



**การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้าง  
จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์**

**Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Hot Air Jet Generated  
by Pulse Combustor**

**ปฐมพร นระระโต**

**Pathomporn Narato**

**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**

**2557**

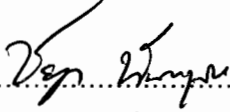
**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อน  
ที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

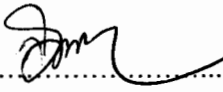
ผู้เขียน นายปฐมพร นระโต

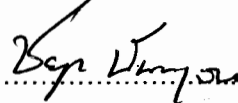
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

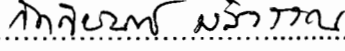
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดูลิต)

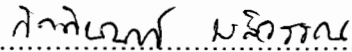
คณะกรรมการสอบ

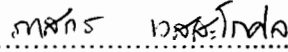
  
..... ประธานกรรมการ  
(ดร.จูนันดรศักดิ์ เทพญา)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดูลิต)

  
..... กรรมการ  
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

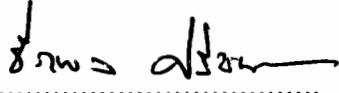
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

  
.....  
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข)


บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล


  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

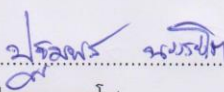
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความ  
ขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ

ลงชื่อ..........  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทกุลสิต)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ..........  
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ..........  
(นายปฐมพร นระโต)  
นักศึกษา

|                 |  |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ |
| ผู้เขียน        | นายปฐมพร ณะระโต  |
| สาขาวิชา        | วิศวกรรมเครื่องกล  |
| ปีการศึกษา      | 2557   |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศร้อนพุ่งชนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz ในงานวิจัยได้พิจารณาผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่งที่มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, และ 8D โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งมีค่าเท่ากับ 47 mm และปรับความยาวของท่อส่งที่ 16D, 19D, 22D, และ 25D สำหรับลักษณะการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้มี 4 รูปแบบคือ (1) แบบท่อเดี่ยว, (2) แบบสองท่อห่างกัน  $180^\circ$ , (3) แบบสองท่อห่างกัน  $90^\circ$ , และ (4) แบบสามท่อห่างกัน  $90^\circ$  สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG กำหนดให้คงที่ที่ 29.8 ลิตรต่อนาที ในการทดลองได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ทอิสระตามแนวศูนย์กลางท่อส่งโดยใช้ Pitot Tube และ เทอร์โมคัปเปิ้ล ตามลำดับ และวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน นอกจากนี้ได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้โดยใช้ Pressure Transducer สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลและปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ใช้วิธีการจำลองการไหลแบบไม่คงตัว 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS (CFX 13.0)

จากผลการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่า ภายในห้องเผาไหม้เกิดการระเบิดเป็นจังหวะตามความถี่ Helmholtz โดยที่บริเวณปากทางเข้าของท่อสู่อากาศและปากทางออกท่อส่งมีการสู่อากาศและคายแก๊สร้อนเป็นจังหวะสอดคล้องกับพฤติกรรมการระเบิดภายในห้องเผาไหม้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้และความเร็วที่ปากทางออกท่อส่งสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อความถี่ของความดันภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองการไหลเทียบกับการทดลอง พบว่ามีผลต่างสูงสุดไม่เกิน 10% เมื่อพิจารณาผลของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจากการจำลองการไหล (ความยาวท่อส่งคงที่ที่ 16D) พบว่ายังคงมีความสอดคล้องกับการทดลองคือ จำนวนท่อทางเข้าอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความเร็วที่ปากทางออกท่อส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอากาศภายนอกสามารถไหลเข้าห้องเผาไหม้ได้มาก มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น



จากผลการทดลองโดยภาพรวมพบว่า ความเร็วเจ็ท อุณหภูมิเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากปากทางออกท่อเจ็ท โดยเฉพาะอุณหภูมิเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะห่างออกจากปากทางออกท่อส่งที่อยู่ในช่วง 1D จนถึง 3D สำหรับที่ระยะห่างออกจากปากทางออกท่อส่งที่อยู่ในช่วง >3D การเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองค่อยๆลดลงเกือบคงที่ สำหรับผลของความยาวท่อส่งและรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลของอากาศที่เข้าผสมภายในห้องเผาไหม้ที่จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่เงื่อนไขท่อทางเข้าอากาศแบบสองท่อห่างกัน  $90^\circ$  ความยาวของท่อส่ง 16D และระยะจากปากทางออกท่อส่งถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ 1D ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่อุณหภูมิเจ็ทมีค่าสูง อย่างไรก็ตามที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแบบสองท่อห่างกัน  $180^\circ$  มีผลทำให้ความเร็วเจ็ทมีค่าสูง

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Thesis Title</b>  | Study of flow and Heat transfer characteristics of Hot Air Jet<br>Generated by Pulse Combustor |
| <b>Author</b>        | Mr. Pathomporn Narato  |
| <b>Major Program</b> | Mechanical Engineering   |
| <b>Academic Year</b> | 2014   |

### ABSTRACT

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics on a surface of hot air impinging jet generated by Helmholtz pulse combustor. The research was considered the effects of inlet tube geometry and tailpipe length to gain the condition of high heat transfer rate on impingement surface. The experimental parameters consisted of distance from tailpipe exit to impinged surface at 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, and 8D where D was an inner diameter of tailpipe being 47 mm. The length of tailpipe was varied at 16D, 19D, 22D, and 25D. The 4 types of inlet tube geometry were (1) single inlet, (2) double inlets with  $90^\circ$  apart, (3) double inlets with  $180^\circ$  apart and (4) triple inlets with  $90^\circ$  apart. The supplied rate of LPG fuel was fixed at 29.8 l/min. In the experiment, the velocity and temperature oscillations of free jet along streamwise at center of tailpipe were measured by using a pitot-tube and a thermocouple, respectively, and the heat transfer rate on an impingement surface was measured by using a heat flux sensor. In addition, the pressure oscillation inside the combustor was measured by using pressure transducer. Flow characteristics and combustion phenomenon in pulse combustor were studied by using flow simulation with 3-D unsteady flow via computational fluids dynamics software, ANSYS (CFX 13.0).

The results from flow simulation were found that the internal ignition in combustor oscillated corresponding to Helmholtz resonance. At the inlet of intake tube and outlet of tailpipe, the entering and releasing of intake air and exhaust gas oscillated corresponding to behavior of ignition oscillation inside combustor. The variations of internal pressure inside combustor and velocity at tailpipe outlet correspond to the results from experiment. When frequency of internal pressure inside combustor between flow simulation and experiment were compared, it was found that maximum discrepancy did not exceed 10%. When the effects of inlet tube geometry were considered (at fixed tailpipe length at 6D), it was found that the results still correspond to the experiment.

The number of inlet tube increases results on increasing of velocity at tailpipe outlet. This is effect from ambient air was more intake into combustor, which contribute to complete combustion.

In general, the results show that jet velocity, jet temperature and heat transfer on impingement surface decreased according to increasing of distance from tailpipe outlet. Especially distance from tailpipe outlet in the rage of 1D to 3D, the jet temperature and heat transfer on impingement surface decreased rapidly, and for the distance from tailpipe outlet in the rage of >3D, they decreased gradually and rather consistent. The effects of tailpipe length and inlet tube geometry influence directly on flow rate of intake air entering and mixing in combustor to be complete combustion. At the condition of double inlets with  $90^\circ$  apart, the length of tailpipe at 16D and distance from tailpipe exit to impinged surface at 1D, the heat transfer on the impingement surface was the highest corresponding to the condition having the high temperature of jet. However, at the same condition, the double inlets with  $180^\circ$  causes on getting the high velocity of jet.

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัย และเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.ฐานันต์ศักดิ์ เทพญา ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล และรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาค ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ปฐมพร นระระโต

## สารบัญ

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| บทคัดย่อ (THAI)   | (5)       |
| บทคัดย่อ (ENGLISH)  | (7)       |
| กิตติกรรมประกาศ   | (9)       |
| สารบัญ  | (10)      |
| รายการตาราง   | (13)      |
| รายการภาพประกอบ   | (14)      |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ   | (18)      |
| รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ   | (20)      |
| <br>  |           |
| <b>1. บทนำ</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 ระบบเผาไหม้แบบพัลส์   | 1         |
| 1.2 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz   | 2         |
| 1.3 การเพิ่มความสามารถของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว   | 5         |
| 1.4 ทบทวนเอกสารงานวิจัย   | 6         |
| <b>2. วัตถุประสงค์</b>  | <b>14</b> |
| <b>3. ขอบเขตการศึกษา</b>  | <b>14</b> |
| <b>4. ชุดทดลองและตัวแปร</b>   | <b>14</b> |
| 4.1 ลักษณะของปัญหาและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง   | 14        |
| 4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง  | 15        |
| 4.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง  | 16        |
| <b>5. วิธีการทดลอง</b>  | <b>18</b> |
| 5.1 การศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ปากทางออกของท่อส่ง | 18        |
| 5.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน   | 20        |
| 5.3 การศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่งและในห้องเผาไหม้   | 21        |
| 5.4 ศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล(ANSYS Ver.13)                | 22        |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| 5.4.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหล  | 22        |
| 5.4.2 แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน  | 24        |
| 5.4.3 แบบจำลองการเผาไหม้และแผ่รังสี  | 27        |
| 5.4.4 การสร้างแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์  | 28        |
| <b>6. ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>   | <b>37</b> |
| 6.1 ผลการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบพัลส์ในห้องเผาไหม้ด้วย<br>กระบวนการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Version 13.0, CFX          | 37        |
| 6.1.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งกรณีของท่อ<br>ทางเข้าอากาศเดี่ยวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ    | 37        |
| 6.1.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวซึ่งมี<br>ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ                          | 38        |
| 6.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่<br>ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ                             | 39        |
| 6.1.4 ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจาก<br>การจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms                   | 45        |
| 6.1.5 ผลของความเร็ว (u) ที่เกิดขึ้นในท่อส่งและปลายปากทางออกของท่อ<br>ส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms             | 51        |
| 6.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจาก<br>ปากทางออกต่างๆ  | 52        |
| 6.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปาก<br>ทางออกต่างๆ โดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง | 52        |
| 6.2.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปาก<br>ทางออกต่างๆ โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ | 54        |
| 6.2.3 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปาก<br>ทางออกต่างๆ โดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง | 56        |
| 6.2.4 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปาก<br>ทางออกต่างๆ โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ | 59        |
| 6.3 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง  | 61        |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า       |
|--|------------|
| 6.3.1 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วย<br>การคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง          | 61         |
| 6.3.2 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วย<br>การคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ          | 63         |
| 6.4 ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่ง  | 65         |
| 6.4.1 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันใน<br>ห้องเผาไหม้   | 65         |
| 6.4.2 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันใน<br>ท่อส่ง  | 69         |
| 6.4.3 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลง<br>ความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ                  | 72         |
| 6.4.4 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลง<br>ความดันในท่อส่งใกล้ปากทางออก (ใกล้ทางออก 4D) ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ | 74         |
| 6.4.5 เปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันใน<br>ห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง          | 77         |
| 6.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลจากพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์<br>กับผลการทดลอง   | 79         |
| 6.5.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลอง<br>พฤติกรรมการเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง                                    | 79         |
| 6.5.2 ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากผลการจำลอง<br>พฤติกรรมการเผาไหม้เทียบกับการทดลอง                                       | 81         |
| <b>7. สรุปผลการวิจัย</b>   | <b>83</b>  |
| <b>บรรณานุกรม</b>  | <b>85</b>  |
| <b>ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1</b>  | <b>87</b>  |
| <b>ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2</b>  | <b>94</b>  |
| <b>ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3</b>  | <b>103</b> |
| <b>ประวัติผู้เขียน</b>   | <b>109</b> |

รายการตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง | 17   |



### รายการภาพประกอบ

|           |  | หน้า |
|-----------|--|------|
| รูปที่ 1  | แสดงห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยระบบสร้างพัลส์ธรรมชาติ  | 2    |
| รูปที่ 2  | หลักการการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz  | 4    |
| รูปที่ 3  | แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้  | 5    |
| รูปที่ 4  | แสดงการเกิดขึ้นขอบเขตของการไหลแบบขนานกับผนัง   | 6    |
| รูปที่ 5  | แสดงการเกิดขึ้นขอบเขตของการไหลแบบใช้เจ็ทพุ่งชนหรือปะทะผนัง   | 6    |
| รูปที่ 6  | แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ  | 7    |
| รูปที่ 7  | แสดงการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ                  | 8    |
| รูปที่ 8  | ภาพถ่ายรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศทั้งสี่รูปแบบที่ใช้ทดลอง   | 15   |
| รูปที่ 9  | แสดงรูปแบบของห้องเผาไหม้และการติดตั้งรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศ  | 16   |
| รูปที่ 10 | แสดงรูปแบบของห้องเผาไหม้และการติดตั้งรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศ  | 16   |
| รูปที่ 11 | แสดงพิกัดที่ใช้ในการศึกษา  | 17   |
| รูปที่ 12 | แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์                           | 19   |
| รูปที่ 13 | ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์                               | 20   |
| รูปที่ 14 | แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งไปพร้อมๆกัน                               | 22   |
| รูปที่ 15 | แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว   | 29   |
| รูปที่ 16 | แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)                       | 30   |
| รูปที่ 17 | แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว  | 30   |
| รูปที่ 18 | แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $180^{\circ}$                                   | 31   |
| รูปที่ 19 | แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $180^{\circ}$ ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain) | 31   |
| รูปที่ 20 | แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $180^{\circ}$                              | 32   |

**รายการภาพประกอบ (ต่อ)**

|           |  | หน้า |
|-----------|--|------|
| รูปที่ 21 | แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $90^\circ$  | 32   |
| รูปที่ 22 | แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $90^\circ$ ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)  | 33   |
| รูปที่ 23 | แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน $90^\circ$   | 33   |
| รูปที่ 24 | แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสามท่อที่ห่างกัน $90^\circ$  | 34   |
| รูปที่ 25 | แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อที่ห่างกัน $90^\circ$ ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)   | 34   |
| รูปที่ 26 | แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อที่ห่างกัน $90^\circ$  | 35   |
| รูปที่ 27 | แสดงตำแหน่งตั้งผลจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์   | 37   |
| รูปที่ 28 | ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้   | 38   |
| รูปที่ 29 | ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ  | 39   |
| รูปที่ 30 | แสดงตำแหน่งและเวลาที่นำผลจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์มาใช้พิจารณา   | 40   |
| รูปที่ 31 | แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว                       | 41   |
| รูปที่ 32 | แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน $180^\circ$ | 42   |
| รูปที่ 33 | แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน $90^\circ$  | 43   |

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

|           | หน้า   |    |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 34 | แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า  | 44 |
| รูปที่ 35 | ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms                                       | 45 |
| รูปที่ 36 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms                            | 46 |
| รูปที่ 37 | แสดงผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และเวลาที่ใช้ในการดึงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์   | 46 |
| รูปที่ 38 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว                          | 47 |
| รูปที่ 39 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน $180^{\circ}$ | 48 |
| รูปที่ 40 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน $90^{\circ}$  | 49 |
| รูปที่ 41 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า                  | 50 |
| รูปที่ 42 | แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซโพรเพนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และปลายของท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms                       | 51 |
| รูปที่ 43 | แสดงผลของความเร็วในแนว X ในท่อส่งและที่ปลายปากทางออกของท่อส่ง  | 51 |
| รูปที่ 44 | แสดงผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ ด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง        | 54 |
| รูปที่ 45 | แสดงผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ        | 56 |

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

|           |   | หน้า |
|-----------|---|------|
| รูปที่ 46 | แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ ด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง | 58   |
| รูปที่ 47 | แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ | 60   |
| รูปที่ 48 | แสดงผลของวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง             | 63   |
| รูปที่ 49 | แสดงผลของการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ          | 65   |
| รูปที่ 50 | แสดงผลของความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป  | 68   |
| รูปที่ 51 | แสดงผลของความดันในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป                                      | 69   |
| รูปที่ 52 | แสดงผลของความดันในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป   | 71   |
| รูปที่ 53 | แสดงผลของความดันในท่อส่งในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป                              | 72   |
| รูปที่ 54 | ผลของความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่าง ๆ   | 74   |
| รูปที่ 55 | ผลของความถี่ย่อยของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่งที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่าง ๆ  | 77   |
| รูปที่ 56 | แสดงผลการเปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันในห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง        | 79   |
| รูปที่ 57 | แสดงผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง  | 81   |
| รูปที่ 58 | แสดงผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองเทียบกับผลการทดลอง  | 82   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์คำย่อ |   | หน่วย                    |
|----------------|---|--------------------------|
| $C_p$          | คือ ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่   | $\text{kJ/kgK}$          |
| $C_\mu$        | คือ ค่าตัวแปรไร้มิติในเทอมของความหนืดแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นค่าคงที่                  | -                        |
| $d$            | คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทางเข้า                                       | $\text{mm}$              |
| $D$            | คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่ง   | $\text{mm}$              |
| $E_T$          | คือ พลังงานรวม  | $\text{kJ/kg}$           |
| $E_{bV}$       | คือ The energy spectrum for radiation emitted by a blackbody                      | $\text{W/m}^2 \text{Hz}$ |
| $f_\mu$        | คือ Wall damping function   | -                        |
| $G_v$          | คือ The spectral incident radiation   | $\text{W/m}^2$           |
| $h$            | คือ static enthalpy   | $\text{kJ/kg}$           |
| $k$            | คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน  | $\text{m}^2/\text{s}^2$  |
| $K_{av}$       | คือ Absorption coefficient (สัมประสิทธิ์การดูดซับ)                                | -                        |
| $K_{sv}$       | คือ Scattering coefficient (สัมประสิทธิ์การกระจาย)                                | -                        |
| $l$            | คือ ขนาดความยาวของความปั่นป่วน  | $\text{mm}$              |
| $L$            | คือ ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงพื้นผิวฟุ้งชนที่ติดตั้งหัววัดการถ่ายเทความร้อนไว้ | -                        |
| $L$            | คือ ค่าบ่งชี้เชิงขนาดของช่องการไหล  | $\text{mm}$              |
| $P$            | คือ ความดันของของไหล  | $\text{Pa}$              |
| $S_E$          | คือ แหล่งจ่ายโมเมนตัมจากภายใน   | $\text{kgm/s}$           |
| $S_m$          | คือ แหล่งจ่ายโมเมนตัมจากภายนอก  | $\text{kgm/s}$           |
| $T_i$          | คือ ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity)                             | -                        |
| $X$            | คือ ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงหัววัดความเร็วและอุณหภูมิ                         | -                        |
| $\rho$         | คือ ความหนาแน่นของของไหล  | $\text{Kg/m}^3$          |
| $\nu$          | คือ ค่าความหนืดคิเนเมติก (Kinematic viscosity)                                    | $\text{m}^2/\text{s}$    |
| $\mathcal{U}$  | คือ Velocity fluctuations   | $\text{m/s}$             |
| $\nu_{ki}$     | คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ของสาร $i$ ในปฏิกิริยา $K$                          | -                        |
| $\lambda$      | คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน   | $\text{W/mK}$            |
| $\tau$         | คือ ความเค้นเฉือนของของไหล  | $\text{N/m}^2$           |
| $\mu$          | คือ ความหนืดเชิงจลน์ของของไหล   | $\text{Kg/ms}$           |
| $\mu_t$        | คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน   | $\text{Kg/ms}$           |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์คำย่อ |  | หน่วย     |
|----------------|--|-----------|
| $\varepsilon$  | คือ อัตราการสลายแบบป้อน                        | $m^2/s^3$ |
| $\delta$       | คือ ความหนาของชั้นขอบเขต                       | mm        |
| $\phi$         | คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของงานเนื่องจากแรงหนีต | -         |

## รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ

### ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ปฐมพร นระระโต, มั๊กตาร์ แวหะยี, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ชยุต นันทดุสิต 2556 ผลของรูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12, 14-15 มีนาคม 2556, โรงแรมอิมพีเรียลโกลเด้น ไทโรแองเกิ้ล รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย

ปฐมพร นระระโต, มั๊กตาร์ แวหะยี, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ชยุต นันทดุสิต 2556 คุณสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, พัทยา จังหวัดชลบุรี

### บทความวิชาการ (Journal paper)

Narato, P., Maliwan, K. and Nuntadusit, C., (2014), "Heat Transfer Enhancement of Impinging Jet from Pulse Jet Combustor", Advanced Materials Research, Vols.931-932, pp.1228-1232.

## 1. บทนำ

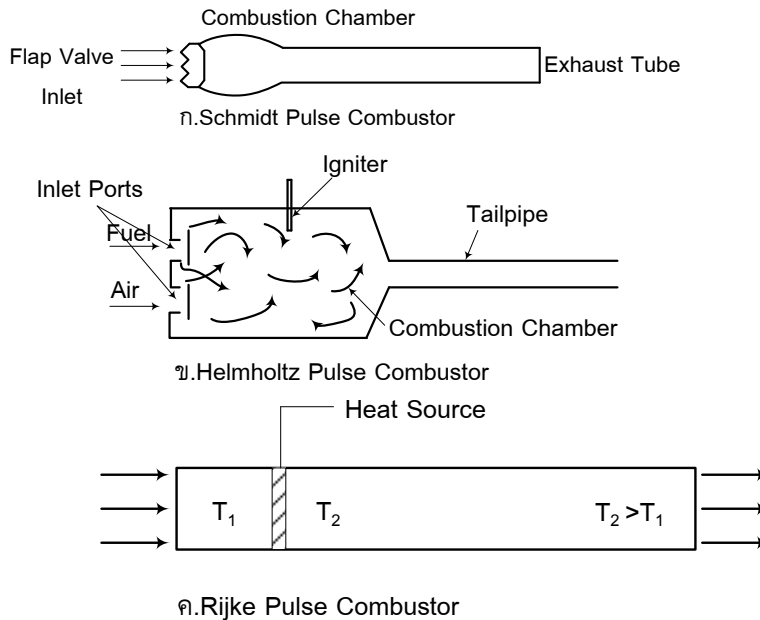
การเผาไหม้แบบพัลส์เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดการไหลของผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากระบบอย่างเป็นจังหวะติดต่อกัน ระบบเผาไหม้นี้มีข้อดีคือสามารถใช้เชื้อเพลิงได้ทั้งเชื้อเพลิงแก๊ส เช่น แก๊สธรรมชาติแก๊สหุงต้ม LPG (Liquid Petroleum Gas) โพรเพน เชื้อเพลิงเหลว เช่น แก๊สโซลีน น้ำมันเตา แอลกอฮอล์ หรือเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ผงถ่านหิน ผงถ่านไม้ การเผาไหม้เป็นจังหวะทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้สูง แต่มีการเกิดปริมาณ  $\text{NO}_x$  ต่ำ ระบบเผาไหม้นี้ต้องการปริมาณอากาศส่วนเกินต่ำ ระบบสามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบเผาไหม้เองโดยไม่ต้องอาศัยพัดลม การเผาไหม้เป็นจังหวะทำให้การไหลของแก๊สร้อนไหลผ่านจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่งอย่างเป็นจังหวะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนไปยังไหลหรือพื้นผิวที่ต้องการให้ความร้อน [1]

### 1.1 ระบบเผาไหม้แบบพัลส์

ระบบเผาไหม้แบบพัลส์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทตามวิธีการสร้างพัลส์ คือ ระบบธรรมชาติ และระบบเชิงกล ในระบบเผาไหม้แบบธรรมชาติ ห้องเผาไหม้จะถูกออกแบบให้เกิดการกำทอนซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการไหลแบบเป็นจังหวะ ความร้อนที่ปลดปล่อยในกระบวนการเผาไหม้จะกระตุ้นความถี่ธรรมชาติ (Fundamental acoustic mode) ของห้องเผาไหม้ ผลของการสั่นที่เกิดในกระบวนการเผาไหม้ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และเกิดการคายความร้อนเป็นจังหวะ เมื่อจังหวะการปล่อยความร้อนออกสอดคล้องกับโหมดการสั่นของความดันในห้องเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้แบบพัลส์จะเกิดขึ้นได้เอง ระบบเผาไหม้แบบธรรมชาติแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะของการออกแบบ คือ ห้องเผาไหม้แบบ Schmidt ห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz และห้องเผาไหม้แบบ Rijke ทั้งสามประเภทมีรูปแบบห้องเผาไหม้แตกต่างกันคือแบบ Schmidt จะมีด้านหนึ่งเป็นปลายปิดและอีกด้านเป็นปลายเปิด เกิดเป็นคลื่นลักษณะ quarter-wave โดยมีการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ด้านปลายปิด ส่วนแบบ Rijke จะมีปลายเปิดทั้งสองด้าน ทำให้เกิดคลื่นแบบ half wave โดยการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $1/4$  ของความยาวท่อจากปลายทางเข้า และสำหรับแบบ Helmholtz จะประกอบไปด้วยด้านปลายปิดที่เป็นห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่และท่อส่ง (Tailpipe) ที่มีปลายเปิดด้านเดียว ดังนั้นลักษณะคลื่นที่เกิดในท่อจะเป็นแบบ quarter-wave เช่นเดียวกับแบบ Schmidt ดังแสดงในรูปที่ 1 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้ทั้งสามจะคล้ายคลึงกัน คือ การกำทอนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะทำให้แก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้จะไหลออกเป็นจังหวะที่สม่ำเสมอ โดยความดันในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร และแก๊สไอเสียจะถูกบังคับให้ไหลออกผ่านท่อส่ง (Tail pipe) ทำให้ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง เกิดเป็นสูญญากาศ หลังจากนั้นอากาศใหม่จากภายนอกจะถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง ในกรณีที่ระบบมีวาล์วเปิดปิดเชื้อเพลิง (Fuel valve หรือ Flapper valve) ในจังหวะที่ภายในห้องเผาไหม้เป็นสูญญากาศ วาล์วนี้จะเปิดโดยอัตโนมัติทำให้เชื้อเพลิงไหล



เข้าสู่ห้องเผาไหม้และเกิดการผสมกับอากาศใหม่ในห้องเผาไหม้อีกครั้ง ความถี่ในการเกิดวัฏจักรการเผาไหม้จะสูงกว่า 100 Hz



รูปที่ 1 แสดงห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยระบบสร้างพัลส์ธรรมชาติ

สำหรับห้องเผาไหม้แบบเชิงกล การสั่นของการไหลที่เกิดขึ้นจะเกิดจากวาล์วระบบจักรกล ที่ทำหน้าที่เปิดปิดวาล์วด้วยความถี่สูง โดยปกติระบบจะถูกออกแบบให้เปิดปิดวาล์วเชื้อเพลิงโดยผลต่างความดันหรืออุปกรณ์ควบคุมการเปิดปิด ในขณะที่ให้ไหลออกจากหัวเผาด้วยอัตราการไหลคงที่ เป็นผลทำให้ที่ทางออกของหัวเผาเกิดบริเวณที่มีการเผาไหม้แบบหนา (Fuel-rich) และการเผาไหม้แบบบาง (Fuel-lean) สลับกัน เป็นผลให้เกิดการเกิด  $\text{NO}_x$  ลดลงอย่างมาก ห้องเผาไหม้ชนิดนี้มีความถี่ของวัฏจักรที่ค่อนข้างต่ำ สามารถสังเกตการสั่นของการเผาไหม้ได้ด้วยหูและตาคน แต่ระบบนี้จะต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของวาล์วเชิงกล เนื่องจากมีการเปิดปิดตลอดเวลา และคำนึงถึงการเกิดเสียงรบกวนเนื่องจากเกิดการสั่นในช่วงความถี่ต่ำ

