Chauveau, C., and Gökalp, I., "Experimental investigation of CH₄-air-O₂ turbulent swirling flames by Stereo-PIV." *Experimental Thermal and Fluid Science* 106, (2019): 87–99.
- [21] Krishnan, S., Benjamin, M., Wendong, W.J.U., and Nehorai, A., "An approach to thermocouple measurements that reduces uncertainties in high-temperature environments." *Energy & Fuels* 29, (2015): 3446-3455.
- [22] Moffat, R.J., "Describing the uncertainties in experimental results." *Experimental Thermal and Fluid Science* 1, no.1 (1988): 3–17.
- [23] Law, C.K., Makino, A., and Lu, T.F., "On the off-stoichiometric peaking of adiabatic flame temperature." *Combustion and Flame* 145, no. 4, (2006): 808–819.