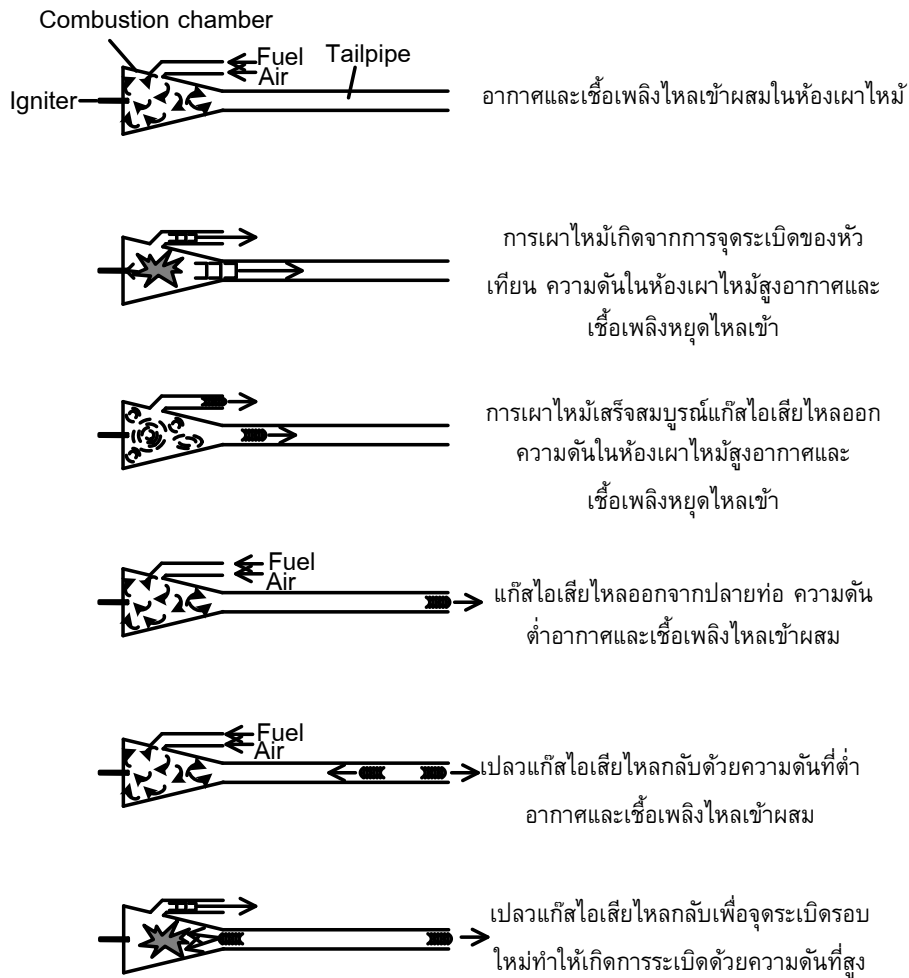
## 1.2 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz

รูปที่ 2 แสดงการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ซึ่งประกอบด้วยห้องเผาไหม้และท่อส่งมีความซับซ้อนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้แบบเป็นจังหวะและการส่งผ่านคลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่ง กระบวนการเผาไหม้จะเริ่มจากอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สหรือละอองเชื้อเพลิงของเหลวถูกพ่นเข้าไปผสมกันในห้องเผาไหม้ แล้วถูกจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Spark plug) ทำให้เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดในห้องเผาไหม้ ในจังหวะนี้

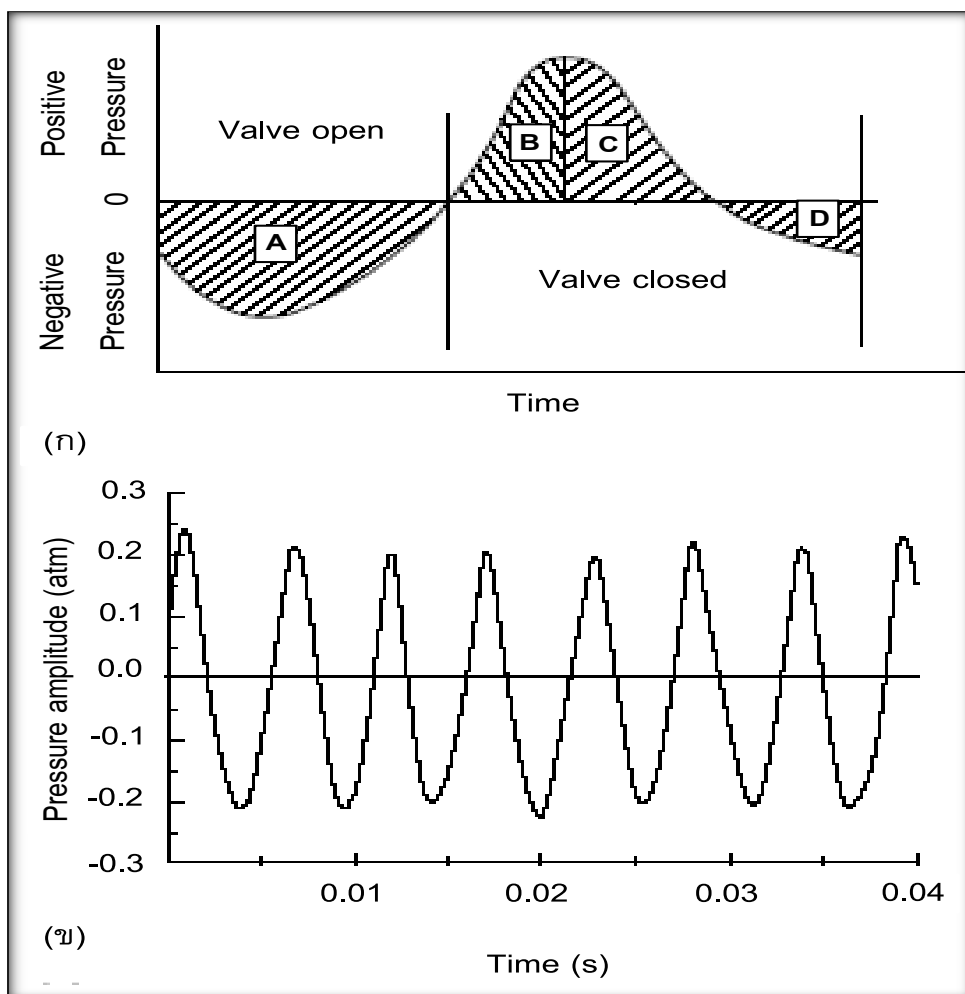
ทางเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกปิดโดยวาล์วหรือด้วยความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ และแรงดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะดันให้แก๊สไอเสียไหลออกผ่านท่อส่งออกไปภายนอก การไหลออกของแก๊สไอเสียจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อส่ง จนกระทั่งความดันภายในห้องเผาไหม้ลดลงต่ำสุด วาล์วอากาศและเชื้อเพลิงจะเปิดอีกครั้งหรือห้องเผาไหม้เป็นสูญญากาศทำให้อากาศและเชื้อเพลิงใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยการจุดติดครั้งใหม่จะเกิดขึ้นเองอีกโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน การจุดติดจะเกิดโดยแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมายังห้องเผาไหม้ในจังหวะที่ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำสุดเป็นสูญญากาศ วัฏจักรการเผาไหม้จะเกิดซ้ำเองด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้และท่อส่ง สัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ หรือชนิดของวาล์วเปิดปิดของอากาศและเชื้อเพลิง

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ โดยที่ในรูป (ก) เป็นการเปลี่ยนแปลงของความดันตามทฤษฎีและรูป (ข) เป็นการเปลี่ยนแปลงความดันจากการทดลอง บริเวณ A เป็นช่วงที่อากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ B เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงใหม่จุดติดเกิดความร้อนทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูง อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ C เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกทางท่อส่ง ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง บริเวณ D เป็นช่วงที่โมเมนตัมของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกสร้างความดันติดลบภายในห้องเผาไหม้ (ห้องเผาไหม้เป็นสูญญากาศ)

สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้ระบบเผาไหม้แบบพัลส์เข้าสู่สภาวะคงตัวจะเป็นไปตาม Rayleigh criterion คือ ผลต่างเฟสระหว่างการสั่นของความดันและการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้จะต้องน้อยกว่า  $1/4$  ของคาบวัฏจักร (เฟสของความดันและการปลดปล่อยความร้อนยังเข้าใกล้ศูนย์ยิ่งดี) [2] โดยที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับการไหลและอัตราการผสมของอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับารออกแบบห้องเผาไหม้ การจุดระเบิดของอากาศผสมเชื้อเพลิงโดยหัวเทียนจะทำเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มวัฏจักร หลังจากนั้นการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นเองเมื่อการทำงานของระบบเสถียร นอกจากนี้ เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในช่วงแรกสำหรับเริ่มเดินระบบก็ไม่จำเป็นต้องใช้หลังจากที่เดินระบบได้แล้ว เนื่องจากอากาศจะถูกดูดเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติด้วยความเป็นสูญญากาศของห้องเผาไหม้



รูปที่ 2 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz [1]

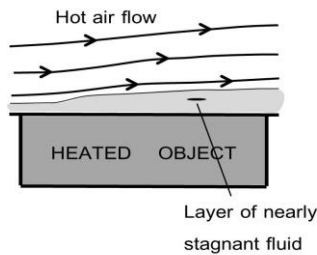


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้

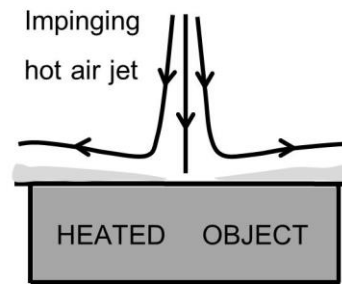
(ก) ผลทางทฤษฎี (ข) ผลการทดลอง [3]

### 1.3 การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

การให้ความร้อน การระบายความร้อนและการอบแห้งโดยใช้การพาความร้อนจากของไหลเป็นกระบวนการที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพของกระบวนการเหล่านี้ถูกจำกัดโดยชั้นการไหลขอบเขตบนพื้นผิวที่มีความเร็วต่ำเกือบเป็นศูนย์เนื่องจากความหนืดที่ผิวของก้อนวัตถุที่จะให้ความร้อนหรือระบายความร้อน ในการถ่ายโอนความร้อนจะต้องผ่านชั้นขอบเขตนี้ด้วยการนำความร้อน โดยเฉพาะในกรณีเป็นชั้นของแก๊ส การถ่ายโอนจะต่ำมากเนื่องจากค่าการนำความร้อนของแก๊สต่ำ ถึงแม้ชั้นขอบเขตการไหลนี้จะบางมากก็ตาม ชั้นที่หยุดนิ่งนี้ก็จะเป็นตัวจำกัดการถ่ายโอนความร้อนไปยังพื้นผิว เพื่อที่จะลดระยะทางของการถ่ายโอนด้วยการนำความร้อน จำเป็นต้องทำให้เกิดการไหลใกล้บริเวณพื้นผิวมากที่สุด การใช้ความปั่นป่วนเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับเลื่อนของไหลไปยังผนังโดยการเคลื่อนที่ของก้อนการไหลแบบหมุนวนไหลชนผนัง



**รูปที่ 4** การเกิดชั้นขอบเขตของการไหลแบบขนานกับผนัง



**รูปที่ 5** การเกิดชั้นขอบเขตของการไหลแบบใช้เจ็ทพุ่งชนหรือปะทะผนัง

รูปที่ 4 แสดงการไหลแบบขนานกับผนัง ซึ่งมีการเกิดชั้นขอบเขตที่ติดกับผนัง ที่ต้องการให้ความร้อน ทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากการไหลไปยังพื้นผิวไม่มีประสิทธิภาพ หากต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากการไหลไปยังผนัง อาจทำได้โดยการบังคับให้การไหลหรือเจ็ท (ลำของไหล) ไหลชนตั้งฉากกับผนังดังแสดงในรูปที่ 5 วิธีการใช้เจ็ทพุ่งชนหรือปะทะกับผนังโดยตรงจะให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีถ่ายโอนแบบพาความร้อนด้วยวิธีอื่นๆ มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางและมีบทความวิจัยที่สรุปเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารของเจ็ทพุ่งชนโดย Jambunathan และคณะ [4] และ Viskanta [5]

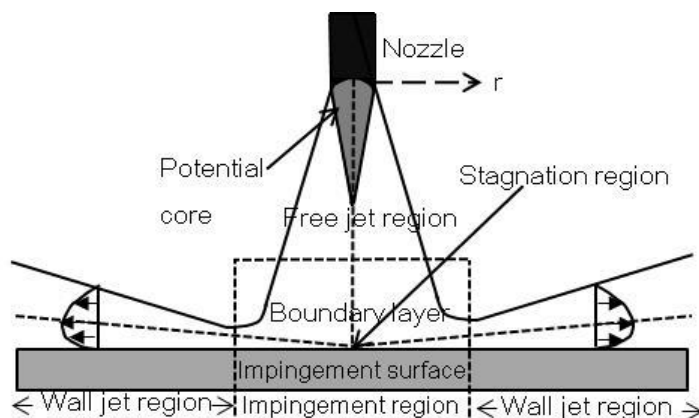
อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ลดผลกระทบของชั้นขอบเขตการไหลแบบหยุดนิ่งคือการทำให้เกิดการไหลแบบสั้น ซึ่งจะให้ผลเด่นชัดในกรณีที่เป็นการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำหรือมีระดับความปั่นป่วนต่ำวิธีการนี้ไม่เป็นวิธีที่ใหม่มีการใช้มานานแล้วในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว แต่มีปัญหาทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้สร้างตัวกำเนิดของการสั้นติดตั้งกับระบบท่อที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนกลไก เช่น ระบบลูกสูบหรือระบบวาล์วแบบเปิดปิดเชิงกล ที่มีราคาแพง ไม่คุ้มกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ดีขึ้น

#### 1.4 ทบทวนเอกสารงานวิจัย

##### 1.4.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบต่อเนื่อง

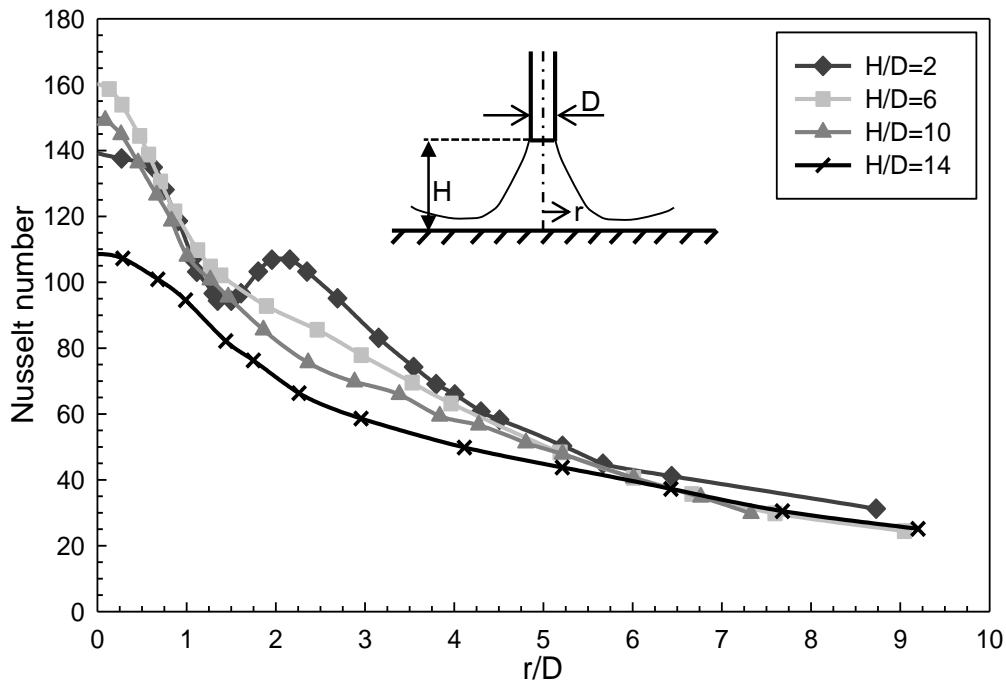
เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลปะทะพื้นผิว รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง คือ (1) ช่วงเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดซึ่งจะมีโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลาง (2) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงและบริเวณรอบๆ และ (3) ช่วงเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นการไหลของเจ็ทในแนวขนานบนพื้นผิวรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่ง

ชน (Impingement region) หลังจากการชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิวจะเริ่มลดลงโดยที่อัตราการลดความเร็วจะแปรผกผันจากระยะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมี ส่งผลทำให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) การไหลบนพื้นผิวจะค่อยๆหนาขึ้น [4]



รูปที่ 6 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของโพเทินเชียลคอร์พุ่งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลงเนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง [4,5] ถึงแม้จะมีค่าความปั่นป่วนที่สูงขึ้นก็ตาม



รูปที่ 7 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ  $Re=23,750$ ) [6]

รูปที่ 7 แสดงการกระจายของตัวเลขนัสเซิลต์ของเจ็ทลำเดี่ยวที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบโดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) ในรูปแสดงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ( $H$ ) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่จุดต่างๆ ตามแกนรัศมีของเจ็ท ( $r$ ) โดยกำหนดให้เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ 23,750 และ  $D$  คือขนาดท่อขนาดของท่อหัวฉีด จากรูปที่ 7 พบว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H/D=2$  อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point,  $r=0$ ) และจะค่อยๆ ลดลงแต่ที่ตำแหน่ง  $r/D=1.5$  อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงตำแหน่ง  $r/D=2$  จะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak heat transfer) หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนสาเหตุของการเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง อาจเกิดจากการที่เจ็ทผนังเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรืออาจเกิดจากความเร่งของการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง  $r/D=1-2$  หรืออาจเกิดจากปรากฏการณ์ Surface renewal บนพื้นผิวที่เกิดจากก้อนการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ (Large scale eddies) ใน

โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนทำลายชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น [4] แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H/D > 2$  จากรูปที่ 6 พบว่านัสเซิลด์นัมเบอร์ของแต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point,  $r=0$ ) และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวแกนรัศมีของเจ็ท และนัสเซิลด์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าสูงสุดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H/D=6$  ซึ่งเป็นระยะที่โครงสร้างการไหลของเจ็ทในส่วนโพเทินเชียลคอร์กำลังจะหมดและระดับของความปั่นป่วนของเจ็ทเริ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H/D > 6$  เป็นระยะที่โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงตามระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง

#### 1.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบพัลส์

จากการสำรวจเอกสารพบว่าม้งานวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่กำเนิดโดยห้องเผาไหม้แบบพัลส์ค่อนข้างน้อย ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบพัลส์ที่สร้างโดยโซลินอยด์วาล์ว และโรตารีวาล์วเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เจ็ทที่ใช้ศึกษามีความถี่ที่ค่อนข้างต่ำ และมีแอมพลิจูดของการสั่นของความเร็วน้อยมากเมื่อเทียบกับเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องโดยห้องวิจัยทางด้านการเผาไหม้ที่ Sandia National Laboratories โดย Keller [7] และ Eibeck [8] ได้ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีท่อส่งหน้าตัดกลมยาว  $L = 880$  mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D = 50$  mm มีอัตราส่วนปริมาตรของห้องเผาไหม้ต่อท่อส่งประมาณ 1.0 ทดสอบเดินเครื่องที่เงื่อนไข อัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ย 9 g/s ความถี่ของการสั่น  $f = 100$  Hz แอมพลิจูดของความดันในห้องเผาไหม้  $A_p = 10$  kPa อุณหภูมิสูงสุดที่ทางออกท่อส่งเท่ากับ 1400 K และมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 350 K อุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่างๆวัดได้ประมาณ 700 K

จากการศึกษาการไหลพบว่า ลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ปากทางออกท่อส่งจะมีโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นลักษณะวงแหวน (Toroidal vortices) รอบลำเจ็ทอิสระ เป็นผลทำให้เกิดการดึงอากาศที่อยู่รอบๆ เข้าเป็นจำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ทลดลงอย่างรวดเร็วจากตำแหน่งปากทางออกของท่อส่ง การไหลแบบหมุนวนอันดับหนึ่งถูกสร้างขึ้นระหว่างช่วงที่ความเร็วเป็นบวกในวัฏจักร และเคลื่อนที่ไปยังปลายทางการไหลอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างที่เกิดการไหลแบบย้อนกลับการไหลที่ปลายท่อส่งจะมีลักษณะเป็น Sink flow คืออากาศที่อยู่รอบทางออกของท่อส่งจะไหลเข้าท่อส่งจากทุกทิศทาง แทนที่จะไหลแบบตรงเหมือนตอนที่เจ็ทไหลออกจากท่อส่งระหว่างช่วงที่ความเร็วเป็นบวกในวัฏจักร โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนอันดับที่



สองจะเกิดขึ้นที่เวลาสิ้นสุดของวัฏจักรที่ความเร็วเป็นบวก แต่มีขนาดเล็กกว่าการไหลแบบหมุนวนอันดับที่หนึ่ง แต่การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่เคลื่อนที่ไปทางปลายทางการไหลเนื่องจากได้รับอิทธิพลของ Sink flow ที่เกิดขึ้นในเวลาต่อมา โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนอันดับสามจะสามารถเห็นได้ในช่วงปลายของวัฏจักรเกิดขึ้นก่อนข้างเบา

สำหรับผลการศึกษากายภาพของความร้อนของเจ็ทจากท่อส่งไหลปะทะบนผนังได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกรณีเจ็ทแบบพัลส์และกรณีเจ็ทแบบต่อเนื่อง โดยทดลองที่เงื่อนไขอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยเท่ากัน พบว่าที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวฟุ้งชนน้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบพัลส์จะเพิ่มขึ้น 2.5 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบต่อเนื่อง แต่ที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวฟุ้งชนมากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบพัลส์จะต่ำกว่าเจ็ทแบบต่อเนื่อง สาเหตุเกิดจากการตั้งอากาศที่อยู่รอบๆเข้ามาภายในลำเจ็ทของการไหลแบบหมุนวนรอบลำเจ็ท ทำให้การไหลของเจ็ทก่อนปะทะพื้นผิวถูกทำลาย

Patterson และคณะ [9] ได้ทดลองอบแห้งกระดาษด้วยเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ฟุ้งชนที่มีการออกแบบห้องเผาไหม้แบบพัลส์เจ็ทที่มีระบบท่อส่งต่างกัน 3 รูปแบบ โดยทุกระบบที่ออกแบบมีความถี่ในการทำงานประมาณ 90 Hz โดยระบบแรกจะใช้ท่อส่งเป็นแบบสลิตสร้างพัลส์เจ็ทที่มีการไหลแบบย้อนกลับ ส่วนอีกสองระบบที่เหลือมีสัดส่วนการสันของความเร็วเจ็ทที่ค่อนข้างต่ำ และระบบที่สามออกแบบให้สามารถสร้างเจ็ทแบบต่อเนื่องได้ด้วย พบว่ารูปแบบห้องเผาไหม้ที่มีการไหลแบบย้อนกลับจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด

Wu และคณะ [10] ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ขนาดเล็กในการศึกษากายภาพความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน และได้ทดสอบอบแห้งกระดาษด้วยระบบเจ็ทฟุ้งชน ลักษณะของท่อเจ็ทที่ใช้เป็นท่อส่งแบบเดี่ยวยามีหน้าตัดกลมที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน  $H/D=1.27, 2.96, 4.68$  และ  $6.36$  ความถี่ของการสันอยู่ที่ 250 Hz โดยวัดจากการสันของความดันในห้องเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าบริเวณพื้นที่เจ็ทฟุ้งชนที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงอยู่ภายในรัศมี  $r/D=3$  เท่านั้น เนื่องจากผลของการตั้งอากาศที่อยู่รอบๆเข้ามาในเจ็ท จากลักษณะการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ  $H/D$  ต่างๆ พบว่าเมื่อระยะ  $H/D$  เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางการฟุ้งชน (Stagnation point) จะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่ง  $r/D=1$  จะเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากมีโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนไหลปะทะพื้นผิว อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ไม่มีการวัดแอมพลิจูดการสันของความเร็วและไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดการไหลแบบย้อนกลับในท่อส่งหรือไม่ และไม่มีการเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบต่อเนื่อง

นอกจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์แล้ว ยังมีพัลส์เจ็ทที่มีแอมพลิจูดของความเร็วในการสันสูงอีกแบบ คือ เจ็ทสังเคราะห์ (Synthetic jet) เกิดจากห้องพักอากาศที่มีการเคลื่อนไหวของ Actuator ที่ติดตั้งบนผนังห้อง เช่น ลูกสูบหรือไดอะแฟรม มีกลไกการเกิดคล้ายกับห้องเผา

ไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz ซึ่งก่อให้เกิดโครงสร้างการไหลแบบหมุนวน(Vortex ring) ที่บริเวณใกล้กับทางออกของห้องเจ็ท เช่นเดียวกับเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [11] เนื่องจากห้องพักอากาศสำหรับกำเนิดเจ็ทสังเคราะห์มีทางเข้าออกของอากาศเพียงทางเดียวเท่านั้น ทำให้ผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยของเจ็ทสังเคราะห์เท่ากับศูนย์ เจ็ทสังเคราะห์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก

Li [12] ศึกษาคุณสมบัติของเจ็ทสังเคราะห์และศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลแบบปั่นป่วนด้วยโมเดล SST  $k-\omega$  ผลการศึกษาแสดงให้เห็นโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ปากทางออกเคลื่อนที่ไปปะทะพื้นผิว และเคลื่อนที่บนพื้นผิว หลังจากนั้นจึงไปรวมตัวกับการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวที่ปะทะและผนังของห้องเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน  $H/D=4$ , เส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=6.35$  mm, ความเร็วเฉลี่ย  $u_m=18$  m/s และความถี่  $f=80$  Hz พบว่าการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า และการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของพื้นที่ภายในรัศมี  $r/D=10$  จะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทแบบต่อเนื่องที่เงื่อนไขความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทเดียวกัน นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของความถี่ที่มีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท เมื่อเพิ่มความถี่จาก 250, 320 จนถึง 500 Hz พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ตำแหน่ง  $r/D=0.6$  จะเพิ่มเป็น 430, 475 และ 500  $W/K m^2$  ตามลำดับ โดยทั้งสามความถี่จะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนไม่แตกต่างกันมาก

Pavlova และ Amitay [13] ได้ทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทสังเคราะห์สำหรับใช้ระบายความร้อน โดยใช้เงื่อนไขการทดลอง ได้แก่ ความถี่  $f=420$  และ 1200 Hz และระยะพุ่งชน  $H/D=1.9-38.1$  พบว่าที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน  $H/D=4.75$  เมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทแบบต่อเนื่องแล้วสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.9 เท่า และ 2.6 เท่า สำหรับความถี่  $f=420$  Hz และ 1200 Hz ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท กรณีเพิ่มความถี่จาก  $f=420$  Hz เป็น 1200 Hz พบว่าการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นในช่วง  $H/D=3-9$  การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกันในช่วง  $H/D=10-15$  และการถ่ายเทความร้อนจะลดลงในช่วง  $H/D>15$  และที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน  $H/D=9.5$  พบว่าที่เงื่อนไข  $f=1200$  Hz โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนจะรวมตัวกันและจะแตกเป็นโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนเล็กๆก่อนที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ในขณะที่เงื่อนไข  $f=420$  Hz โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนจะพุ่งชนพื้นผิวโดยที่ไม่มีการรวมตัวกัน

Tesar [14] ได้พัฒนาอุปกรณ์จำพวก Fluidics ที่ใช้เทคนิคควบคุมการไหลโดยไม่ใช้ชิ้นส่วนเชิงกลและไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกในการขับเคลื่อน (ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า) ในการทดลองได้ใช้ปากทางออกหน้าตัดแบบวงแหวนและใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

อย่างไรก็ตาม ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องเลือกความถี่ในการสั่นที่เหมาะสมด้วย และการเลือกหาความถี่ที่เหมาะสมนั้นเป็นงานที่ยาก ถ้าหากเลือกใช้ความถี่ไม่เหมาะสมแล้วการสั่นของการไหลจะไม่มีประโยชน์ ชั้นขอบเขตติดกับผนังจะดูดซับการสั่นของการไหลทำให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่ดีขึ้น จากการศึกษาของ Vejrazka และคณะ[15] การสร้างการสั่นของการไหลที่ไม่เหมาะสมจะมีผลต่อโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในเจ็ทและทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกลับลดลง

#### 1.4.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาระบบการเผาไหม้แบบพัลส์

Keller และคณะ [16] ควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงที่ไหลสู่ห้องเผาไหม้ โดยการวางแผ่นขวางขนาดเล็ก (Stagnation plate) ขวางเส้นทางการไหลของเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงไหลปะทะแผ่นนี้จะเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นหลังแผ่นนี้ ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้ได้ นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งของการวางแผ่นขวางการไหลนี้หรือระยะห่างระหว่างทางเข้าเชื้อเพลิงและแผ่นนี้จะมีผลต่อการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้มาก โดยปกติรูปแบบของอัตราการปลดปล่อยความร้อนเทียบกับเวลาจะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ทั้งหมดไม่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน คุณสมบัติของการปลดปล่อยความร้อนสามารถดูจากความสูงของรูปแบบระฆังคว่ำ ซึ่งจะทำเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าเฉลี่ยของความร้อนที่ปลดปล่อย นิยามเป็นสัดส่วนแอมพลิจูดของอัตราการปลดปล่อยความร้อน โดยค่าเฉลี่ยของความร้อนที่ปลดปล่อยสามารถคำนวณจากอัตราการไหลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าในห้องเผาไหม้ สัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยนี้สามารถควบคุมโดยตำแหน่งการวางของตัวขวางการไหล การลดระยะระหว่างปากทางเข้าเชื้อเพลิงกับแผ่นขวางการไหลจะช่วยเพิ่มอัตราการผสม หรือลดเวลาการผสมเป็นผลทำให้การปลดปล่อยความร้อนเริ่มเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นสัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยจะลดลง และการปลดปล่อยความร้อนจะลดลงในเฟสของการสั่นของความดัน ในการทดลองของ Keller และคณะ [16] เชื้อเพลิงและอากาศจะถูกผสมกันก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (Premixed) และอัตราการไหลเฉลี่ยและสัดส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ จากการทดลองพบว่า สัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยจะมีผลโดยตรงกับขนาดของแอมพลิจูดของความดันที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ความสัมพันธ์ของทั้งสองเป็นไปตาม Rayleigh criterion คือการสั่นที่รุนแรงจะเกิดขึ้นเมื่อการปลดปล่อยความร้อนสอดคล้องกับการสั่นของความดัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดสัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยสูงที่สุด

การลดผลรวมเวลาล่าช้าของกระบวนการเผาไหม้จะลดคาบเวลาของวัฏจักรมีผลทำให้ความถี่ของการสั่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความถี่กำทอนจะมีผลต่อความถี่ของการเกิดการสั่นในห้องเผาไหม้อย่างมาก เนื่องจากผลการทดลองพบว่าความถี่ของการสั่นจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตรของห้องเผาไหม้ถึงแม้ว่าจะวางตัวขวางการไหลของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งเดียวกัน

ซึ่งความถี่กำทอนนี้ปกติจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของห้องเผาไหม้และความเร็วเสียงเฉลี่ยซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในท่อส่ง

Kuts และคณะ[17] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเคลื่อนที่ของแก๊สในห้องเผาไหม้แบบสันโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊ส LPG (Liquefied Petroleum Gas) ในการจำลองโมเดลจะมีลักษณะของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมแล้วลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อให้ออกกับท่อส่งได้(Tailpipe) โดยลักษณะของท่อส่งมีลักษณะเป็นท่อขยายหน้าตัด ซึ่งจากการจำลองการไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้และการไหลออกจากท่อส่งจะเป็นการไหลที่มีอุณหภูมิและความเร็วในการไหลที่สูงโดยเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของแก๊สที่น้อย การเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มีผลต่อรูปแบบของแก๊สไอเสียที่ออกมาอย่างไรก็ตามการเดินเครื่องที่สภาวะที่เหมาะสมของห้องเผาไหม้แบบสันมีเป้าหมายสำหรับการอบวัสดุ ดังนั้นยังเกิดการไหลแบบสันที่สูงยอมส่งผลให้อุณหภูมิในการไหลของแก๊สยิ่งสูงขึ้นทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบได้

Geng และ คณะ [18] ได้ทดลองและจำลองผลของห้องเผาไหม้แบบพัลส์แบบไม่มีวาล์วขนาด 8 cm โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้จะมีขนาดของห้องเผาไหม้ 1.9 cm ยาว 1.2 cm เป็นทรงกระบอกและต่อกับท่อส่งโดยการลดหน้าตัด ทางเข้าอากาศทั้งสองท่อต่อขนานกับท่อส่งและใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ส่วนโมเดลการจำลองจะศึกษาเป็นการไหลไม่คงตัว 3 มิติอัดตัวได้และไหลแบบมีความหนืดมีการถ่ายเทความร้อนและแผ่รังสีความร้อนจำลองจากโปรแกรม CFX version 5.7 จากผลการจำลองทั้งค่าความถี่และความดันสูงสุดตรงกับผลการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าความถี่ในห้องเผาไหม้จะเป็นฟังก์ชันอยู่กับความยาวของท่ออากาศทางเข้าซึ่งความถี่และความดันสูงสุดยังแปรผันตามอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงและยังพบว่ารูปแบบของห้องเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับเข้าห้องเผาไหม้จะให้แรงขับสุทธิที่ต่ำแต่รูปแบบของห้องเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการไหลไปข้างหน้าจะช่วยเพิ่มแรงขับสุทธิ 1 N โดยที่แรงขับในการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Thrust specific fuel consumption) = 0.02 kg/N-hr

Kilicarslan และ Arisoy [19] ได้ศึกษาและวิเคราะห์คลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้แบบสันโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊ส LPG ในการทดสอบห้องเผาไหม้จะออกแบบให้มีห้องผสมกันก่อนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยที่อากาศและเชื้อเพลิงถูกควบคุมด้วยวาล์ว ขนาดของห้องผสมมีขนาด 77 mm ยาว 102 mm ขนาดของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมขนาด 115 mm ยาว 331 mm และท่อส่ง (Tailpipe) ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 42 mm ความยาวตั้งแต่ 1300-1900 mm ในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องวัดระดับเสียง ,ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน และ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ในการวิเคราะห์ผล จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งทำให้ระดับความดันเสียงลดลงโดยพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน ค่าระดับแรงดันเสียงสูงสุดเท่ากับ 96.6 dB ที่ความยาวท่อส่ง 1.3 m ซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของความถี่พื้นฐานจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์เท่ากับ 63 Hz และความถี่ที่จุดสูงสุด อื่นๆจะเป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน สำหรับทุก

ความยาวท่อส่งที่ได้ทำการทดลอง และระดับแรงดันเสียงที่ทางออกของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จะสูงกว่าที่ทางเข้าของอากาศ





## 2.วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาผลของความยาวท่อส่งและจำนวนทางเข้าอากาศที่มีต่อการสร้างเจ็ทอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

2.2 ศึกษาความสามารถของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างโดยห้องเผาไหม้แบบพัลส์

2.3 ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์







### 3.ขอบเขตการศึกษา

3.1 ศึกษาเฉพาะกรณีที่ใช้ห้องเผาไหม้ชนิด Helmholtz แบบไร้วาล์วที่มีท่อส่งหน้าตัดกลมแบบท่อเดี่ยว

3.2 ใช้แก๊สหุงต้ม LPG เป็นเชื้อเพลิง

3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้โดยใช้ Pressure transducer

3.4 ศึกษาสมบัติการไหลของเจ็ทลมร้อนโดยการวัดความเร็วและอุณหภูมิด้วย Pitot tube, Thermocouples

3.5 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศร้อนพุ่งชนโดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

3.6 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการเผาไหม้โดยใช้โปรแกรม (ANSYS software Ver. 13 (CFX))





## 4. ชุดทดลองและตัวแปร

### 4.1 ลักษณะของปัญหาและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 9 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดให้ปริมาตรของห้องเผาไหม้คงที่ ห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ยาว 300 mm และติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิด เชื้อเพลิงที่ด้านท้ายของห้องเผาไหม้ตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งมีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ส่วนของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งออกแบบให้เป็นข้อต่อเกลียว ในสามารถเปลี่ยนท่อส่งได้ ท่อส่งทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=47$  mm ยาว  $L=750$  mm (ประมาณ 16 D) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด 4 ตำแหน่งดังรูปที่ 8 ท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ถูกงอให้ปลายชี้ไปทิศทางเดียวกับท่อส่ง ซึ่งท่อทางเข้าอากาศสามารถปิดฝาปิดในกรณีที่ไม่ใช้งาน

#### 4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

(1) ในการทดลองศึกษาผลของจำนวนท่อทางเข้าอากาศและรูปแบบการติดตั้งทางเข้าได้ศึกษาทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 10 คือ รูปแบบที่ (1) ท่อเดี่ยว รูปแบบที่ (2) สองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  รูปแบบที่ (3) สองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  และรูปแบบที่ (4) สามท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$

(2) ในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง  $L=16D$  (750 mm),  $19D$  (893 mm),  $22D$  (1034 mm), และ  $25D$  (1175 mm) ดังแสดงในรูป 9



(1) Single inlet



(2) Double inlets with 180°

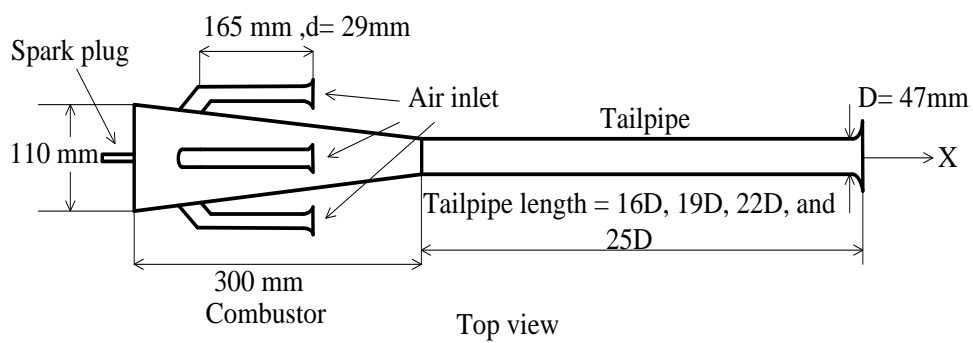


(3) Double inlets with 90°

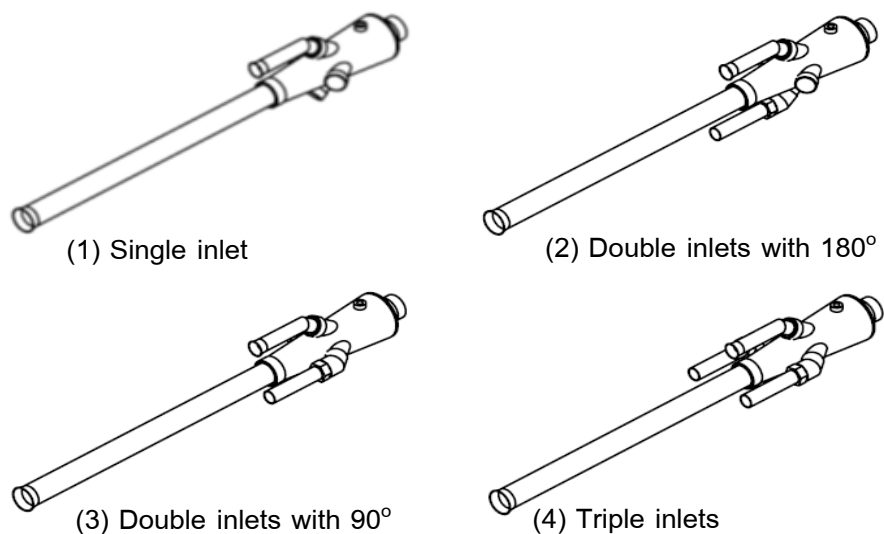


(4) Triple inlets

รูปที่ 8 ภาพถ่ายรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศทั้งสี่รูปแบบที่ใช้ทดลอง



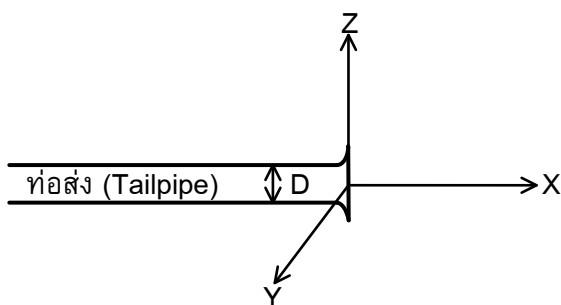
รูปที่ 9 แสดงขนาดของห้องเผาไหม้และท่อส่ง



รูปที่ 10 แสดงรูปแบบของห้องเผาไหม้และการติดตั้งรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศ

#### 4.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดระบบแกน (Coordinate system) ที่ใช้อ้างอิงในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 11 ประกอบด้วยพิกัด X, Y และ Z กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่กึ่งกลางของปากทางออกของท่อส่ง ให้แกน X มีทิศทางในแนวแกนของเจ็ทลมร้อนตั้งฉากกับระนาบ YZ ให้แกน Y มีทิศทางพุ่งขึ้นตั้งฉากกับระนาบ XZ



รูปที่ 11 แสดงพิกัดที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG คงที่ไว้ที่ 29.8 l/min

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง



|   |   |
|---|---|
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่ง (D)   | 47 mm   |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่ออากาศ (d)   | 29 mm   |
| ความยาวของท่อส่ง  | 16D, 19D, 22D และ 25D   |
| ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงหัววัดความเร็วและอุณหภูมิซึ่งวัดกลางท่อส่งออกไป (X)   | 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D   |
| ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงพื้นผิวฟุ้งชนที่ติดตั้งหัววัดการถ่ายเทความร้อนไว้ (L) | 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D   |
| รูปแบบของห้องเผาไหม้(โดยปริมาตรของห้องเผาไหม้คงที่)                               | (1) ท่อเดี่ยว, (2) สองท่อที่ห่างกัน $180^{\circ}$ , (3) สองท่อที่ห่างกัน $90^{\circ}$ และ (4) สามท่อที่ห่างกัน $90^{\circ}$ |





## 5. วิธีการทดลอง

### 5.1 การศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ปากทางออกของท่อส่ง

#### 5.1.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 11 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

(1) คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับอัดอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ในห้องเผาไหม้เพื่อใช้ในการสตาร์ทห้องเผาไหม้แบบพัลส์

(2) ถังแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงสำหรับจ่ายเลี้ยงห้องเผาไหม้เมื่ออากาศถูกปล่อยเข้าห้องเผาไหม้แก๊ส LPG ก็ปล่อยเข้าตามผสมกับอากาศที่ห้องเผาไหม้

(3) หัวเทียน และชุดควบคุมการระเบิด (Ignition Controller) หลังจากที่อากาศและเชื้อเพลิงเข้าผสมกันในห้องเผาไหม้แล้วชุดควบคุมการระเบิดจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านหัวเทียนทำให้เกิดความร้อนขึ้นจึงเกิดการระเบิดขึ้นในห้องเผาไหม้จนเกิดเป็นวัฏจักรแบบพัลส์

(4) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์เป็นห้องเผาไหม้มีลักษณะทรงกรวยทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 1.5 mm โดยกันของห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ต่อเข้ากับหัวเทียนส่วนด้านหน้าเป็นข้อต่อเกรียวในเพื่อทำให้สามารถเปลี่ยนความยาวท่อส่งได้ซึ่งท่อส่งมีขนาด 47 mm และความยาวของห้องเผาไหม้ทรงกรวยอยู่ที่ 300 mm

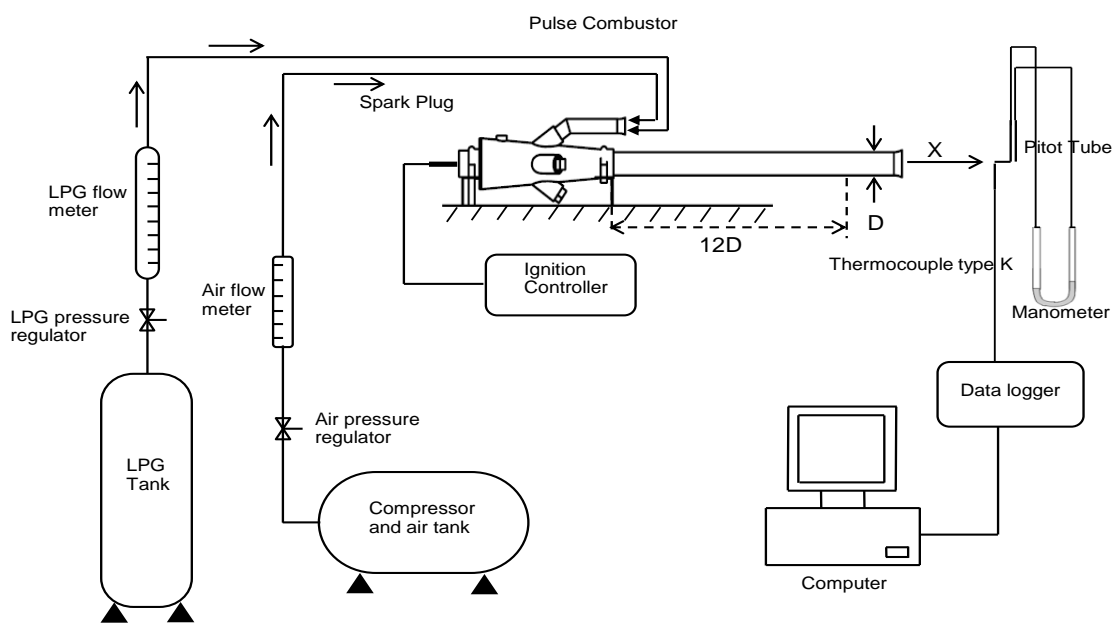
(5) ชุดหัววัดอุณหภูมิ Type K จะติดตั้งหัววัดอุณหภูมิไว้ตรงกลางปากทางออกในทิศทางของ X ดังแสดงในรูปที่ 11 แล้วเลื่อนออกไปเป็นจำนวนเท่าของขนาดท่อส่งคือ 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D

(6) ชุดหัววัดความเร็วจะติดตั้งหัววัดผลต่างความดันไว้ตรงกลางปากทางออกในทิศทางของ X ดังแสดงในรูปที่ 11 แล้วเลื่อนออกไปเป็นจำนวนเท่าของขนาดท่อส่งคือ 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D

#### 5.1.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองดังรูปที่ 12 จะจ่ายอากาศจากถังของคอมเพรสเซอร์เข้าห้องเผาไหม้ทางช่องอากาศ (Air Inlet) โดยอากาศจะไหลผ่านตัวปรับแรงดันลมและตัวปรับอัตราการไหลของลม เพื่อคุมความดันอากาศไว้ที่ 2 bar และอัตราการไหลของอากาศ 100 l/min ต่อจากนั้นก็ปล่อยเชื้อเพลิงแก๊ส LPG เข้าห้องเผาไหม้เพื่อผสมกับอากาศโดยเชื้อเพลิงแก๊ส LPG จะไหลผ่านตัวปรับความดันก่อนออกจากถังและตัววัดอัตราการไหลเพื่อควบคุมความดันของเชื้อเพลิงไว้ที่ 2.5 bar และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ทุกเงื่อนไขการทดลอง หลังจากนั้นจุดระเบิดด้วยหัวเทียนโดยปล่อยกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุม

การระเบิดไหลผ่านหัวเทียนทำให้เกิดความร้อนขึ้นจึงเกิดการระเบิด การระเบิดของเชื้อเพลิงทำให้เกิดเป็นการระเบิดแบบวัฏจักรพัลส์โดยรูปทรงของห้องเผาไหม้ วัฏจักรแบบพัลส์ทำให้เกิดความดันในห้องเผาไหม้ทั้งบวกและลบ (สูญญากาศ) ทำให้เกิดระบบการระเบิดแบบพัลส์เกิดขึ้นโดยไม่ต้องจ่ายอากาศจากถังคอมเพรสเซอร์อีกต่อไปเนื่องจากความเป็นสูญญากาศของห้องเผาไหม้จะดึงอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ได้เองแล้วเปลวไฟของวัฏจักรที่แล้วจะไหลย้อนกลับมาจุดระเบิดวัฏจักรใหม่ทันทีทำให้หัวเทียนถูกใช้จุดระเบิดในช่วงสตาร์ทห้องเผาไหม้เพียงช่วงเดียว หลังจากนั้นรอนห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เริ่มทำการวัดอุณหภูมิของลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตรงกลางปากทางออกของท่อส่งโดยวัดห่างจากปากทางออกของท่อส่งในทิศทาง X ดังรูปที่ 12 ห่างออกเป็นจำนวนเท่าของขนาดท่อส่ง 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D ซึ่งการวัดอุณหภูมิจะวัดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลส่งข้อมูลอุณหภูมิมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์โดยการเก็บค่าของอุณหภูมิในเวลาที่ 1 Hz ส่วนความเร็วของเจ็ทลมร้อนจะวัดผลต่างของความดันด้วยหัววัด Pitot Tube แล้วแสดงผลของผลต่างความดันด้วยความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ (Manometer) ได้ค่าความสูงแล้วจึงนำไปคำนวณหาค่าความเร็วต่อไป



รูปที่ 12 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

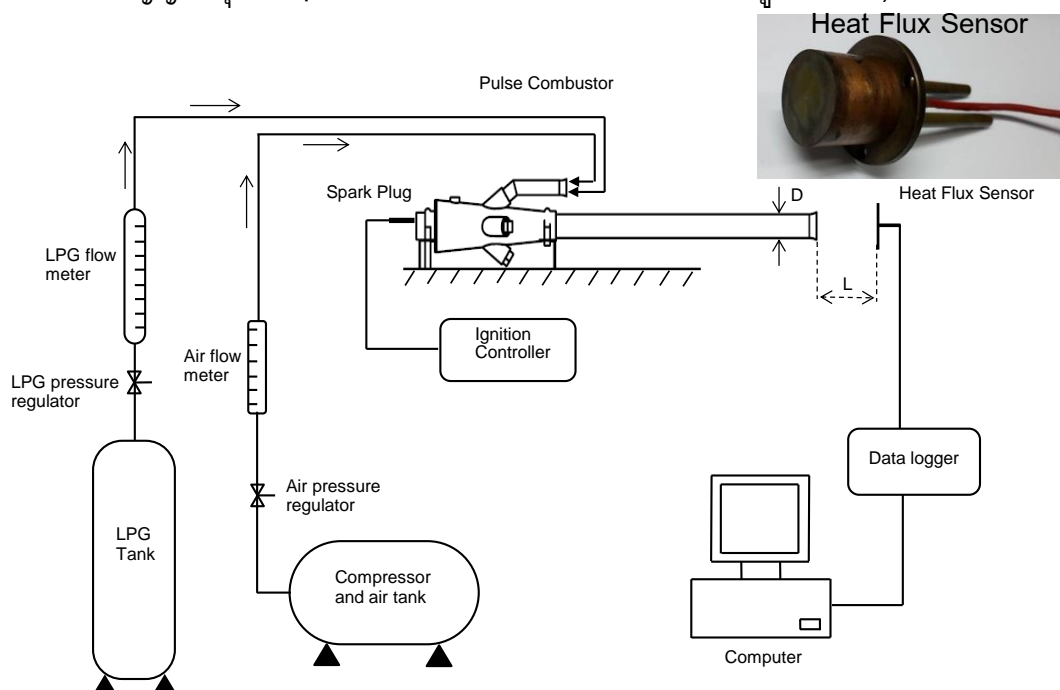
## 5.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน

### 5.2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 13 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนที่ปากทางออกของท่อส่งที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองก็จะเหมือนกับหัวข้อ 5.1.1 แต่จะเปลี่ยนจากชุดหัววัดอุณหภูมิและชุดหัววัดผลต่างความดันไปเป็นหัววัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชน (Heat Flux Sensor) ซึ่งหัววัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนประกอบด้วยหัววัดการถ่ายเทความร้อนซึ่งประกบเข้ากลางแผ่นเหล็กวงกลมหนา 6 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ทำเป็นแผ่นพุ่งชนโดยที่หัววัดการถ่ายเทความร้อนจะใช้น้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนตลอดเวลาโดยจะตั้งอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนไว้ที่ 1.9 l/min และอุณหภูมิน้ำ 28°C การวัดค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนจะวัดออกไปจากปากทางออกของท่อส่งเป็นระยะเท่าของขนาดท่อส่ง (L) = 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D

### 5.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองดังรูปที่ 13 ที่แสดงก็มีวิธีการเดินเครื่องเหมือนกับหัวข้อ 5.1.2 แต่จะแตกต่างอยู่ที่กระบวนการวัดซึ่งหลังจาก روشنห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เริ่มทำการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนของเจ็ทลมร้อนที่ปากทางออกของท่อส่งด้วยหัววัดฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Sensor) ซึ่งส่งข้อมูลมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ผ่าน Data logger การเก็บค่าของหัววัดจะเก็บทุกๆวินาทีโดยเก็บเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า (Volt) โดยค่าที่ใช้คือ  $1 \text{ mV} = 0.8 \text{ W/cm}^2$  (หัววัดการถ่ายเทความร้อนของบริษัท Vatel รุ่น TG-1000-0 ด้วยตัวขยายสัญญาณรุ่น Amp 15 ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอยู่ที่  $\pm 3\%$ )



### รูปที่ 13 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

## 5.3 การศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่งและในห้องเผาไหม้

### 5.3.1 ชุดทดลอง

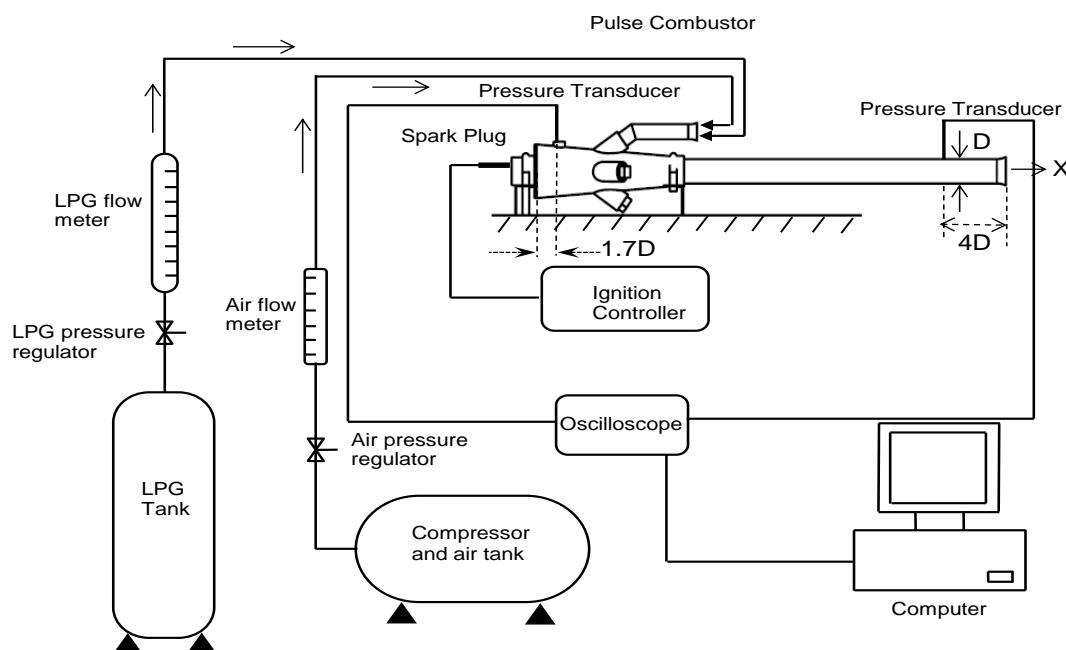
รูปที่ 14 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งไปพร้อมๆกันเพื่ออธิบายผลของความดันที่เกิดขึ้นและจากผลของความดันนำไปสู่การวิเคราะห์ความถี่ที่เกิดขึ้นได้ สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 5.1.1 แต่จะเปลี่ยนจากชุดหัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type K) และชุดหัววัดผลต่างความดัน (Pitot Tube) ไปเป็นหัววัดความดัน (Pressure Transducer) และออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) หัววัดความดัน (Pressure Transducer) เป็นของบริษัท OMEGA รุ่น DPX101 ซึ่งรองรับความดันแก๊สสูงสุดอยู่ที่ 250 PSI (17.24 bar) และช่วงของอุณหภูมิที่หัววัดสามารถทำงานได้อยู่ที่ (-75°C ถึง 120°C) ค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอยู่ที่ ( $\pm 2.5\%$ )

(2) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นตัวรับสัญญาณที่ส่งมาจากหัววัดความดันโดยเก็บค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งผ่านค่าเข้ามาบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์

### 5.3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองดังรูปที่ 14 ที่แสดงก็มีวิธีการเดินเครื่องเหมือนกับหัวข้อ 5.1.2 แต่จะแตกต่างอยู่ที่กระบวนการวัดซึ่งหลังจากนั้นรอจนห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เริ่มทำการวัดความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และท่อส่งไปพร้อมๆกันโดยการอ่านค่าด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) แล้วส่งค่าไปบันทึกในคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยที่หัววัดความดันในตำแหน่งของห้องเผาไหม้และท่อส่งซึ่งวัดเข้ามาเป็นระยะ 4 เท่าของขนาดท่อส่งจากปากทางออกจะถูกติดตั้งบนพอร์ตท่อกลมขนาด 6 mm สูงขึ้นมา 20 cm เนื่องจากหัววัดความดันทนอุณหภูมิสูงๆไม่ได้ (สัญญาณทางไฟฟ้าที่หัววัดความดันส่งมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ 1 mV = 0.05 PSI)



รูปที่ 14 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งไปพร้อม ๆ กัน

#### 5.4 ศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Ver.13)

จุดประสงค์ในการจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์เพื่อดูรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศส่งผลต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์อย่างไร ในที่นี้จะใช้โปรแกรม ANSYS Ver.13 (CFX) ในการจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์และเทคนิคการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของตัวโปรแกรม ANSYS CFX V.13 จะเป็นวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

##### 5.4.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหล

CFD เป็นการแก้ปัญหาของของไหลที่สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นจะทำการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลแต่ละปริมาณสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะเรียกว่า “สมการควบคุม (Governing equations)” สมการควบคุมที่ใช้ในการแก้ปัญหการไหลด้วย CFD ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม



สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล

$u$  = ความเร็วของของไหล

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (The Momentum Equations)

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$P$  = ความดันสถิตที่กระทำต่อของไหล

$g_i$  = แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อของไหล

$F_i$  = แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Equations)

เป็นสมการพลังงานที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow)

$$\rho \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h \vec{v}) \right] = -\frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi \quad (4)$$

$t$  = เวลา (time)

$h$  = เอนทัลปีจำเพาะจากพลังงานภายใน (Specific Enthalpy)

$P$  = ความดันที่กระทำกับของไหล (Pressure)

$K$  = ค่าการนำความร้อนของของไหล (Thermal Conductivity)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature)

$\phi$  = ฟังก์ชันการกระจายตัวของงานเนื่องจากแรงหนืด (Dissipation Function Representing the Work)

#### 5.4.2 แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน (Standard k- $\epsilon$ model)

แบบจำลองความปั่นป่วนสามารถสร้างสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้แม้กระทั่งอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน,  $\epsilon$  หากแต่สมการการเคลื่อนย้ายของ  $\epsilon$  นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากและไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง k- $\epsilon$  แบบมาตรฐานจะมีแบบจำลองการเคลื่อนย้ายพารามิเตอร์เพียง 2 ตัว คือ k และ  $\epsilon$  ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์

การใช้ค่า k และ  $\epsilon$  กำหนดเพื่อเป็นตัวบ่งชี้เชิงความเร็วและตัวบ่งชี้เชิงขนาดของ Turbulent eddies ได้ดังนี้

$$\mathcal{G} = k^{1/2}, \quad l = k^{3/2}/\epsilon \quad (5)$$

เมื่อใช้หลักของการสร้างเทอมของ Turbulent Viscosity จาก Mixing Length model มาพิจารณาจะได้

$$\mu_t = c_p \nu l = \rho c_\mu (k^2/\epsilon) \quad (6)$$

โดยที่ค่า  $c_\mu$  เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่

สำหรับแบบจำลอง k- $\epsilon$  มาตรฐานจะใช้สมการการถ่ายโอนต่อไปสำหรับ k และ  $\epsilon$

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial x_i} k_i \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial}{\partial x_i} \epsilon_i \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

ในสมการจะมีค่าคงที่อยู่ที่ทั้งสิ้น 5 ตัวซึ่งสามารถปรับค่าเพื่อใช้ได้กับลักษณะการไหลที่หลากหลายได้ดังนี้

$$c_\mu = 0.09; \quad \sigma_k = 1; \quad \sigma_\epsilon = 1.30, \quad c_{1\epsilon} = 1.44, \quad c_{2\epsilon} = 1.92$$

เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดได้แก่

สมการการเคลื่อนย้ายของ  $k$  และ  $\varepsilon$  เป็นสมการจำพวก elliptic เนื่องจากอิทธิพลของเทอมการแพร่ซึ่งทำให้มีความจำเป็นที่ต้องกำหนดเงื่อนไขค่าขอบไว้

|                          |   |
|--------------------------|---|
| ทางเข้า                  | : ค่าของ $k$ และ $\varepsilon$ จะต้องกำหนด  |
| ทางออกและบริเวณแกนสมมาตร | : $\frac{\partial k}{\partial \eta} = 0$ และ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} = 0$ |
| การไหลอิสระ              | : $k = 0$ และ $\varepsilon = 0$   |

นอกจากนี้เราสามารถประมาณการค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  อย่างคร่าวๆ ได้จากความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity)  $T_i$  และค่าบ่งชี้เชิงขนาด  $L$  ของช่องการไหล โดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \frac{3}{2}(U_{ref} T_i)^2; \varepsilon = c_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}; l = 0.07L$$

สำหรับค่าของ  $k$  และ  $\varepsilon$  บริเวณใกล้ผนัง สามารถคำนวณได้โดยแยกเป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ ซึ่งกำหนดโดย  $30 < y_p^+ < 500$  โดยให้แกน  $y$  มีทิศทางตั้งฉากจากผนังและตำแหน่งที่พิจารณาและ  $y_p^+$  คือ Dimensionless distance

ที่บริเวณนี้ค่าความเร็วกระจายตัวแบบลอกกาลิที่มกับระยะทาง  $y$  อัตราการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะเท่ากับอัตราการสูญเสีย

$$U^+ = \frac{U}{\mu_\tau} = \frac{1}{K} \ln(E y_p^+); k = \frac{\mu_\tau^2}{\sqrt{c_\mu}}; \varepsilon = \frac{\mu_\tau^3}{K y} \quad (9)$$

โดยที่ค่าคงที่ของ Von Karman ( $K$ ) เท่ากับ 0.41 และ Wall roughness factor,  $E$  สำหรับผนังเรียบเท่ากับ 9.8 ในกรณีของผนังขรุขระเราสามารถหาค่าดังกล่าวได้จาก Schlichting. [20]

สำหรับการถ่ายเทความร้อนจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการนี้

$$T^+ = - \frac{(T - T_w) c_p \rho \mu_\tau}{q_w} = \sigma_{\tau,t} [u^+ + P \left( \frac{\sigma_{\tau,\ell}}{\sigma_{\tau,t}} \right)] \quad (10)$$

เมื่อ

$T_p$  = อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง  $y_p$

$T_w$  = อุณหภูมิที่ผนัง

- $q_w$  = ฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง  
 $C_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล  
 $\sigma_{T,t}$  = ค่า Turbulent Prandtl number  
 $\sigma_{T,l}$  = Laminar Prandtl number  
 $\Gamma_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)  
 $P$  = เป็นฟังก์ชันการแก้ค่าซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง laminar Prandtl number กับ turbulent Prandtl number

กรณีที่ 2 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำๆ สมการการถ่ายโอน  $k$  และ  $\varepsilon$  จะมี Wall damping function มาเสริมในสมการที่ (7) และ (8) จะได้สมการดังนี้

$$\mu_t = \rho c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \varepsilon \right] + c_{1\varepsilon} f_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - c_{2\varepsilon} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ความหนืดไม่สามารถตัดทิ้งได้และ Wall-damping function เป็นดังนี้ [21]

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 Re_y)]^2 \quad (14)$$

$$f_1 = \left(1 + \frac{0.05}{f_\mu}\right); f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2) \quad (15)$$

$$Re_y = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\nu} y \quad (16)$$

$$Re_t = \frac{k l}{\nu} = \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \quad (17)$$

### 5.4.3 แบบจำลองการเผาไหม้และแผ่รังสี (Combustion and Radiation Model)

#### แบบจำลองการเผาไหม้ The Eddy Dissipation Model

แบบจำลอง Eddy Dissipation เป็นพื้นฐานของแนวคิดทางปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) เมื่อสารตั้งต้นผสมกันในระดับโมเลกุลมันจะเกิดเป็นรูปของผลิตภัณฑ์ทันที ซึ่งโมเดลนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการผสมสารตั้งต้นในระดับโมเลกุล ในการไหลแบบปั่นป่วนเวลาที่เกิดการผสมจะถูกควบคุมด้วยคุณสมบัติของการหมุนวน (eddy) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ Turbulent kinetic energy,  $k$ , และ dissipation,  $\varepsilon$

$$\text{rate} \propto \frac{\varepsilon}{k} \quad (18)$$

แนวคิดของการควบคุมปฏิกิริยานี้มีผลบังคับใช้ได้ใปัญหาการเผาไหม้ในหลายๆอุตสาหกรรมที่มีอัตราการตอบสนองที่รวดเร็วเมื่อเทียบกับอัตราการผสมกันของสารตั้งต้น ในโมเดลของ Eddy Dissipation , อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเบื้องต้น ( $k$ ) หาได้จาก 2 สมการนี้

ขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น

$$R_k = A \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{[I]}{V_k}\right) \quad (19)$$

เมื่อ  $[I]$  เป็นความเข้มข้นของส่วนประกอบ  $I$  และ  $I$  เป็นส่วนประกอบของสารตั้งต้น

ขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์

$$R_k = AB \frac{\varepsilon}{k} \frac{\varepsilon_p(l)W_l}{\varepsilon_p V_k W_l} \quad (20)$$

เมื่อ  $P$  คือตัวจักรทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยา  $k$   
 ขอบเขตของผลิตภัณฑ์ถูกปิดใช้งานเมื่อสัมประสิทธิ์ของค่า  $B$  ถูกกำหนดให้เป็นค่าลบ ทั้งการเกิดปฏิกิริยาหนึ่งขั้นตอนและหลายขั้นตอนจะถูกกำหนดให้ปิดใช้งาน (set to -1) แต่จะเปิดใช้งานเมื่อกำหนดค่า  $B$  เป็นบวก (แม้ว่าไม่แนะนำสำหรับปฏิกิริยาหลายขั้นตอน)

### แบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน (The P<sub>1</sub> Model)

P<sub>1</sub> เป็นสมการอย่างง่ายของการแผ่รังสีความร้อนในสมการการเคลื่อนย้ายซึ่งจะสมมุติให้ความเข้มข้นของการแผ่รังสีเท่ากันในทุกทิศทาง (Isotropic) สมการการแผ่รังสีความร้อนเต็มรูปและอนุพันธ์ของแบบจำลอง P<sub>1</sub> สำหรับการแผ่รังสีความร้อนที่ไม่มาก สเปกตรัมของการแผ่รังสีความร้อนในการจำกัดการแพร่สำหรับการเปล่งแสง การดูดซับแสง และการกระจายเป็นเส้นตรงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_{rv} = -\left(\frac{1}{3(k_{av} - k_{sv}) - Ak_{sv}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial x_i} G_v\right) \quad (21)$$

สมการสำหรับสเปกตรัมของการแผ่รังสีความร้อนเกิดจากการแทนค่าในเทอมของการแผ่รังสีความร้อนในสมการเคลื่อนย้าย

$$-\left(\frac{1}{3(k_{av} - k_{sv}) - Ak_{sv}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} G_v\right)\right) = k_{av}(E_{bv} - G_v) \quad (22)$$

A คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้น anisotropy

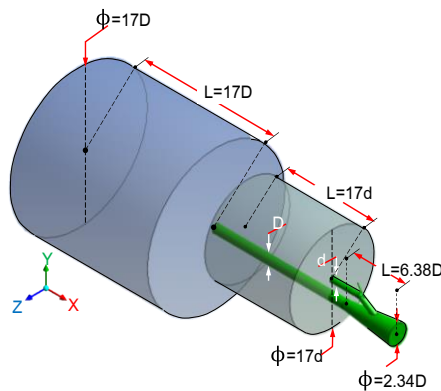
#### 5.4.4 การสร้างแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์

การสร้างแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Ver.13 (CFX)) จะสร้างโดยออกแบบทางเข้าอากาศ 4 รูปแบบที่แตกต่างกันตามการทดลองซึ่งรูปแบบทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบมีดังนี้ (1) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อทางเข้าอากาศเดียว, (2) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 180°, (3) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 180°, และ (4) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสามท่อที่ห่างกัน 90° โดยที่ความยาวของท่อส่งจะคงที่ไว้ในทุกกรณีอยู่ที่ 16 เท่าของขนาดท่อส่ง เพื่อดูผลจากทางเข้าอากาศที่แตกต่างกันทำให้เกิดปรากฏการณ์ในห้องเผาไหม้และในท่อส่งเป็นอย่างไร ในการจำลองนี้ใช้เชื้อเพลิงเป็นโพรเพนโดยใช้ปฏิกิริยาของ A propan-air five step จ่ายเข้าห้องเผาไหม้และการคำนวณใน 3 มิติเป็นแบบไม่คงตัว (unsteady) อัดตัวได้ (compressible) โดยที่แบบจำลองการเผาไหม้แบบ The Eddy Dissipation, การแผ่รังสีความร้อนแบบจำลอง P<sub>1</sub> radiative, และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k-ε ส่วนรูปแบบในการคำนวณเป็นแบบแผนการคำนวณไม่คงตัวลำดับที่สอง (The second order transient scheme) และแผนการแก้ไขปัญหาในระดับสูง (high-resolution advection scheme) รูปแบบของโมเดลที่ใช้ในการจำลองปรากฏการณ์การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จะแบ่งออกเป็น 4 โมเดลหลักโดยแบ่ง

ตามรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศที่ติดตั้งไว้บนห้องเผาไหม้ในสี่รูปแบบซึ่งแต่ละโมเดลในการจำลองจะแบ่งออกเป็นสามโดเมนหลักในการคำนวณดังนี้ (1) โดเมนของอากาศบริเวณท่อทางเข้าอากาศและรวมไปถึงท่อทางเข้าอากาศด้วยโดยอากาศบริเวณท่อทางเข้าอากาศจะเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 17 เท่าของขนาดท่อทางเข้าอากาศและยาวออกไปเป็น 17 เท่าของท่อทางเข้าอากาศด้วยเช่นกัน (2) โดเมนของห้องเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยซึ่งมีขนาดเท่ากับขนาดของห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง และ (3) โดเมนของท่อส่งรวมไปถึงอากาศบริเวณโดยรอบของท่อส่งด้วยซึ่งอากาศบริเวณโดยรอบของท่อส่งเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 17 เท่าของท่อส่งและยาวออกไปเป็น 17 เท่าของท่อส่งด้วยเช่นกัน ส่วนรูปแบบของกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จะเป็นกริดสามเหลี่ยมซึ่งความหนาแน่นของกริดจะมากในส่วนของตัวห้องเผาไหม้แต่ในส่วนของอากาศจะหนาแน่นในส่วนที่ใกล้กับปากทางออกของท่อส่งและปากทางแกของท่อทางเข้าอากาศโดยที่ทั้งสี่โดเมนจะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ (elements) ได้ประมาณ 1,555,200 ถึง 2,000,000 ส่วนที่ใช้ในการคำนวณและในส่วนของกริดจะใส่ฟังก์ชันอินฟเลชัน (Inflation) ใช้สำหรับการไหลบริเวณขีดผิวให้การคำนวณที่ละเอียดขึ้นซึ่งจะแสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

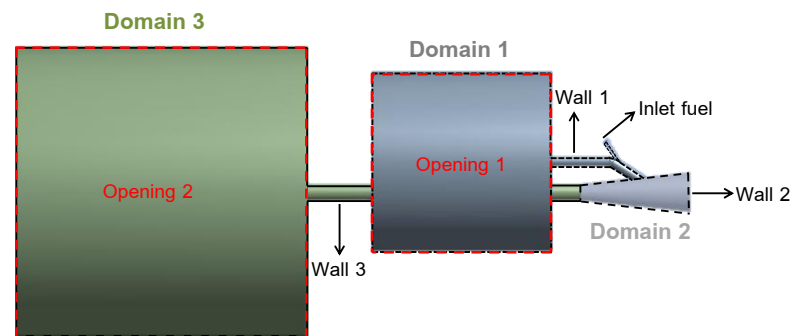
#### แบบจำลองของห้องเผาไหม้

(1).ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดี่ยว

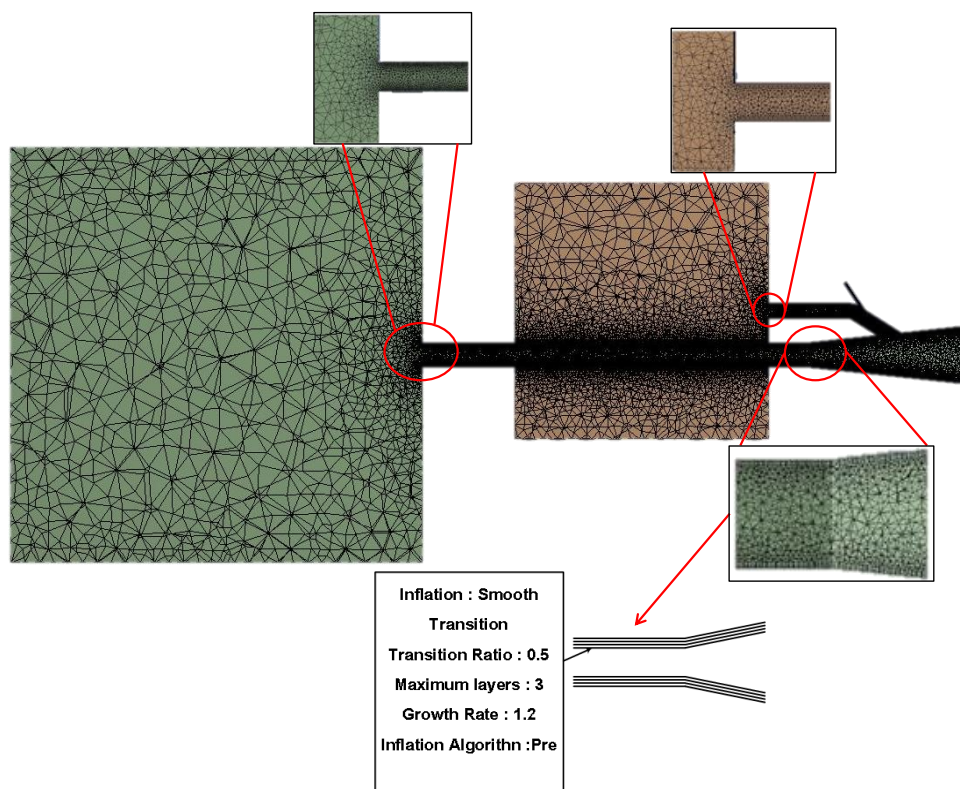


รูปที่ 15 แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดี่ยว

(  $D = 47 \text{ mm}$ ,  $d = 29 \text{ mm}$  )



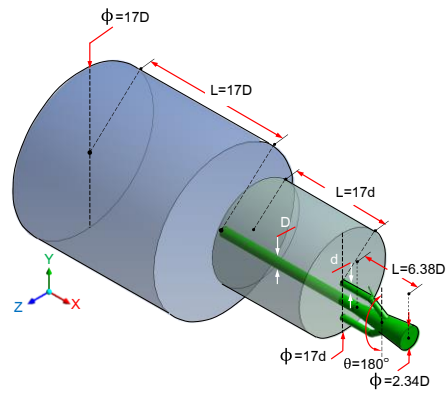
รูปที่ 16 แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดี่ยว ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)



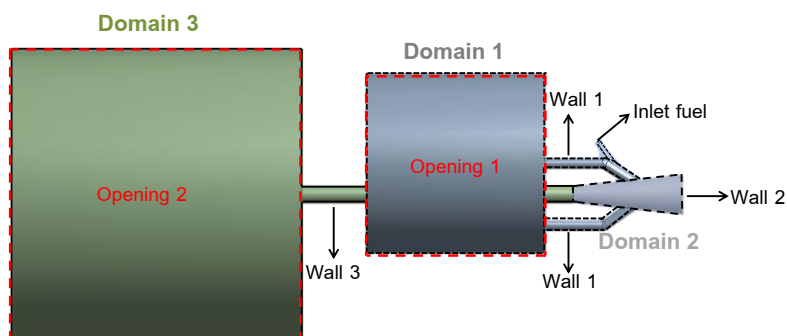
รูปที่ 17 แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดี่ยว



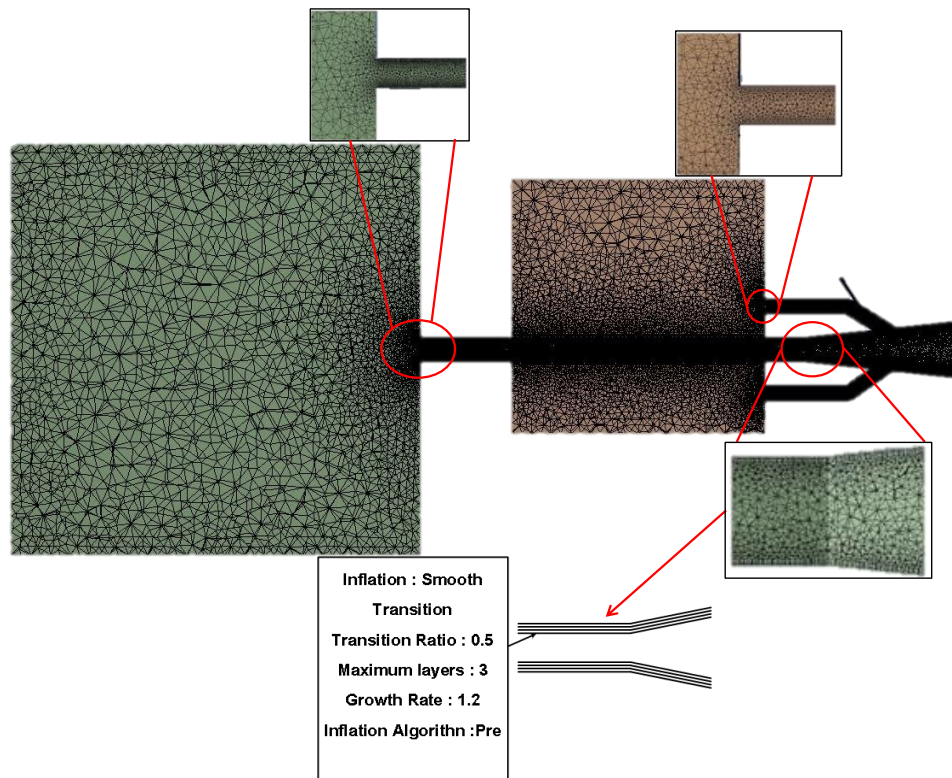
(2).ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$



รูปที่ 18 แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ( $D = 47 \text{ mm}$ ,  $d = 29 \text{ mm}$ )

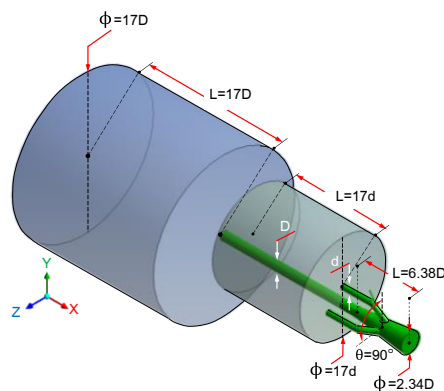


รูปที่ 19 แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)

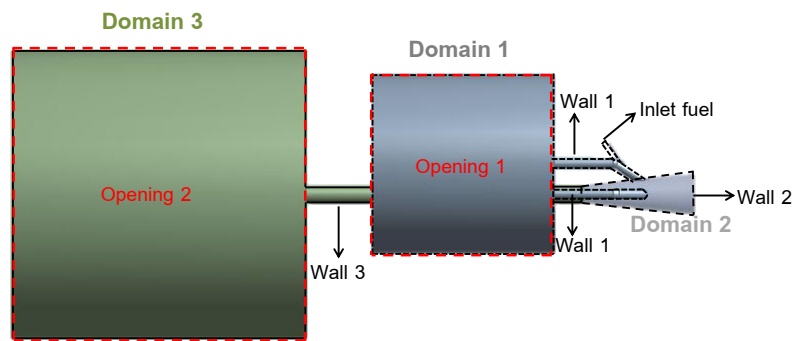


รูปที่ 20 แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$

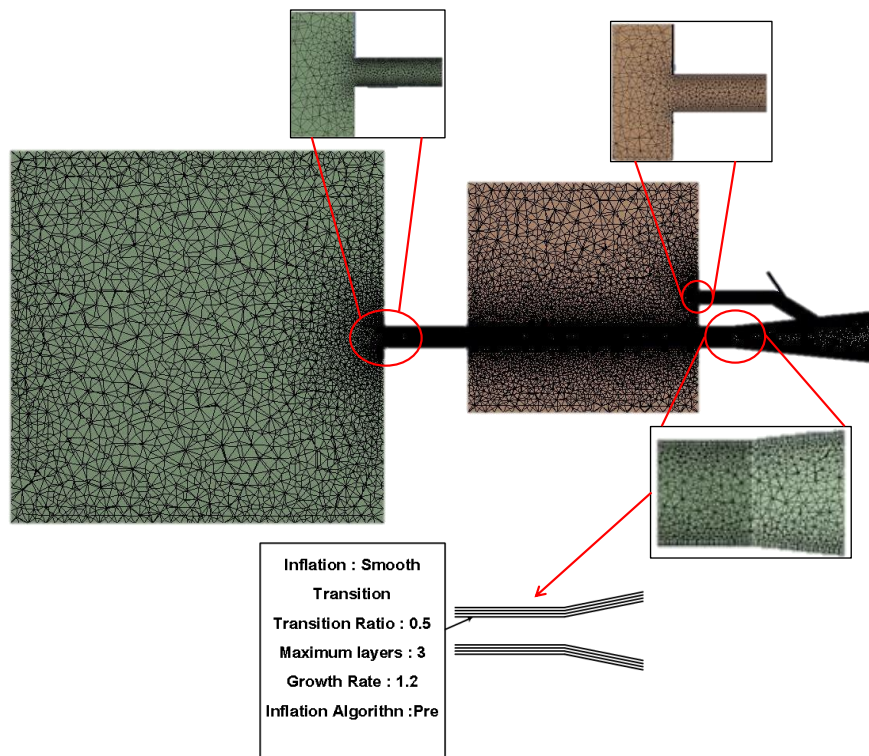
(3).ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $90^{\circ}$



รูปที่ 21 แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $90^{\circ}$  ( $D = 47 \text{ mm}$ ,  $d = 29 \text{ mm}$ )

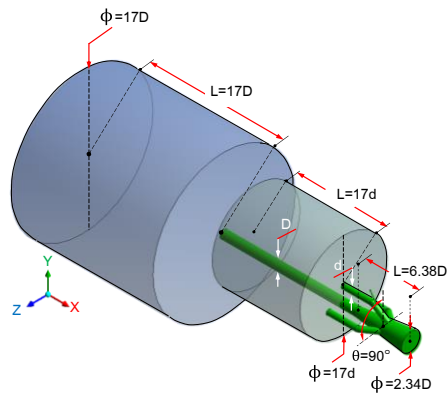


รูปที่ 22 แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)

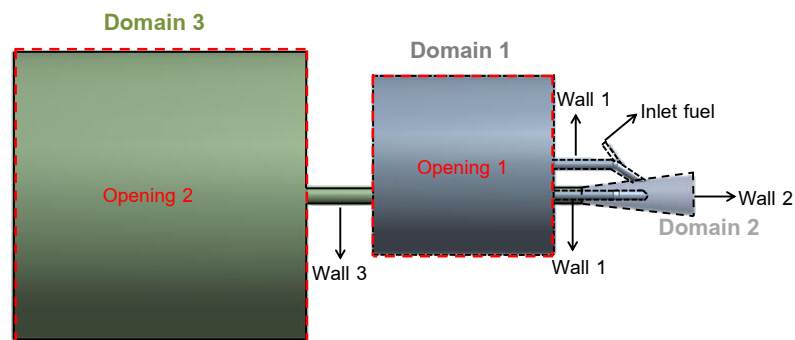


รูปที่ 23 แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$

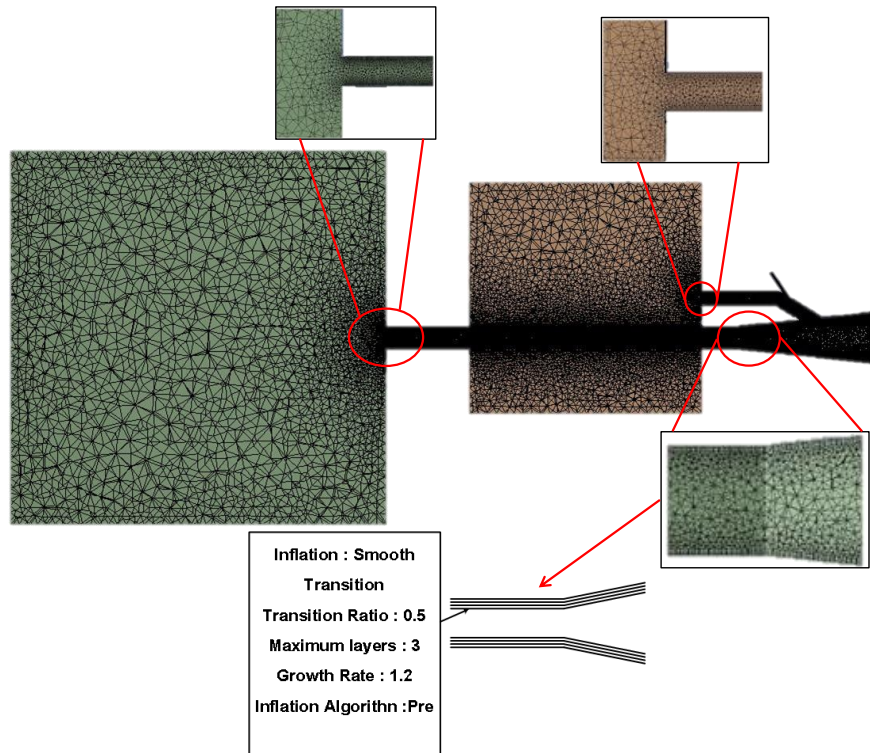
(4).ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสามท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$



รูปที่ 24 แสดงแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสามท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ( $D = 47 \text{ mm}$ ,  $d = 29 \text{ mm}$ )



รูปที่ 25 แสดงแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)



รูปที่ 26 แสดงรูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อกี่ห่างกัน  $90^{\circ}$

### เงื่อนไขขอบเขตการจำลองปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบพัลส์

การจำลองการเผาไหม้จะแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็นสามโดเมนหลักดังนี้

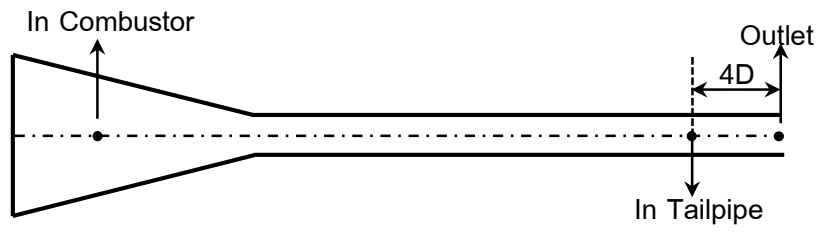
1. โดเมนหนึ่งจะเป็นส่วนของอากาศบริเวณช่องทางเข้าอากาศและช่องทางเข้าอากาศซึ่งการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ( $t=0s$ ) ความเร็วของไหลในโดเมนหนึ่งในแนวแกน X,Y,Z จะกำหนดให้เท่ากับ 0 m/s ความดันเกจของไหลในโดเมนจะกำหนดเท่ากับ 0 Pa อุณหภูมิของไหลในโดเมนเท่ากับ 306 K ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิอากาศในตอนแรกที่ทดลอง ค่าความปั่นป่วนของไหลในโดเมนจะกำหนดให้มีค่าปานกลางคือความเข้มข้นของความปั่นป่วนเท่ากับ 5% ค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีจะตั้งไว้ที่อัตราส่วนของโปรแกรม ส่วนรายละเอียดของส่วนประกอบของสารที่ผสมอยู่ในโดเมนจะกำหนดให้เป็นอากาศซึ่งประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 0.78 โดยเศษส่วนมวล ก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.2 โดยเศษส่วนมวล น้ำเท่ากับ 0.001 โดยเศษส่วนมวล และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.019

2. โดเมนสองจะเป็นส่วนของห้องเผาไหม้เพียงอย่างเดียวซึ่งการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ( $t=0s$ ) ความเร็วของไหลในโดเมนสองจะกำหนดเหมือนโดเมนหนึ่ง ความดันเกจของไหลในโดเมนสองจะกำหนดเท่ากับ -12000 Pa ให้ความดันเป็นสุญญากาศเพื่อให้อากาศจาก

โดเมนหนึ่งและสามเข้ามาผสมด้วย อุณหภูมิของไหลในโดเมนจะกำหนดให้เท่ากับ 783 K เพื่อให้เชื้อเพลิงที่เติมเข้ามาผสมกับอากาศในตอนแรกเกิดการระเบิดขึ้น ค่าความปั่นป่วนและค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีจะกำหนดเหมือนโดเมนหนึ่งแต่รายละเอียดของส่วนประกอบของสารที่ผสมกันในโดเมนจะประกอบด้วย ก๊าซโพรเพน 0.0898 โดยเศษส่วนมวลผสมกับอากาศ ซึ่งมีก๊าซไนโตรเจน 0.6982 โดยเศษส่วนมวลและก๊าซออกซิเจน 0.212 โดยเศษส่วนมวล ซึ่งในเวลาเริ่มต้นจะจำลองให้เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เริ่มเกิดการระเบิดขึ้น

3.โดเมนสามจะเป็นส่วนของท่อส่งและอากาศบริเวณปากทางออกของท่อส่งซึ่งการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ( $t=0$ ) ความเร็วและความดันเกจของไหลในโดเมนจะกำหนดเหมือนโดเมนหนึ่งแต่อุณหภูมิของไหลในโดเมนเริ่มต้นเท่ากับ 673 K ค่าความปั่นป่วนของโดเมนความเข้มข้นของการแผ่รังสีและรายละเอียดของสารจะกำหนดเหมือนโดเมนที่หนึ่งเช่นกัน

จากโดเมนหลักก็จะประกอบด้วยสามขอบเขต (Boundaries) ย่อยที่อยู่ในโดเมนหลักซึ่งประกอบไปด้วย (1) ขอบเขตของเชื้อเพลิงขาเข้าซึ่งอยู่ในโดเมนหนึ่งรูปแบบการไหลความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 0.0012435 Kg/s ค่าความปั่นป่วนของการไหลปานกลางความเข้มข้นของความปั่นป่วน 5% อุณหภูมิของเชื้อเพลิงขาเข้าเท่ากับ 306 K และรายละเอียดของสารในขอบเขตของเชื้อเพลิงทางเข้าประกอบด้วยก๊าซโพรเพนเท่ากับ 1 โดยเศษส่วนมวลและก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.212 โดยเศษส่วนมวล (2) ขอบเขตของโอเพนนิ่งซึ่งมีคุณสมบัติให้ของไหลไหลเข้าและไหลออกภายในขอบเขตซึ่งจะอยู่ในโดเมนหนึ่งและโดเมนสามโดยจะกำหนดค่าของความดันเกจเท่ากับ 0 Pa เป็นบรรยากาศที่เราอยู่ ค่าความปั่นป่วนภายในขอบเขตปานกลางความเข้มข้นของความปั่นป่วน 5% อุณหภูมิของไหลภายในขอบเขตเท่ากับ 306 K และรายละเอียดของสารประกอบในขอบเขตนี้จะกำหนดให้เป็นอากาศซึ่งประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 0.78 โดยเศษส่วนมวล, ก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.2 โดยเศษส่วนมวล น้ำเท่ากับ 0.001 โดยเศษส่วนมวล และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.019 และ (3) ขอบเขตของผนังซึ่งอยู่ในทั้งสามโดเมนหลักคุณสมบัติของผนังกำหนดให้ผนังไม่ลื่นไหล ผิวเรียบ ไม่สะท้อนแสง เศษส่วนการแพร่กระจายเท่ากับ 1 ส่วนอุณหภูมิของผนังได้จากการวัดอุณหภูมิจริงจากชุดทดลองจริงซึ่งในโดเมนที่หนึ่งกำหนดอุณหภูมิตั้งที่ 558.35 K อุณหภูมิของผนังในโดเมนสองและสามจะเป็นฟังก์ชันและลดลงตามความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (X) ซึ่งฟังก์ชันของอุณหภูมิของผนังในโดเมนสอง  $T(X) = 510.91 + 2984.5143X - 7251.4286X^2$  [K] และผนังในโดเมนสาม  $T(X) = 661.7384 + 404.0786X$  [K]



รูปที่ 27 แสดงตำแหน่งติดตั้งผลจากการจำลองพฤติกรรมกระแไหลแบบพัลส์







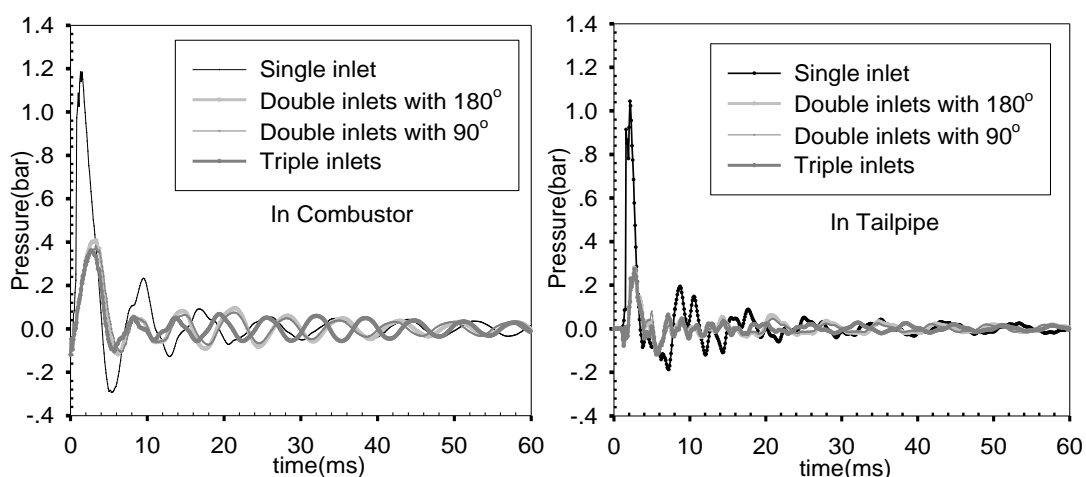
## 6. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองและจำลองพฤติกรรมผลการเผาไหม้จะแยกการอภิปรายผลออกเป็นหัวข้อหลักด้วยกันโดยหัวข้อแรกจะอภิปรายผลการศึกษาปรากฏการณ์ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ หัวข้อสองจะอภิปรายผลการวัดความเร็วเฉลี่ย อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ หัวข้อสามจะอภิปรายผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง หัวข้อสี่จะอภิปรายผลการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และท่อส่ง และหัวข้อที่ห้าเป็นหัวข้อสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลจากพฤติกรรมผลการเผาไหม้แบบพัลส์เทียบกับผลการทดลองซึ่งจะอภิปรายผลดังนี้

### 6.1 ผลการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบพัลส์ในห้องเผาไหม้ด้วยกระบวนการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Version 13.0, CFX)

#### 6.1.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดียวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ

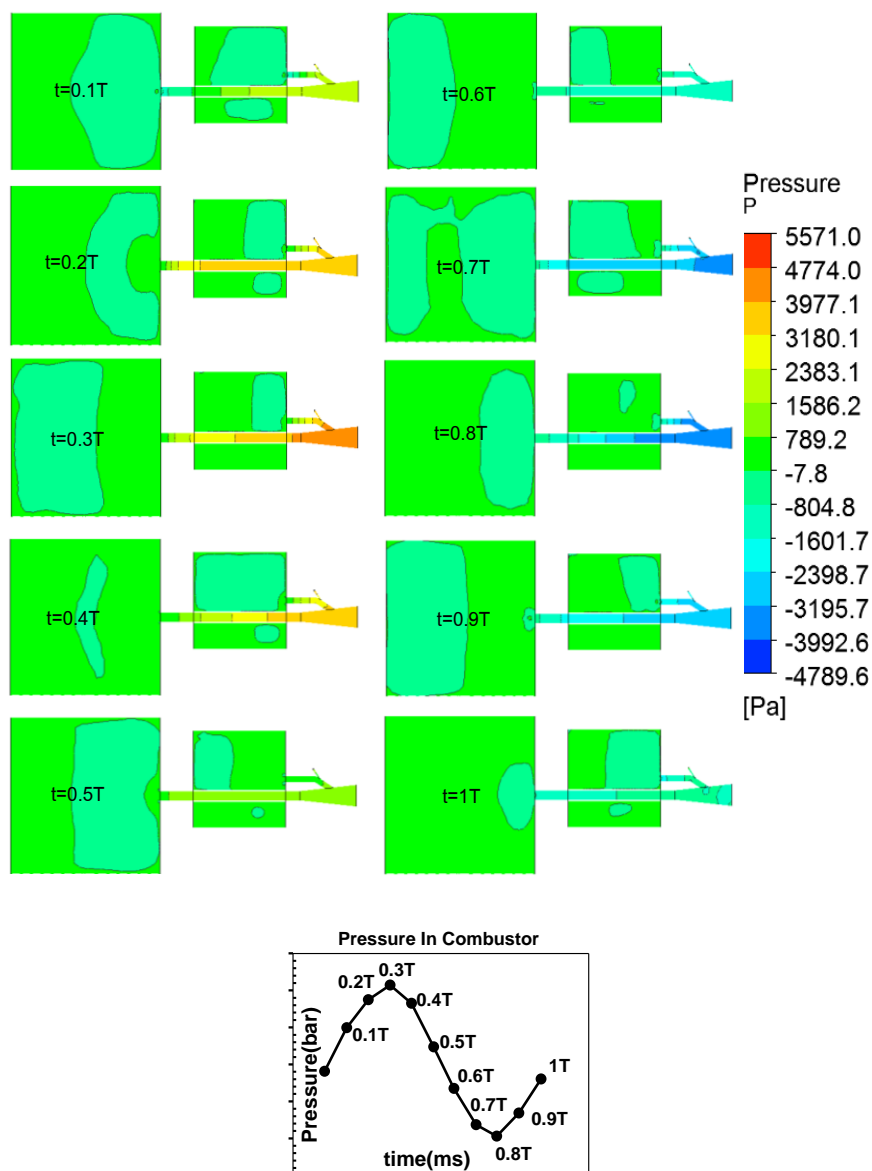
ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่ง ตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจากการจำลองพฤติกรรมผลการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สโพรเพนในอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ 1.2435 g/s พบว่าผลของความดันเริ่มรันคงตัวตั้งแต่วันที่ 40 ms ขึ้นไป จากการจำลองที่เกิดขึ้นผลของความดันในห้องเผาไหม้และในท่อส่งทั้ง 4 รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศให้ผลที่ใกล้เคียงกันซึ่งค่าความดันสูงสุดที่ปรากฏการณ์แบบพัลส์คงตัวแล้วในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.04 bar และค่าความดันต่ำสุดในห้องเผาไหม้อยู่ที่ -0.04 bar ส่วนในท่อส่งค่าความดันสูงสุดอยู่ที่ 0.025 bar และค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ -0.025 bar จากพฤติกรรมของความดันเหมือนกับการทดลองคือเป็นวัฏจักรการเผาไหม้มีการไหลเข้าของอากาศใหม่มาผสมและมีการไหลออกของไอเสียในตอนระเบิดซึ่งก็สามารถนำค่าต่างๆไปอธิบายพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ได้ในเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 28



**รูปที่ 28** ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการณ์เผาไหม้

### 6.1.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ

ผลการจำลองพฤติกรรมของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่พฤติกรรมแบบพัลส์เกิดขึ้นคงตัว เริ่มจากความดันในห้องเผาไหม้เริ่มสูงขึ้นด้วยการระเบิดของไอดี (อากาศกับเชื้อเพลิงผสมกัน) ที่เวลา 0.1T (0.1 คาบของวัฏจักร) จากการระเบิดก็ส่งผลให้ความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจนสูงสุดในเวลา 0.3T ด้วยความดันที่สูงในห้องเผาไหม้ก็จะดันไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ให้ไหลออกจากห้องเผาไหม้ไปสู่ท่อส่งจนความดันในห้องเผาไหม้ลดต่ำลงเท่ากับความดันบรรยากาศและห้องเผาไหม้เริ่มเป็นสูญญากาศที่เวลา 0.6T ความเป็นสูญญากาศของห้องเผาไหม้จะดึงอากาศรอบ ๆ ท่อทางเข้าอากาศและปากทางออกของท่อส่งให้ไหลเข้าห้องเผาไหม้ในทุกทิศทางซึ่งอากาศที่ดึงเข้ามานั้นรวมไปถึงไอเสียที่พ่นออกจากปากทางออกของท่อส่งด้วย จากการดึงอากาศใหม่เข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงจนถึงความเป็นสูญญากาศสูงสุดที่เวลา 0.8T ก็เกิดการระเบิดด้วยความร้อนจากไอเสียที่พ่นออกโดยการดึงกลับเข้าห้องเผาไหม้และความร้อนจากผนังของห้องเผาไหม้จากการระเบิดส่งผลให้ความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงความดันสูงสุดของวัฏจักรถัดไปซึ่งปรากฏการณ์ของความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าจะหยุดจ่ายเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 29

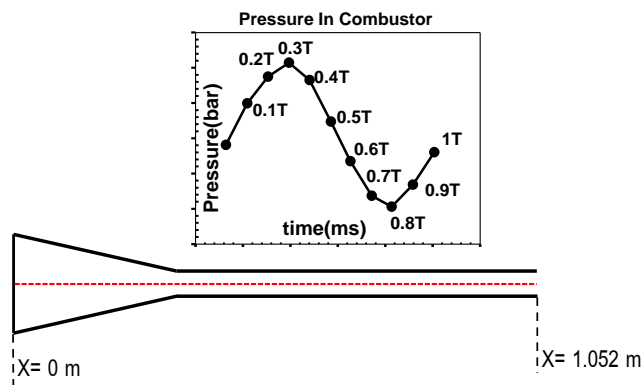


รูปที่ 29 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ

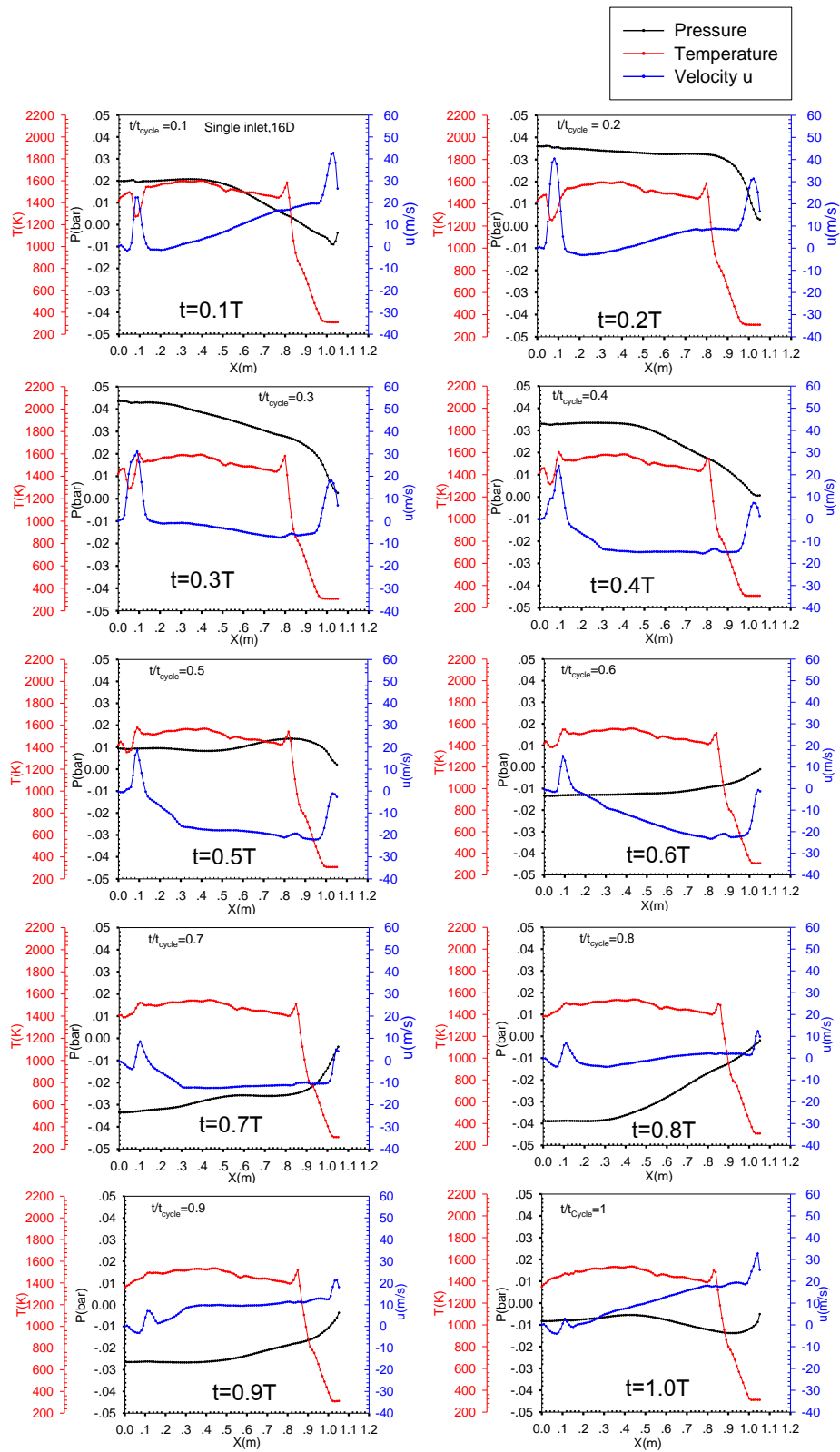
### 6.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ

การดึงผลของค่าความดัน อุณหภูมิ และความเร็วจะดึงค่าจากกึ่งกลางของห้องเผาไหม้เป็นเส้นตรงยาวตลอดจนถึงปลายของท่อส่งที่พฤติกรรมแบบพัลส์เกิดขึ้นคงตัวในระยะ  $X=0$  m ถึง  $X=1.052$  m แล้วดูผลของเวลาที่เปลี่ยนไปซึ่งจากกราฟเส้นสีดำจะเป็นผลของความดัน เส้นสีแดงจะเป็นผลของอุณหภูมิและเส้นสีน้ำเงินเป็นผลของความเร็วในทิศทางของแกน X

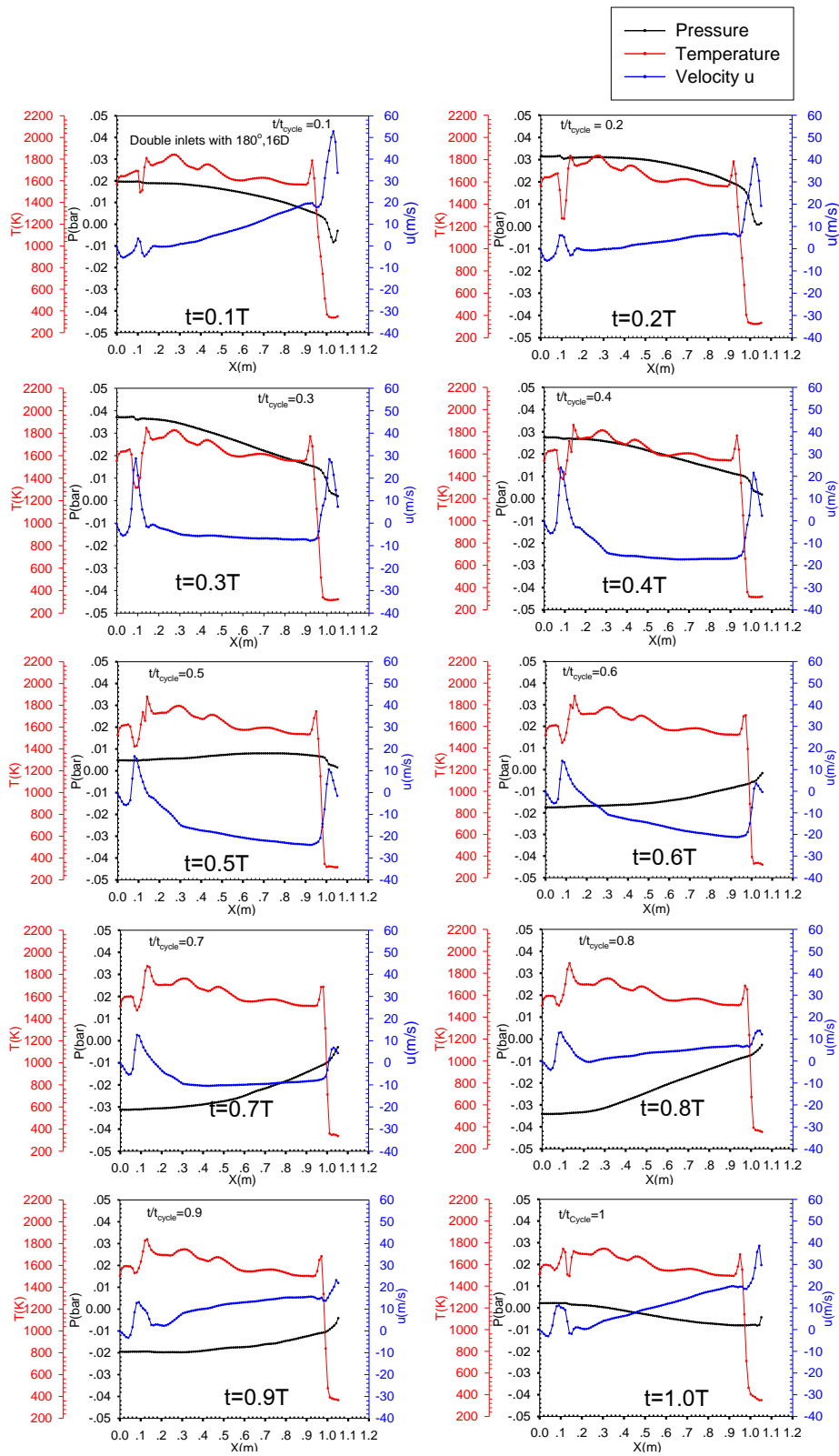
ซึ่งก็คือทิศทางเดียวกับการไหลเข้าออกของอากาศจากภายนอกเข้าห้องเผาไหม้หรือจากภายในห้องเผาไหม้สู่ภายนอก จากผลของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ 4 รูปแบบพบว่าผลของความดันและความเร็วมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ระยะต่างๆ แต่ผลของอุณหภูมิมีค่าคงที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงยังให้ค่าการจำลองที่ไม่เหมือนความเป็นจริงเพราะไม่เกิดการกวัดแกว่งตามผลของความดันที่มีการไหลเข้าออกของอากาศร้อนและอากาศภายนอกย่อมส่งผลให้เกิดการกวัดแกว่งของอุณหภูมิซึ่งในที่นี้ผลของอุณหภูมียังทำนายได้ไม่ดีพอแต่เมื่อมองถึงการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเข้าไปทำให้ผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตาม แต่ผลของความเร็และความดันให้ค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งผลของความดันก็สอดคล้องกับผลของความเร็โดยที่ความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้ย่อมให้ผลของความเร็ในห้องเผาไหม้มีค่าสูงตามในทิศทางที่พุ่งออกจากห้องเผาไหม้และเมื่อความเป็นสภาวะอากาศสูงสุดในห้องเผาไหม้ส่งผลให้ความเร็ก็มีค่าสูงขึ้นแต่ทิศทางจะพุ่งเข้าหาห้องเผาไหม้ด้วยการดูดอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ในทุกทิศทางซึ่งผลของความเร็และความดันจะเป็นเช่นนี้ในทุกรูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 31 ถึง 34



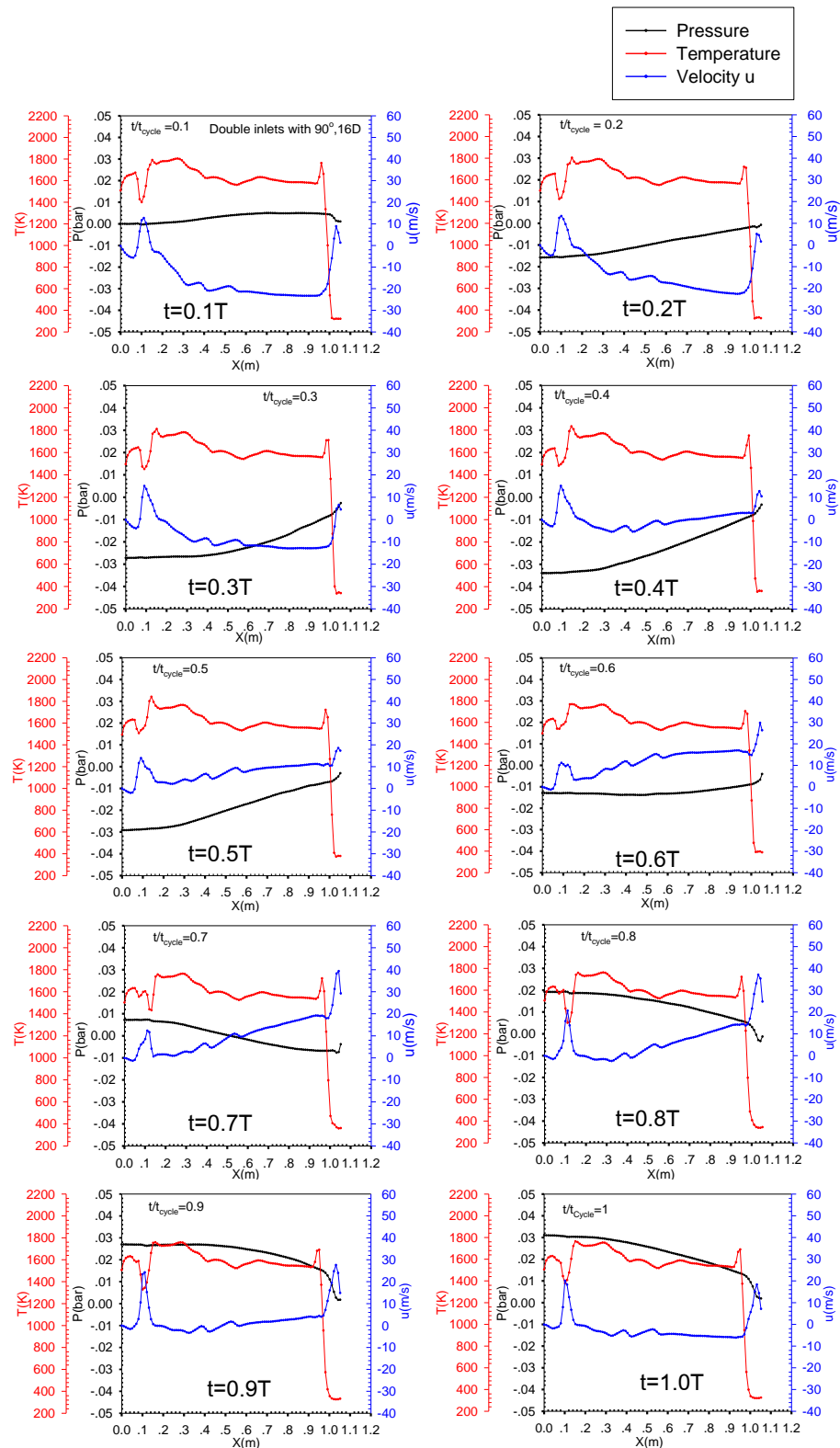
รูปที่ 30 แสดงตำแหน่งและเวลาที่นำผลจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้แบบพัลส์มาใช้พิจารณา



รูปที่ 31 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว

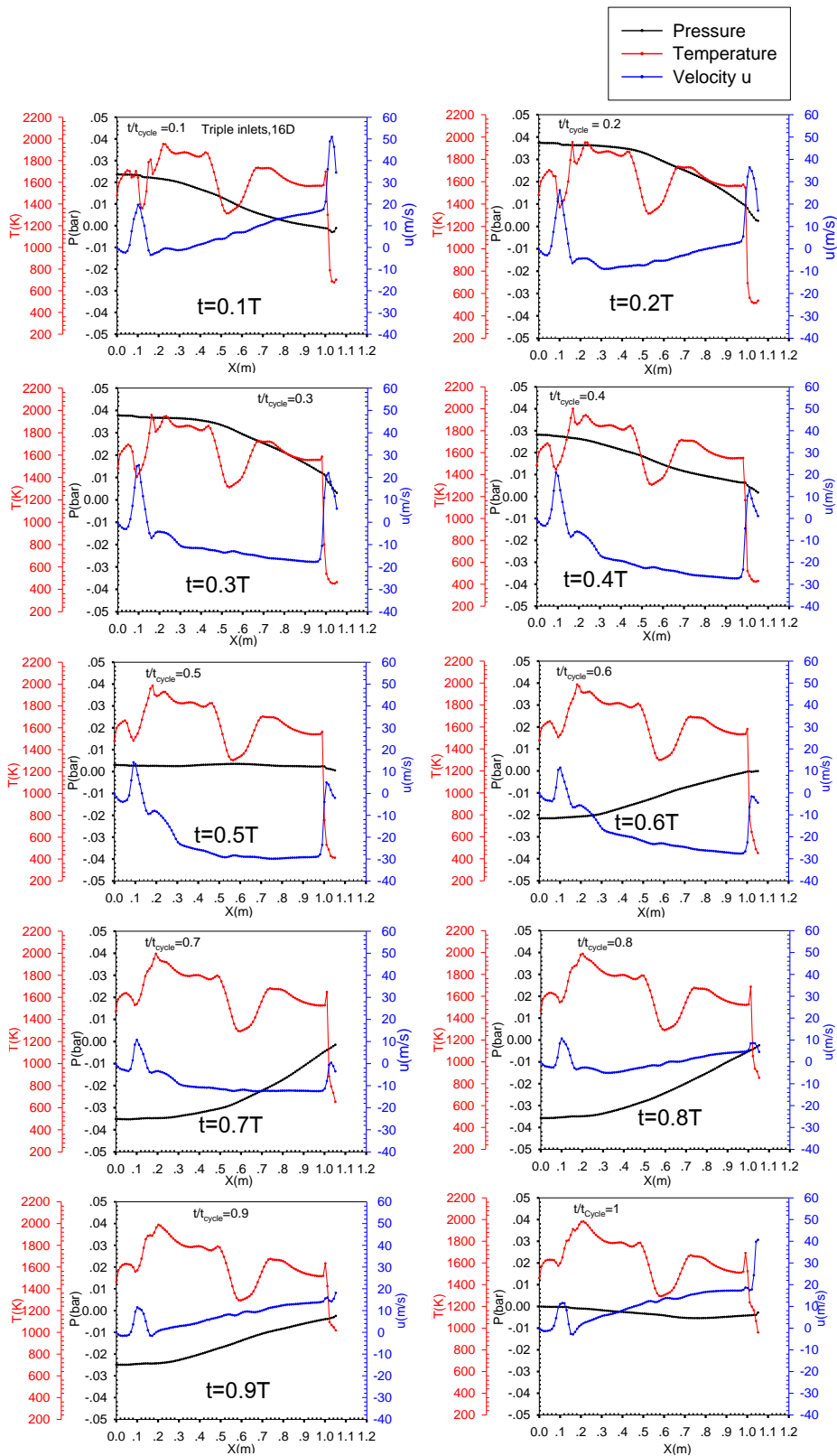


รูปที่ 32 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 180°



รูปที่ 33 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$

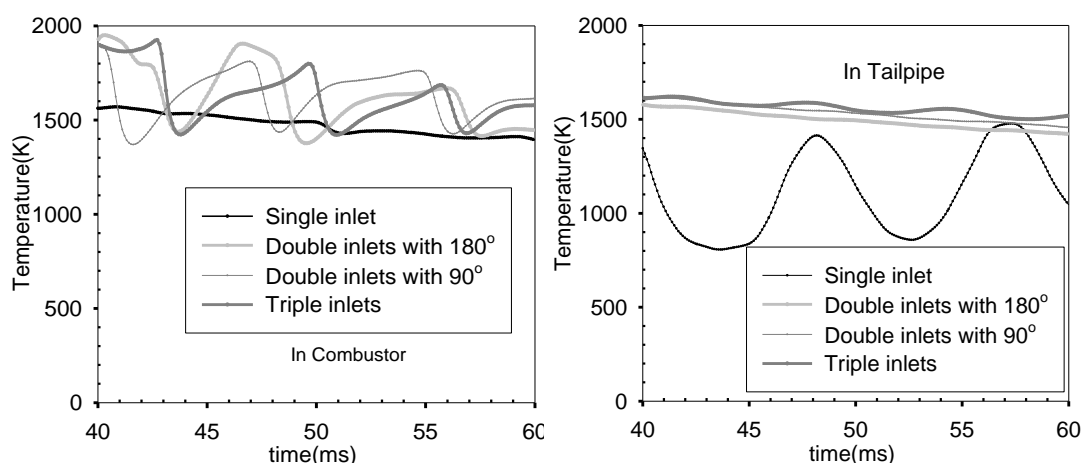




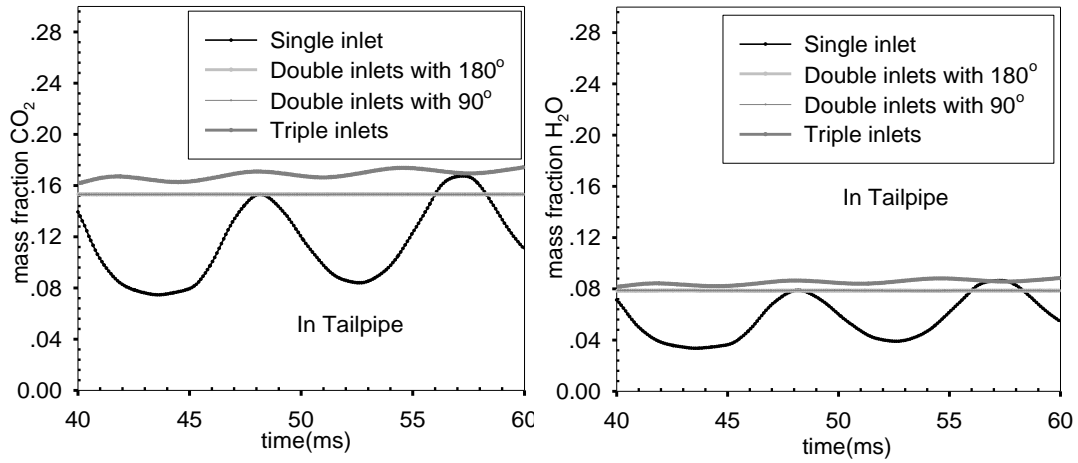
รูปที่ 34 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า

### 6.1.4 ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms

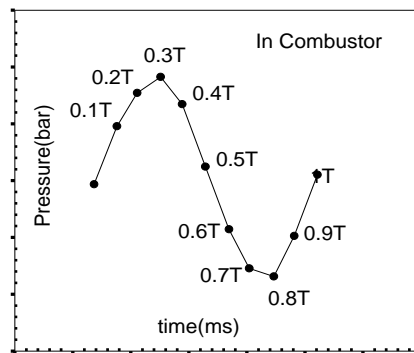
ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่คงตัวในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms แสดงในรูปที่ 35 พบว่าผลของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเพิ่มจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อทางเข้าทำให้ผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และในท่อส่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับผลของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวเนื่องจากผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศยอมทำให้โอกาสของการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดีขึ้นเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นโดยจะเห็นได้จากผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเศษส่วนมวลของน้ำโดยที่ก๊าซโพรเพนเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์กับอากาศได้นั้นต้องให้ผลจากการเผาไหม้เป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ออกมา 18.1% โดยมวลและให้น้ำออกมา 9.8% โดยมวลซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าท่อทางเข้าอากาศเพียงท่อเดียวเพราะให้ค่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไอเสียในท่อส่งอยู่ที่ 15% ถึง 16% และให้น้ำออกมา 8% ถึง 9% ดังแสดงในรูปที่ 36 และยังพบว่า การเพิ่มท่อทางเข้าอากาศมีผลให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นน้อยลงทั้งในห้องเผาไหม้และในท่อส่งมีเทียบกับท่อทางเข้าอากาศเดียวดังแสดงในรูปที่ 38 ถึง 41 เทียบผลในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ ซึ่งค่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจากไอเสียที่ให้ออกมาใกล้เคียงกับการเผาไหม้สมบูรณ์ของโพรเพนกับอากาศและผลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในห้องเผาไหม้และในท่อส่งลดลงจากการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศจึงให้ผลของอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่สูงกว่าท่อทางเข้าอากาศเดียวและพบว่า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากห้องเผาไหม้ไปถึงปลายท่อส่งไม่มีเชื้อเพลิงเหลือเลยจากการเผาไหม้แสดงให้เห็นว่าห้องเผาไหม้แบบพัลส์มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ดีจากการดึงออกซิเจนจากอากาศเข้ามาผสมเองด้วยรูปทรงของห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการระเบิดเป็นวัฏจักรแบบพัลส์ให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นไปในทางที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 42



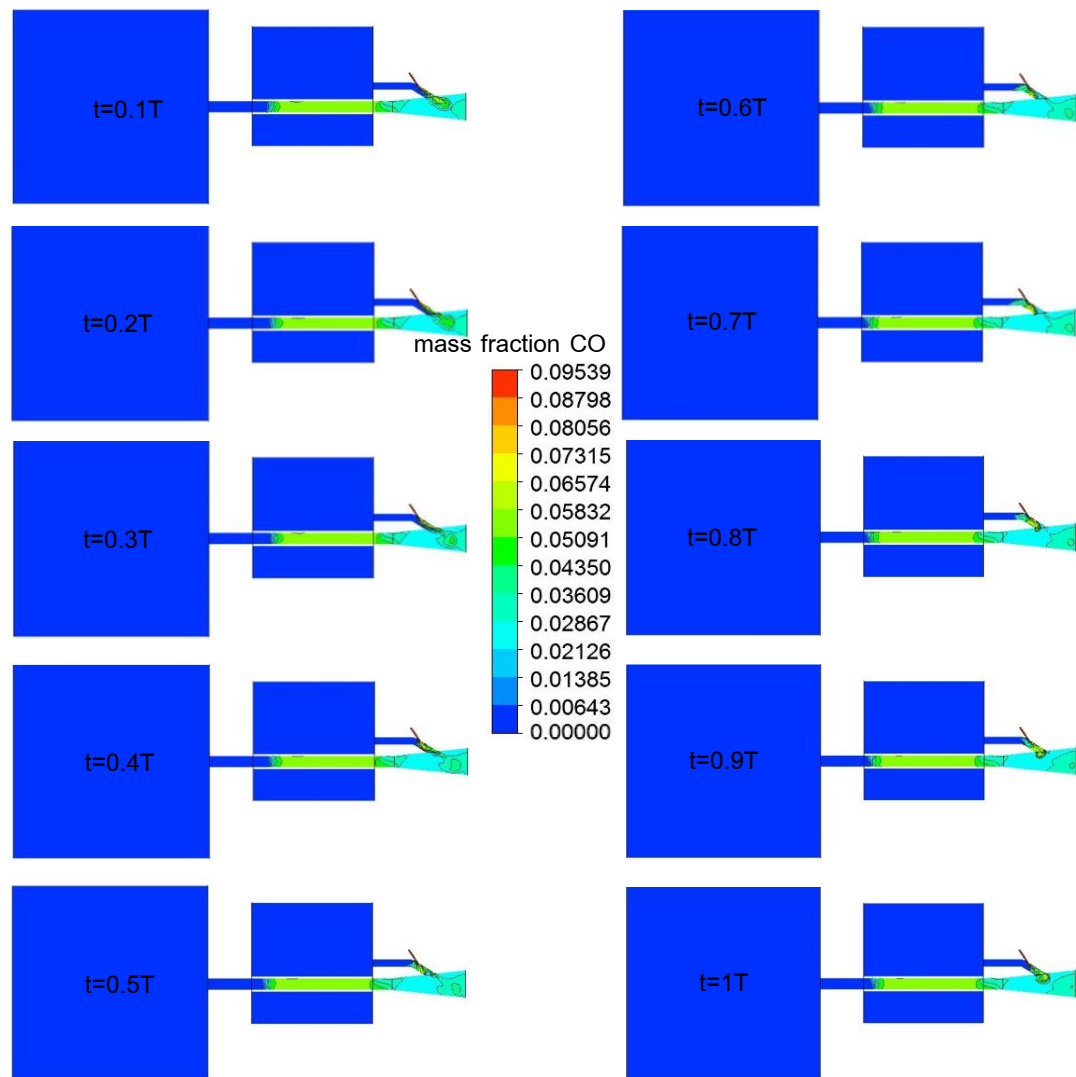
รูปที่ 35 ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจากการจำลอง  
พฤติกรรมของการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms



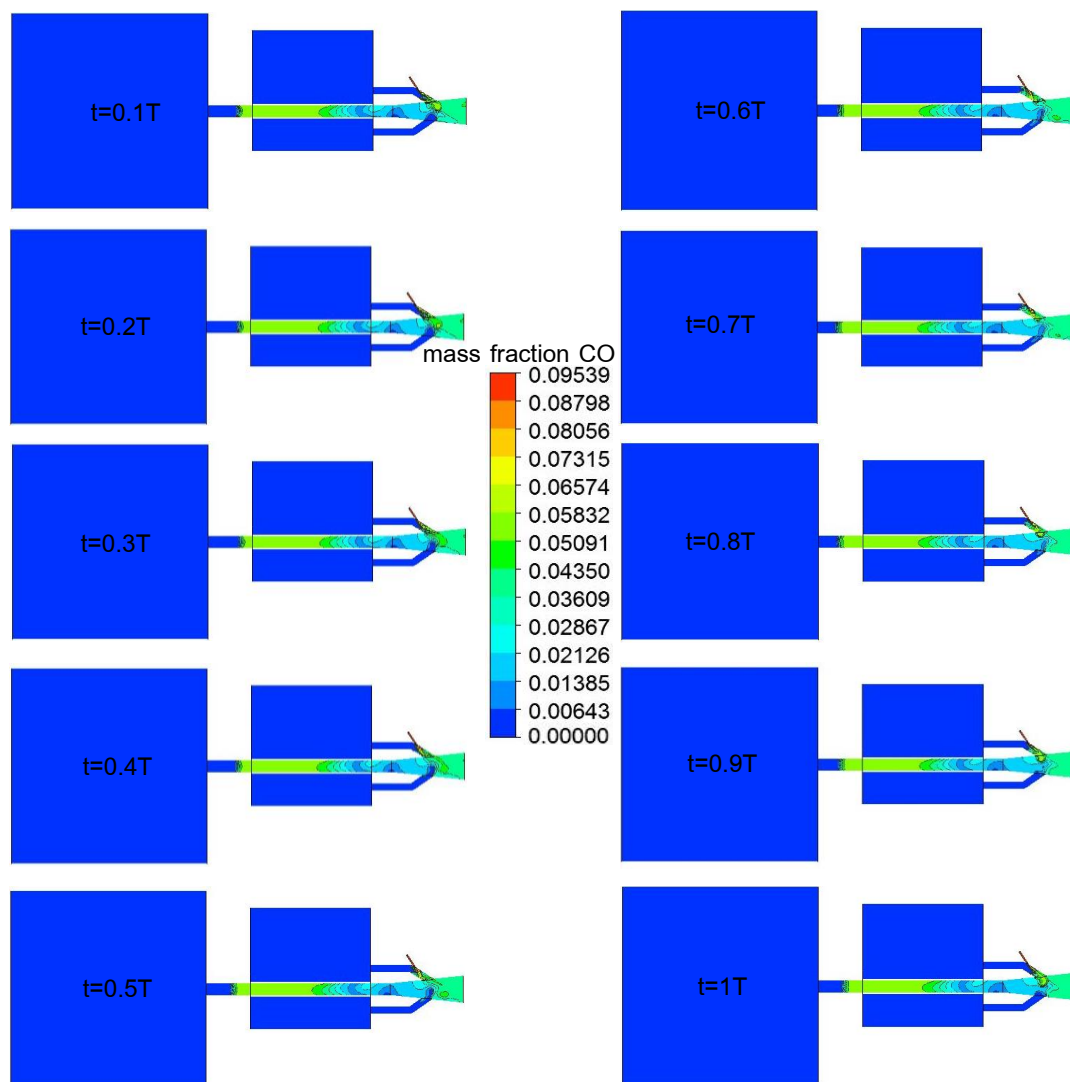
รูปที่ 36 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในท่อส่งจาก  
การจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms



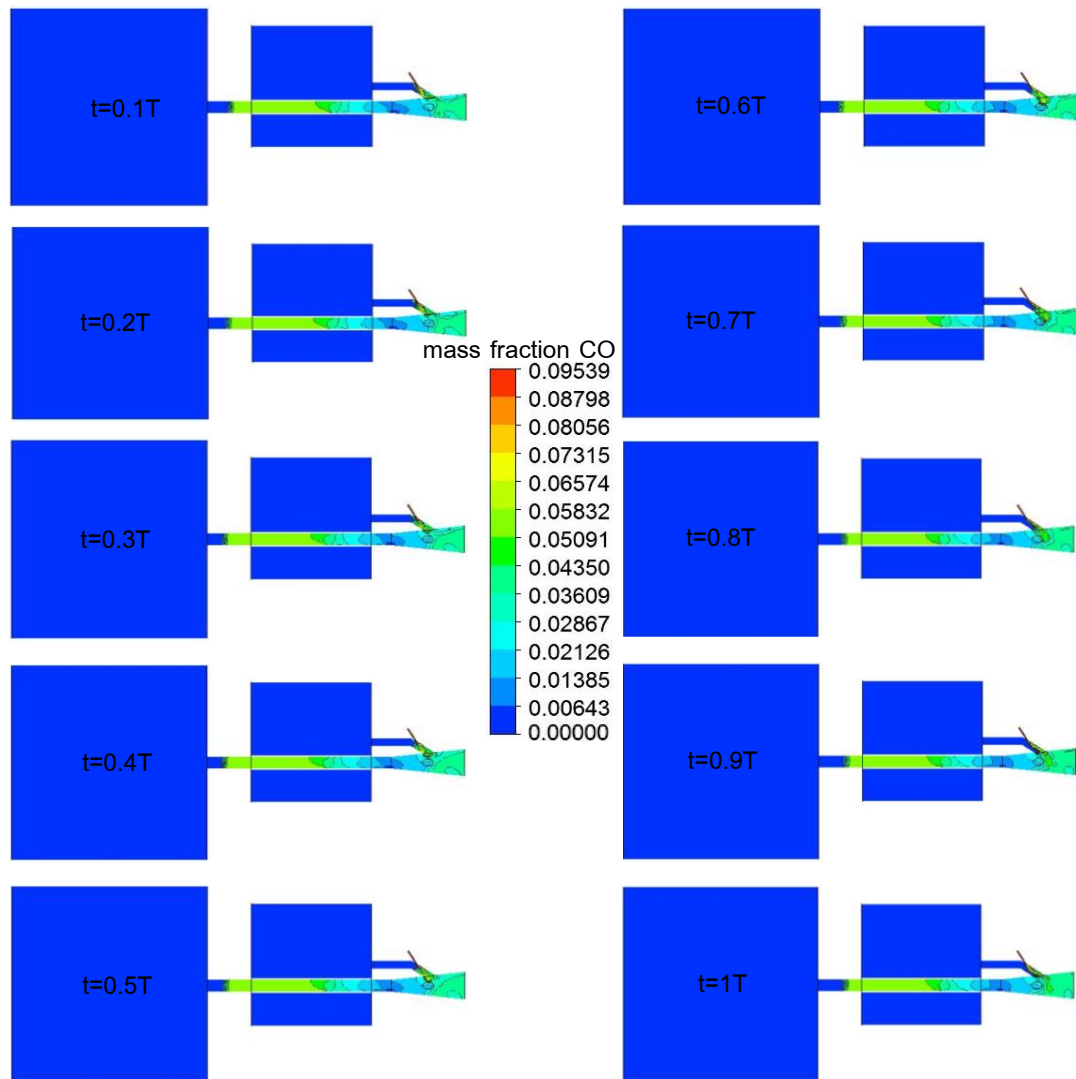
รูปที่ 37 แสดงผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และเวลาที่ใช้ในการดึงผลของเศษส่วน  
มวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์



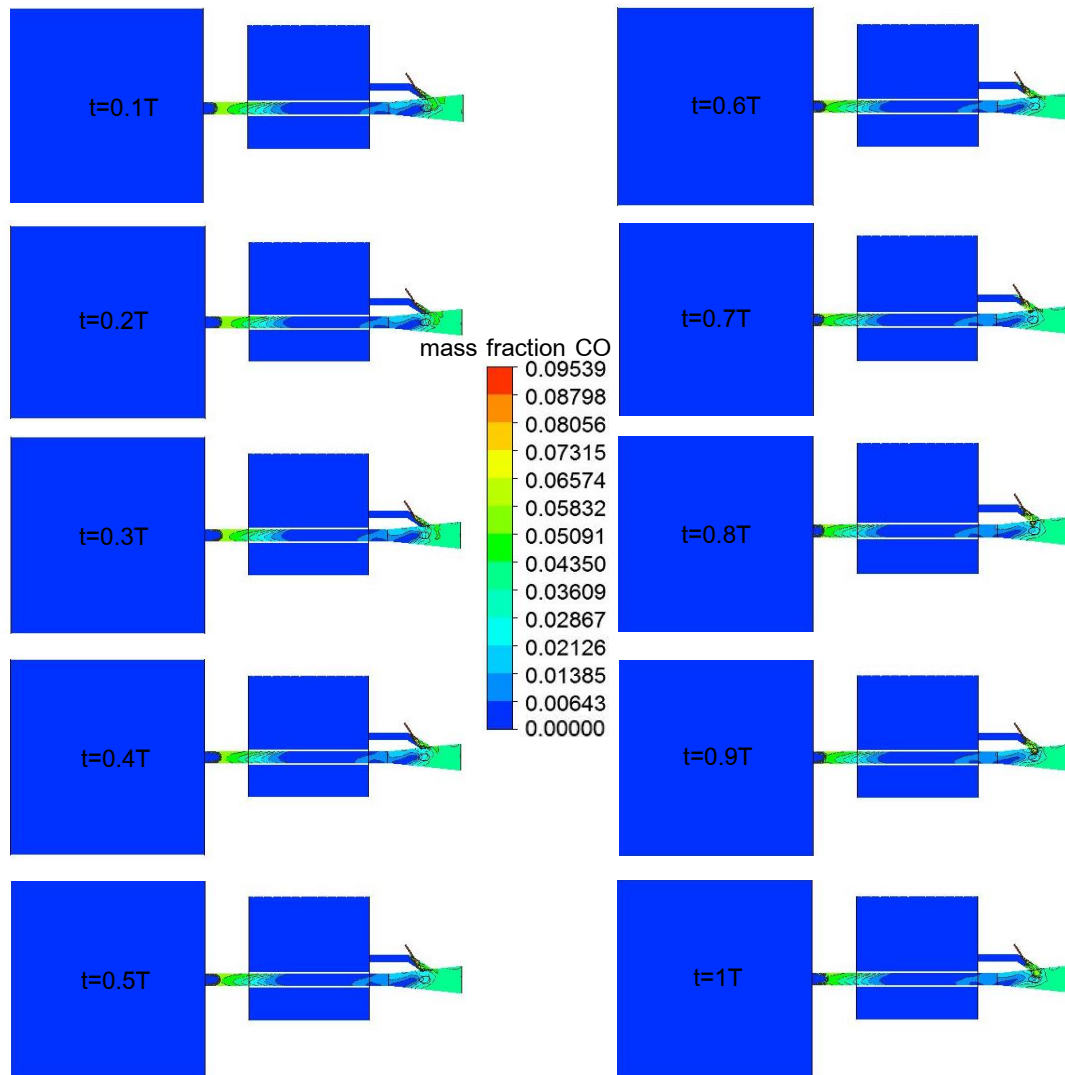
รูปที่ 38 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว



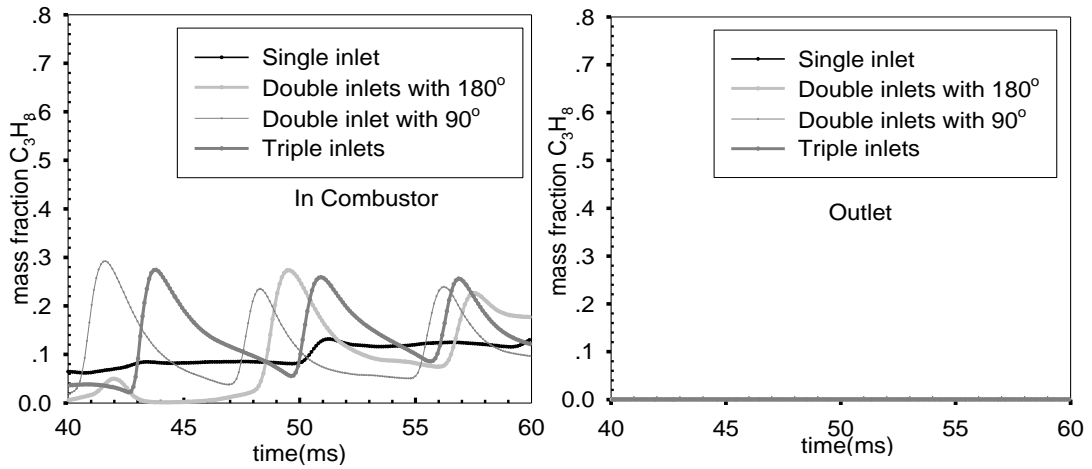
รูปที่ 39 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$



รูปที่ 40 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$



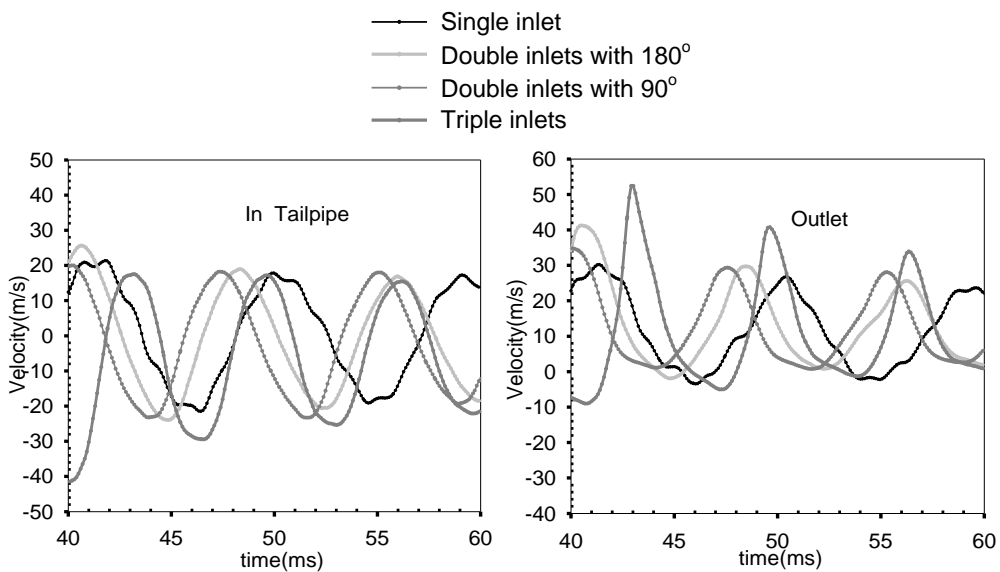
รูปที่ 41 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า



รูปที่ 42 แสดงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซโพรเพนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และปลายของท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms

**6.1.5 ผลของความเร็ว (u) ที่เกิดขึ้นในท่อส่งและปลายปากทางออกของท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms**

ผลของความเร็ว (u) ในทิศทาง X ที่เกิดขึ้นในท่อส่งและที่ปากทางออกจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์โดยการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้คงที่อยู่ที่ 1.2435 g/s พบว่าผลของการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อทางเข้าอากาศส่งผลให้ความเร็วในทิศทาง X ที่เกิดขึ้นในท่อส่งและปากทางออกของท่อส่งเพิ่มขึ้นจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อและสามท่อทางเข้าอากาศเป็นผลมาจากมวลของอากาศที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 43



รูปที่ 43 แสดงผลของความเร็วในแนว X ในท่อส่งและที่ปลายปากทางออกของท่อส่ง



## 6.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ

### 6.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ โดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

กรณีการวัดผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่  $X/D$  ต่าง ๆ โดยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ในทุกการทดลองซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 44

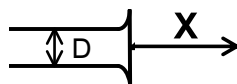
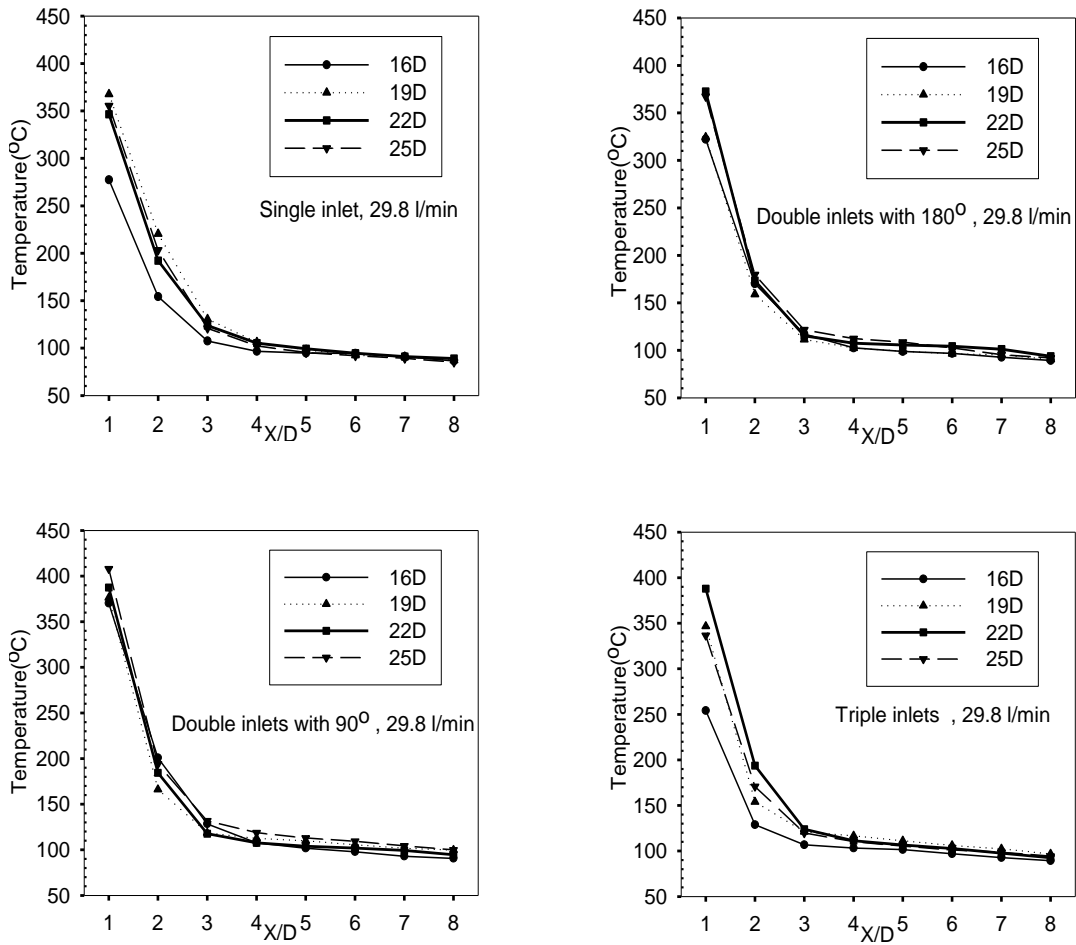
การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวที่ห้องเผาไหม้พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ทำให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่  $367.6^{\circ}\text{C}$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่  $277.3^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/D = 1$  การลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $X/D = 1$  ถึง  $X/D = 3$  จากนั้นที่ระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเนื่องจากทุกความยาวท่อส่งที่เพิ่มขึ้นให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งที่ระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำและเกือบเท่ากับทุกความยาวท่อส่งโดยอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเท่ากับ  $87^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้แบบพัลส์การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศท่อเดี่ยวพบว่า การเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวเป็น 19D เหมาะสมกับการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศท่อเดี่ยวเนื่องด้วยให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $X/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$  ที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D ทำให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่  $372.6^{\circ}\text{C}$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่  $322.2^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/D = 1$  การลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $X/D = 1$  ถึง  $X/D = 2$  จากนั้นระยะ  $X/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเนื่องจากผลของอุณหภูมิเฉลี่ยเกือบเท่ากันหมดในทุกความยาวท่อส่งที่เปลี่ยนไป ในระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำเนื่องด้วยระยะที่ไกลสุดและผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเกือบเท่ากันทุกความยาวท่อส่งโดยอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนประมาณ  $91.4^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้แบบพัลส์การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$  พบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D จะเหมาะสมกับการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน

180° เนื่องจากให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $X/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90° ที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D ทำให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 407.9 °C และความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำที่สุดอยู่ที่ 370.1 °C ที่ระยะ  $X/D = 1$  การลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $X/D = 1$  ถึง  $X/D = 3$  จากนั้นผลของการเพิ่มระยะ  $X/D$  ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยในทุกความยาวท่อส่งอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเกือบเท่ากันหมด ในระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำด้วยระยะที่ไกลสุดและผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเกือบเท่ากันทุกความยาวท่อส่งโดยอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนประมาณ 96.2 °C จากผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้แบบพัลส์การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90° พบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D เหมาะสมกับการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90° เนื่องด้วยให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $X/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 388 °C และความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 254.1 °C ที่ระยะ  $X/D = 1$  การลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $X/D = 1$  ถึง  $X/D = 3$  จากนั้นผลการเพิ่มระยะ  $X/D$  ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเปลี่ยนแปลงโดยค่าจะเกือบเท่ากันในทุกความยาวของท่อส่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำด้วยระยะที่ไกลสุดและผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเกือบเท่ากันทุกความยาวท่อส่งโดยอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนประมาณ 93.2 °C จากผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้แบบพัลส์การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อพบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D เหมาะสมกับการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อเนื่องด้วยให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $X/D = 1$ )



รูปที่ 44 แสดงผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

### 6.2.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ

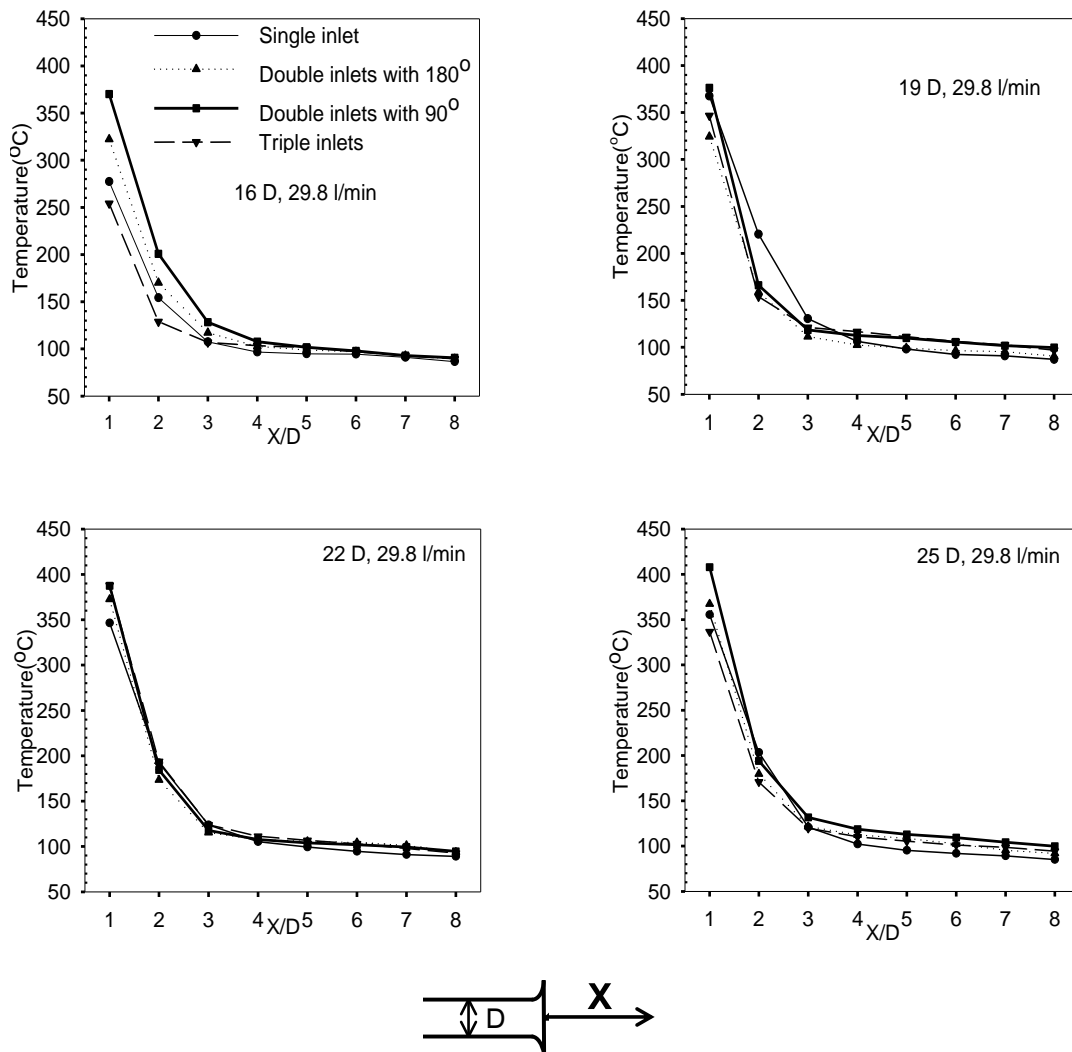
กรณีการวัดผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่  $X/D$  ต่างๆ โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ในทุกการทดลองซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 45

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงที่ระยะ  $X/D=1$  ซึ่งเท่ากับ  $370.1^\circ\text{C}$  และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำในสี่รูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $254.1^\circ\text{C}$  ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะ  $X/D=1$  ถึง 3 และเมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้นผลของอุณหภูมิเฉลี่ยไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเกือบเท่ากันในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ ที่ระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำประมาณ  $88.9^\circ\text{C}$  ซึ่งเกิดจากระยะที่ใกล้สุดในการทดลองยอมให้ผลของอุณหภูมิต่ำด้วยการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้น

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงที่ระยะ  $X/D=1$  ซึ่งเท่ากับ  $376.3^\circ\text{C}$  และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำจากในสี่รูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $324.3^\circ\text{C}$  จากระยะ  $X/D=1$  ถึง 2 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดและระยะ  $X/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเปลี่ยนแปลงโดยที่ค่าเกือบเท่ากันหมดที่ระยะ  $X/D = 8$  ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำสุดอยู่ที่  $99.7^\circ\text{C}$  ในทุกระยะที่ใช้ในการทดลองด้วยการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้น

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่  $388^\circ\text{C}$  ที่ระยะ  $X/D=1$  และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศท่อเดียวให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำจากในสี่รูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $346.5^\circ\text{C}$  ซึ่งที่ระยะ  $X/D=1$  ถึง 2 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดแต่เมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้นผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนไม่เปลี่ยนแปลงด้วยค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่เกือบเท่ากัน ที่ระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำสุดในการทดลองประมาณ  $92.5^\circ\text{C}$  ซึ่งเกิดจากระยะห่างจากปากท่อส่งยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลเกิดการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้น

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงที่ระยะ  $X/D=1$  ซึ่งเท่ากับ  $407.8^\circ\text{C}$  และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำจากในสี่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $336.6^\circ\text{C}$  ที่ระยะ  $X/D=1$  ถึง 3 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดแต่เมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้นผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงด้วยค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่ระยะ  $X/D = 8$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำที่สุดในการทดลองอยู่ที่  $92.5^\circ\text{C}$  ด้วยระยะที่เพิ่มขึ้นก็ยอมส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 45 แสดงผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ

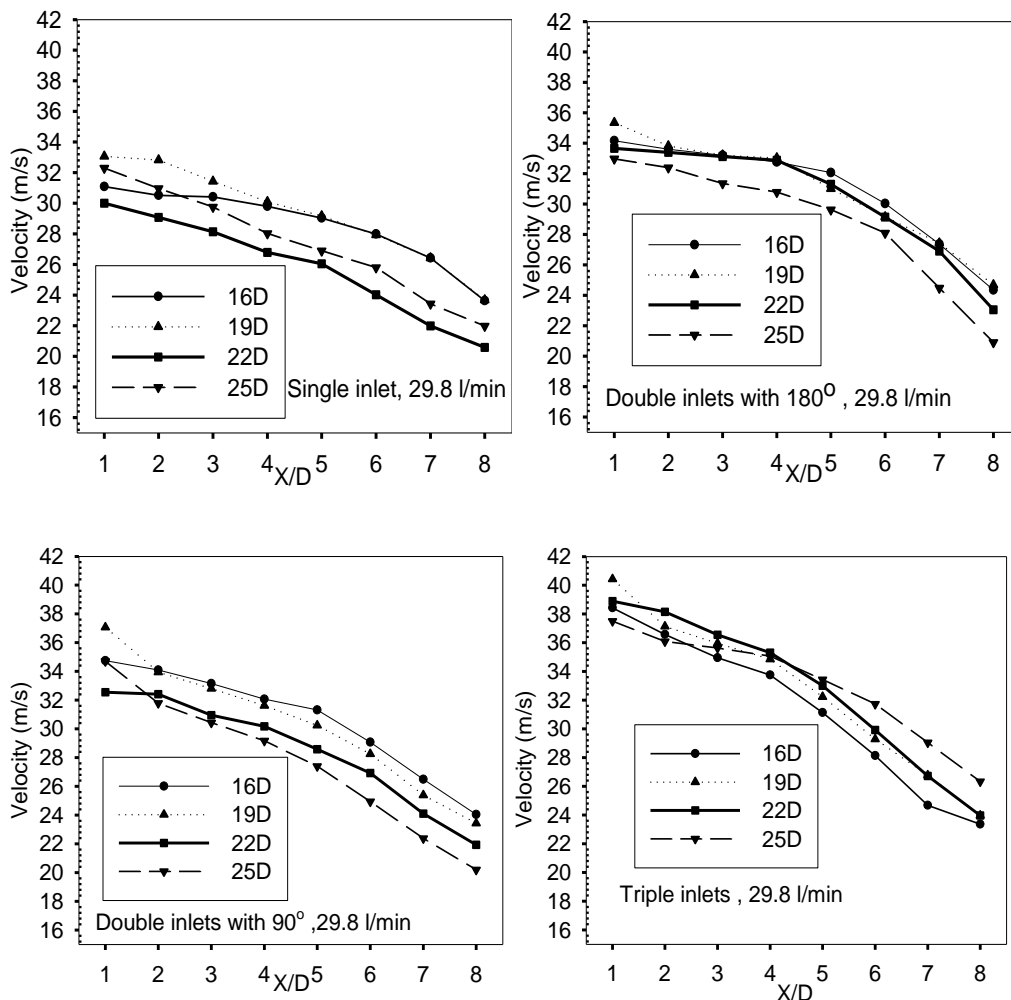
### 6.2.3 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ โดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

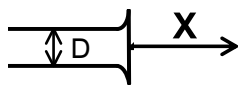
กรณีการวัดผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่ X/D ต่างๆ โดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ในทุกการทดลองซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 46

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 33.1 m/s และความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 30 m/s ที่ระยะ X/D = 1 การ



การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 40.4 m/s และความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 37.5 m/s ที่ระยะ  $X/D = 1$  การลดลงของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจะลดลงเมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้นในทุกความยาวท่อส่งที่เปลี่ยนซึ่งระยะไกลสุดคือ  $X/D = 8$  พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 26.3 m/s และความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำในทุกความยาวท่อส่งที่เปลี่ยนไปอยู่ที่ 23.36 m/s จากผลการทดลองในการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้แบบพัลส์โดยการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า พบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบของห้องเผาไหม้ ซึ่งในที่นี้การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าเหมาะสมกับความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูง (ที่ระยะ  $X/D = 1$ )





**รูปที่ 46** แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

#### 6.2.4 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ

กรณีการวัดผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่  $X/D$  ต่างๆ โดยการคงที่ความยาวของท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ในทุกการทดลองซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 47

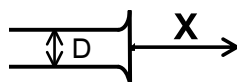
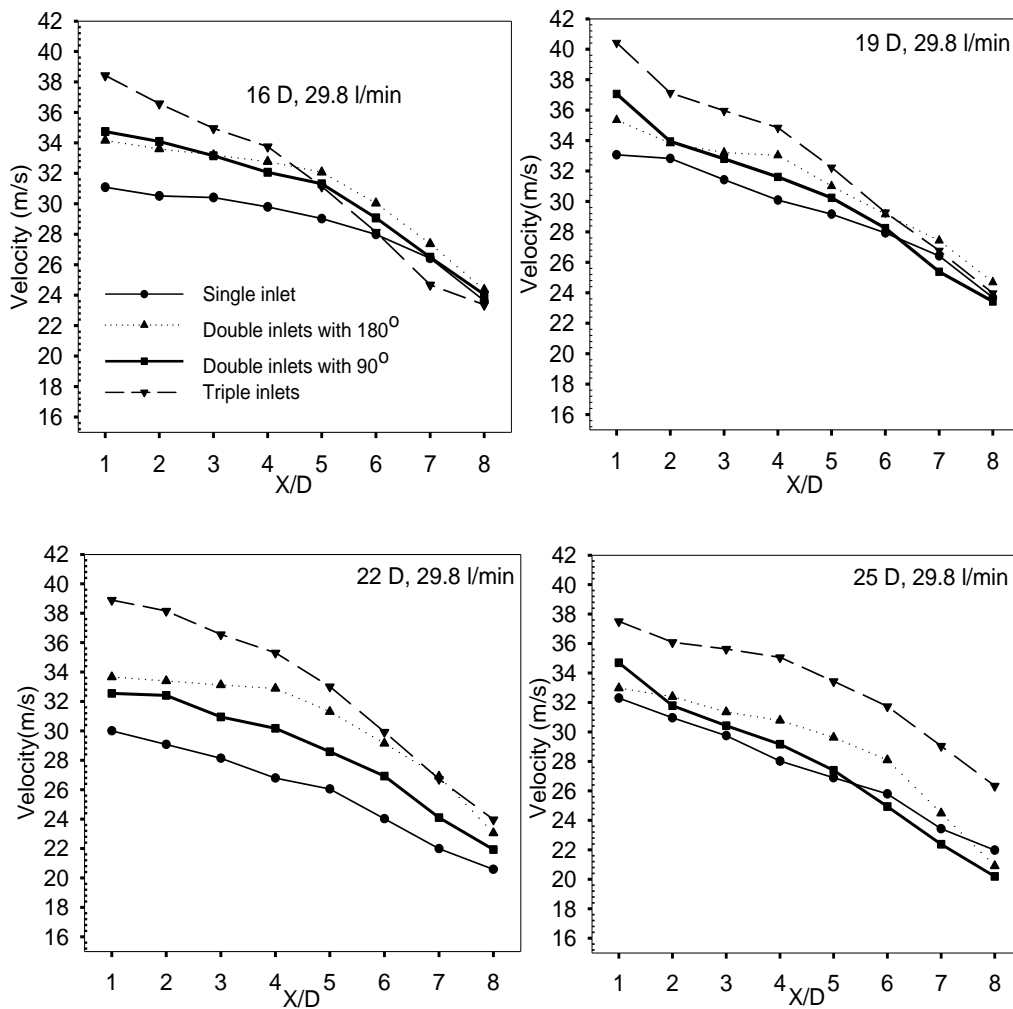
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้าให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงมีค่าอยู่ที่ 38.4 m/s และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 31.1 m/s ที่ระยะ  $X/D = 1$  ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงเมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะไกลสุด  $X/D = 8$  พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ค่าของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 24.4 m/s และต่ำสุดอยู่ที่ 23.4 m/s จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้าให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงมีค่าอยู่ที่ 40.4 m/s และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 33.1 m/s ที่ระยะ  $X/D = 1$  ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงเมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะไกลสุด  $X/D = 8$  พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ค่าของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 24.7 m/s และต่ำอยู่ที่ 23.4 m/s จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้าให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงมีค่าอยู่ที่ 38.9 m/s และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 30 m/s ที่ระยะ  $X/D = 1$  ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงเมื่อระยะ  $X/D$  เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะไกลสุด  $X/D = 8$  พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงอยู่ที่ 24 m/s และต่ำสุดอยู่ที่ 20.6 m/s จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว



ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้าให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงมีค่าอยู่ที่ 37.5 m/s และการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวให้ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนต่ำอยู่ที่ 32.3 m/s ที่ระยะ X/D=1 ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนลดลงเมื่อระยะ X/D เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะไกลสุด X/D = 8 พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงสุดอยู่ที่ 26.3 m/s และต่ำสุดอยู่ที่ 20.2 m/s จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90°



รูปที่ 47 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ

### 6.3 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง

#### 6.3.1 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

กรณีการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่  $L/D$  ต่างๆด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่  $29.8 \text{ l/min}$  ในทุกการทดลอง ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 48

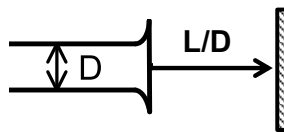
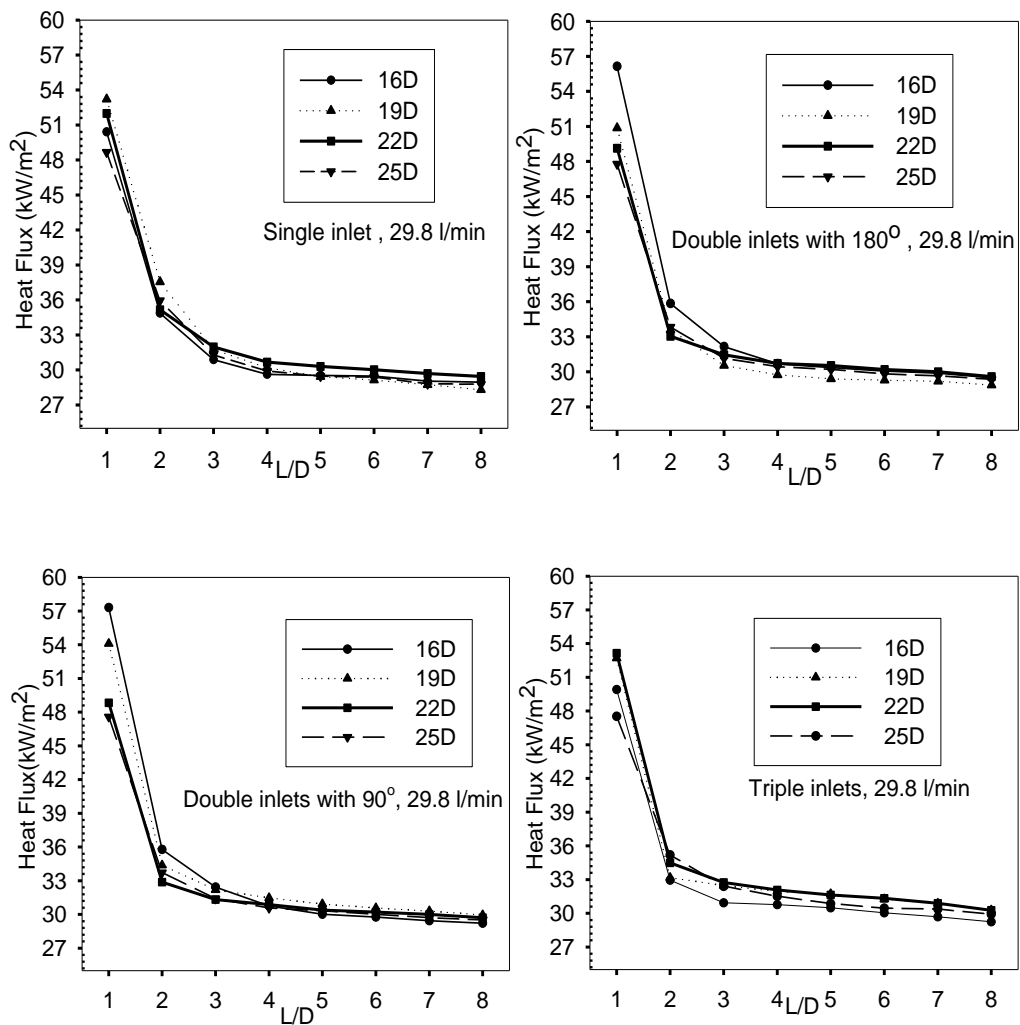
การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวของห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น  $19D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนสูงอยู่ที่  $53.2 \text{ kW/m}^2$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น  $25D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนที่ต่ำอยู่ที่  $48.67 \text{ kW/m}^2$  ที่ระยะ  $L/D = 1$  การลดลงของค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $L/D = 1$  ถึง  $3$  จากนั้นผลของ  $L/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนเนื่องด้วยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในตำแหน่ง  $L/D = 8$  การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนเฉลี่ยอยู่ที่  $28.86 \text{ kW/m}^2$  จากผลการทดลองในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวพบว่า การเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเลยแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น  $19D$  เหมาะสมกับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว เนื่องด้วยให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $L/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น  $16D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนสูงอยู่ที่  $56.15 \text{ kW/m}^2$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น  $25D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนที่ต่ำอยู่ที่  $47.78 \text{ kW/m}^2$  ที่ระยะ  $L/D = 1$  การลดลงของค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $L/D = 1$  ถึง  $3$  จากนั้นผลของ  $L/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนเนื่องด้วยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในตำแหน่ง  $L/D = 8$  การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนเฉลี่ยอยู่ที่  $29.32 \text{ kW/m}^2$  จากผลการทดลองในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  พบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเลยแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น  $16D$  เหมาะสมกับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่

ห่างกัน  $180^\circ$  เนื่องจากให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนได้ดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $L/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ของห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น  $16D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนสูงอยู่ที่  $57.32 \text{ kW/m}^2$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น  $25D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนมีค่าต่ำอยู่ที่  $47.60 \text{ kW/m}^2$  ที่ระยะ  $L/D = 1$  การลดลงของค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $L/D = 1$  ถึง  $3$  จากนั้นผลของ  $L/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนเนื่องด้วยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในตำแหน่ง  $L/D = 8$  การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนเฉลี่ยอยู่ที่  $29.59 \text{ kW/m}^2$  จากผลการทดลองในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  พบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเลยแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น  $16D$  เหมาะสมสุดกับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $90^\circ$  เนื่องจากให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $L/D = 1$ )

การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อของห้องเผาไหม้แบบพัลส์พบว่าความยาวท่อส่งยาวเป็น  $22D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนสูงอยู่ที่  $53.15 \text{ kW/m}^2$  และความยาวท่อส่งยาวเป็น  $25D$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนมีค่าต่ำอยู่ที่  $47.53 \text{ kW/m}^2$  ที่ระยะ  $L/D = 1$  การลดลงของค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง  $L/D = 1$  ถึง  $3$  จากนั้นผลของ  $L/D$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนเนื่องด้วยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในตำแหน่ง  $L/D = 8$  การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนพื้นผิวพุงชนเฉลี่ยอยู่ที่  $29.59 \text{ kW/m}^2$  จากผลการทดลองในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อพบว่า การเพิ่มความยาวท่อส่งไม่ได้ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเลยแต่จะสูงสำหรับความยาวท่อส่งที่เหมาะสมกับรูปแบบห้องเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ความยาวท่อส่งยาวเป็น  $22D$  เหมาะสมกับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าเนื่องด้วยให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุงชนของเจ็ทลมร้อนดีในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ทดลอง (ที่ระยะ  $L/D = 1$ )

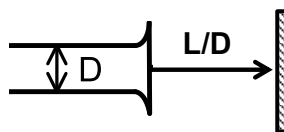
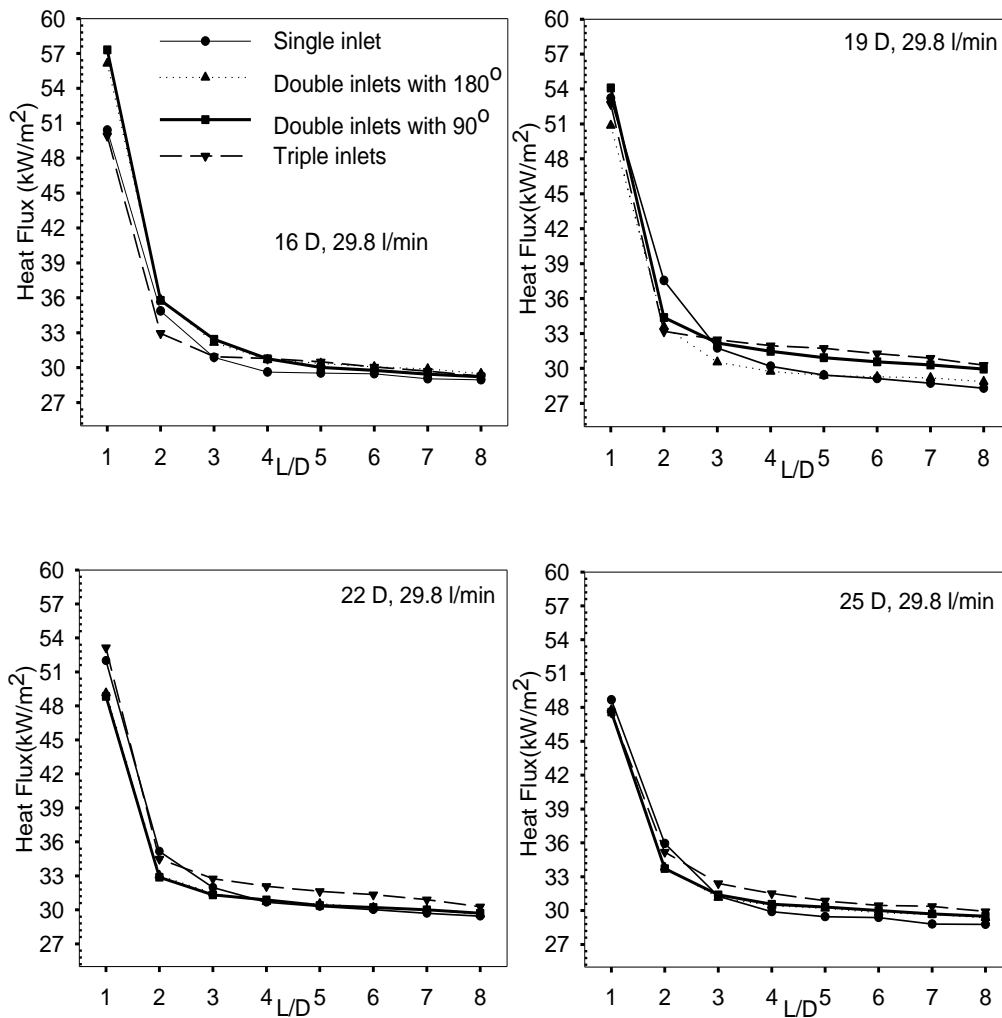


รูปที่ 48 แสดงผลของการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง

### 6.3.2 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ

กรณีการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง ณ ตำแหน่งปากทางออกของท่อส่งที่  $L/D$  ต่างๆด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ และจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ในทุกการทดลอง ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 49





รูปที่ 49 แสดงผลของการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ

#### 6.4 ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่ง

##### 6.4.1 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้

กรณีการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศซึ่งจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min พบว่ารูปแบบของความดันมีลักษณะเหมือนกันในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้า

อากาศคือเมื่อเริ่มเกิดการระเบิดความดันและความร้อนในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นสูงจนถึงจุดสูงสุด และลดลงด้วยการไหลออกของแก๊สไอเสีย (ความดันสูงไปหาความดันที่ต่ำกว่า) การลดลงของความดันในห้องเผาไหม้ทำให้ห้องเผาไหม้เริ่มเป็นสูญญากาศจนถึงความเป็นสูญญากาศสูงสุด อากาศใหม่และเชื้อเพลิงใหม่เริ่มไหลเข้าห้องเผาไหม้และเปลวแก๊สไอเสียไหลย้อนกลับเข้าห้องเผาไหม้ด้วยความร้อนทำให้เกิดการระเบิดครั้งใหม่เกิดขึ้นและเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปตลอดจนกว่าจะหยุดจ่ายเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ในทุกการทดลองซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 50 และ 51

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าในหนึ่งวัฏจักรในห้องเผาไหม้อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งไหลออกจากห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งเช่นกันซึ่งเป็นเช่นนี้ในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.13 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$  ส่วนความเป็นสูญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.16 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^{\circ}$  ซึ่งโดยภาพรวมความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความเป็นสูญญากาศในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลของท่อทางเข้าอากาศเดียว

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าในหนึ่งวัฏจักรในห้องเผาไหม้อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งไหลออกจากห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งเช่นกันซึ่งเป็นเช่นนี้ในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.125 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$  ส่วนความเป็นสูญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.165 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า ซึ่งโดยภาพรวมความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความเป็นสูญญากาศในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลของท่อทางเข้าอากาศเดียว

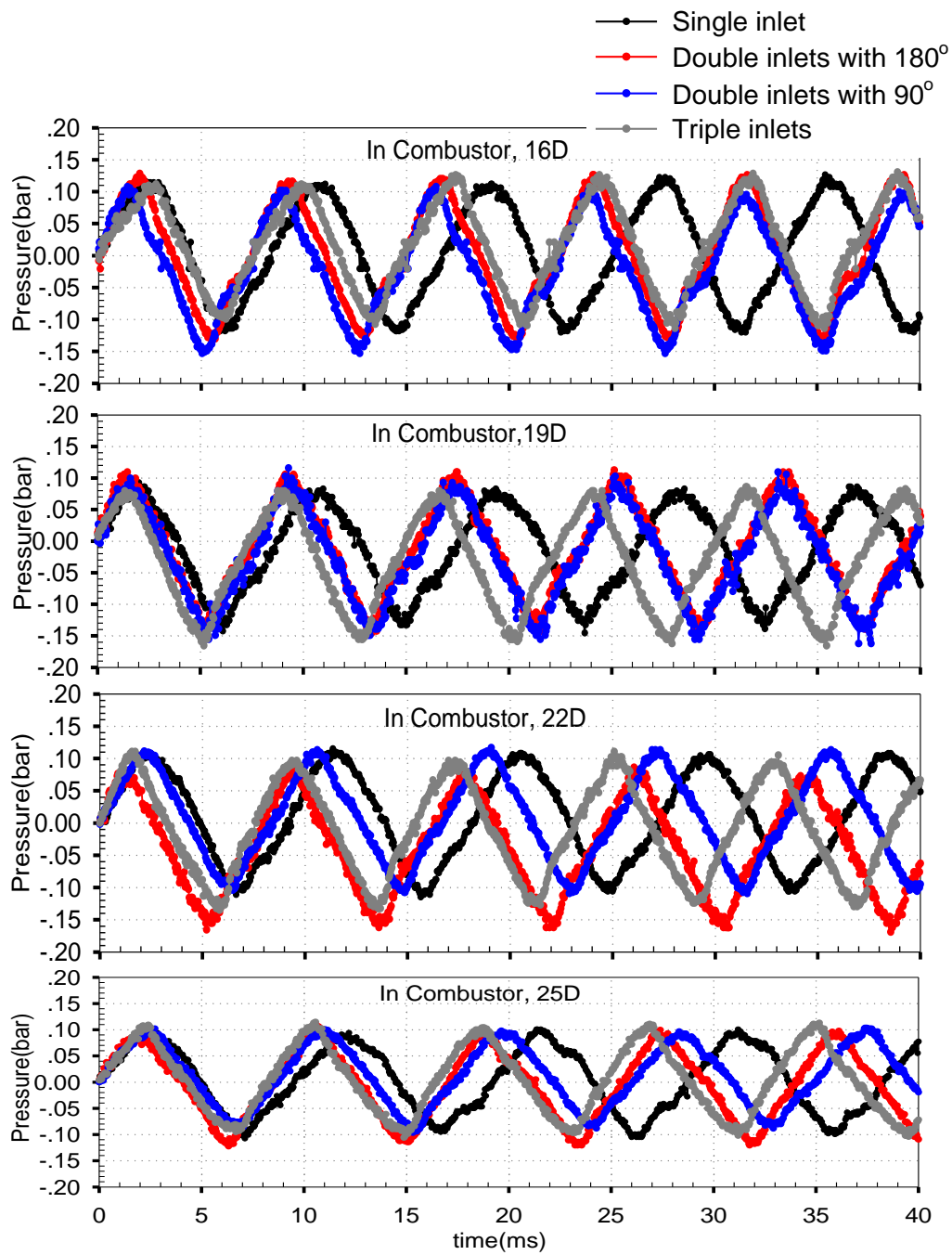
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D ในหนึ่งวัฏจักรในห้องเผาไหม้อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งไหลออกจากห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งเช่นกันซึ่งเป็นเช่นนี้ในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.116 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^{\circ}$  ส่วนความเป็นสูญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.168 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^{\circ}$  ซึ่งโดยภาพรวมความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความเป็นสูญญากาศในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลของท่อทางเข้าอากาศเดียว

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D ในหนึ่งวัฏจักรในห้องเผาไหม้อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งไหลออกจากห้องเผาไหม้หนึ่งครั้งเช่นกันซึ่งเป็น

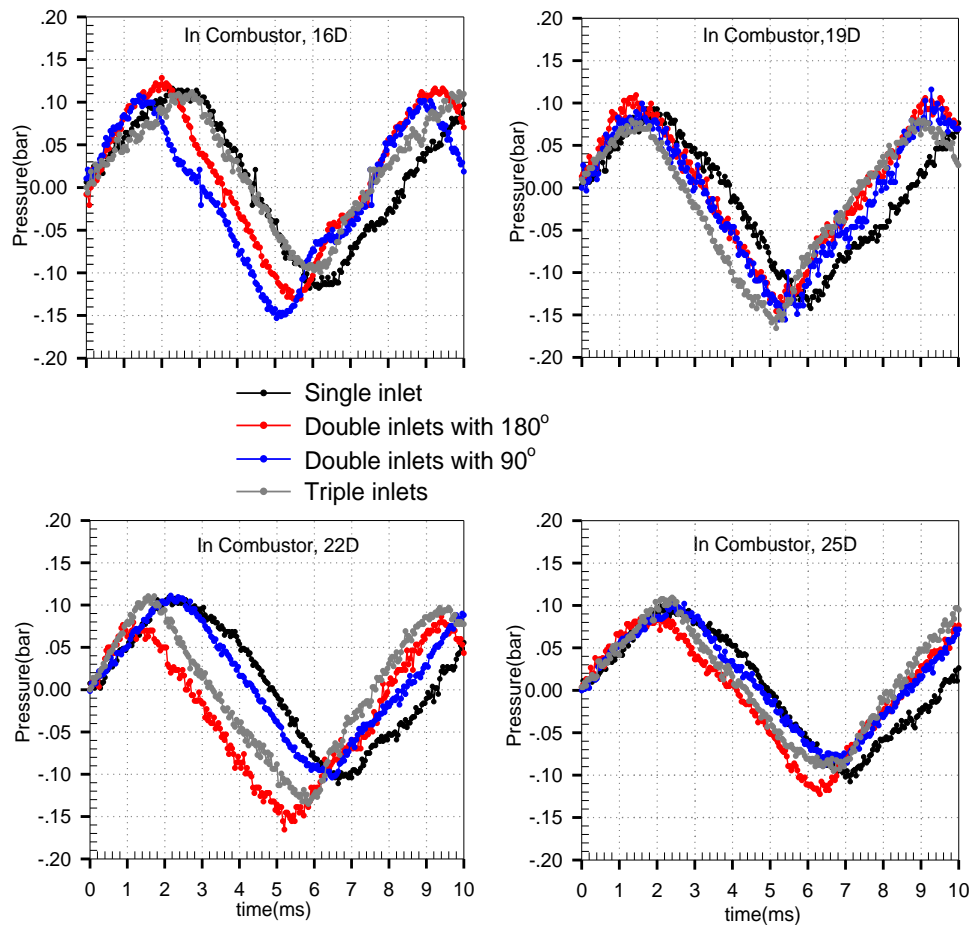
เช่นนี้ในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.114 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าส่วนความเป็นสูญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.12 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$

จากผลการวัดความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์โดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศโดยรวมพบว่าผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อทางเข้าอากาศส่งผลให้ความเป็นสูญญากาศในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อทางเข้าอากาศเดียวแต่ผลของความดันสูงสุดไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปจากท่อทางเข้าอากาศเดียวส่วนความยาวท่อส่งที่เปลี่ยนไปย่อมส่งผลต่อความเป็นสูญญากาศในห้องเผาไหม้ที่ลดลงยิ่งความยาวท่อส่งเพิ่มขึ้นก็ย่อมทำให้ความเป็นสูญญากาศและความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้ลดลงดังกรณีของความยาวท่อส่ง 25D เมื่อเทียบกับท่อส่งความยาวเริ่มต้นคือ 16D และเมื่อดูผลของความดันในหนึ่งวัฏจักรยังพบว่า การเพิ่มท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามให้ค่าที่น้อยกว่าแบบท่อเดียว





รูปที่ 50 แสดงผลของความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 51 แสดงผลของความดันในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป

#### 6.4.2 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่ง

กรณีการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่งใกล้กับปากทางออกของท่อส่งเข้ามาเป็นระยะ 4D ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและจะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้และผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 52

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อส่งเกิดจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 180° อยู่ที่ 0.18 bar และความเป็นสุญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.16 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90° ในหนึ่งวัฏจักรของความดันในห้องเผาไหม้ (เจ็ทอากาศร้อนไหลเข้าหนึ่งครั้งและไหลออกหนึ่งครั้ง) ส่งผลให้เกิดการไหลออกของ

เจ็ทลมร้อนในท่อส่งสามครั้งและไหลเข้าสามครั้งจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยรูปการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และ  $90^\circ$  การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าให้ผลการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในปากทางออกท่อส่งสามครั้งและไหลเข้าสองครั้ง ส่วนการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวให้ผลการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในปากทางออกท่อส่งหนึ่งครั้งและไหลเข้าสองครั้ง

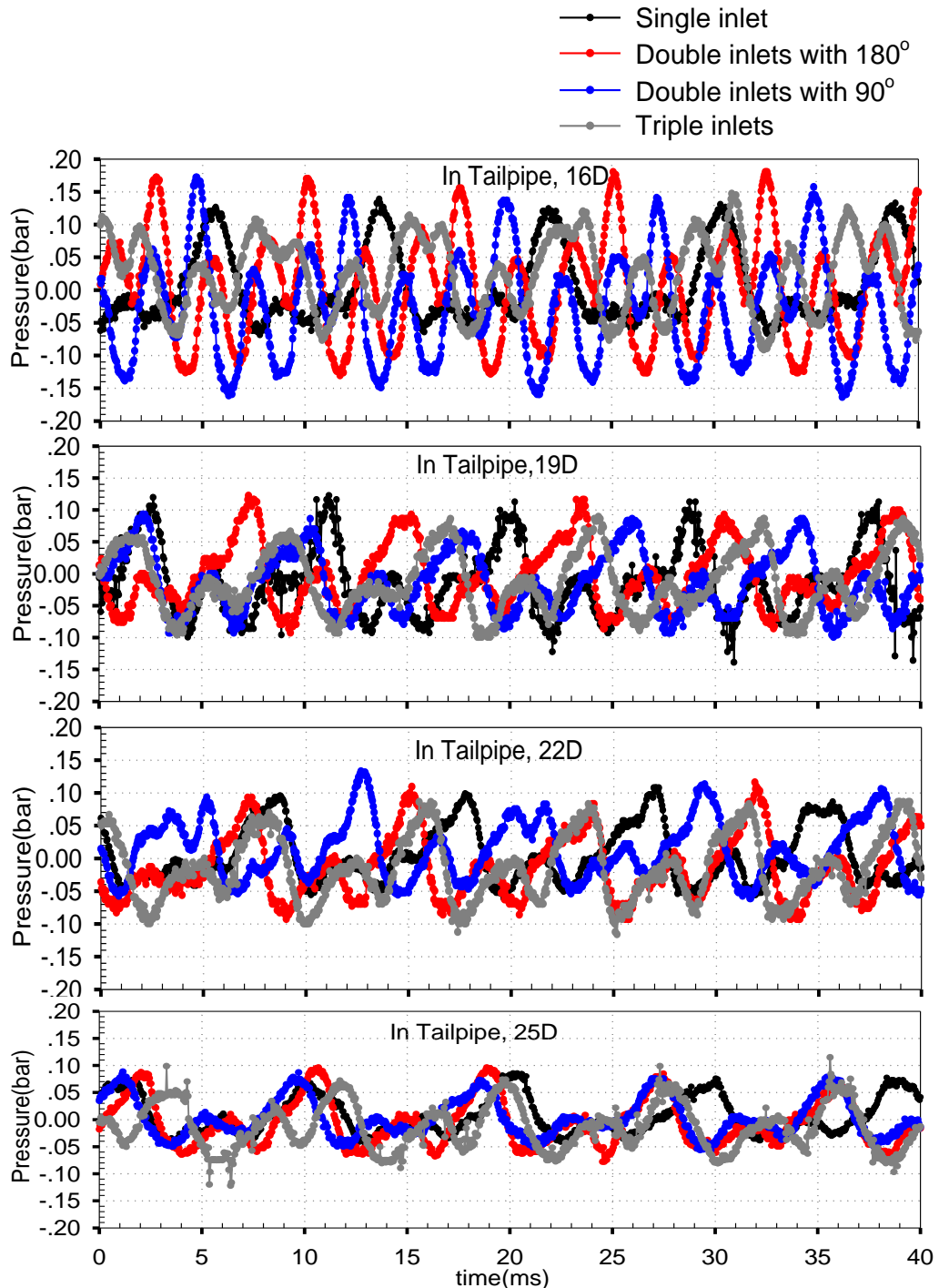
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อส่งเกิดจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวและสองท่อทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $180^\circ$  อยู่ที่ 0.122 bar และความเป็นสุญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.138 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว ในหนึ่งวัฏจักรของความดันในห้องเผาไหม้ (เจ็ทอากาศร้อนไหลเข้าหนึ่งครั้งและไหลออกหนึ่งครั้ง) ส่งผลให้เกิดการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในท่อส่งหนึ่งครั้งและไหลเข้าสองครั้งจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ทุกรูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D พบว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อส่งเกิดจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  อยู่ที่ 0.13 bar และความเป็นสุญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.12 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า ในหนึ่งวัฏจักรของความดันในห้องเผาไหม้ (เจ็ทอากาศร้อนไหลเข้าหนึ่งครั้งและไหลออกหนึ่งครั้ง) ส่งผลให้เกิดการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในท่อส่งสองครั้งและไหลเข้าหนึ่งครั้งจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียวกับสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในปากทางออกท่อส่งหนึ่งครั้งและไหลเข้าสองครั้ง ส่วนห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลการไหลเข้าและไหลออกจากปากทางออกท่อส่งอย่างละหนึ่งครั้ง

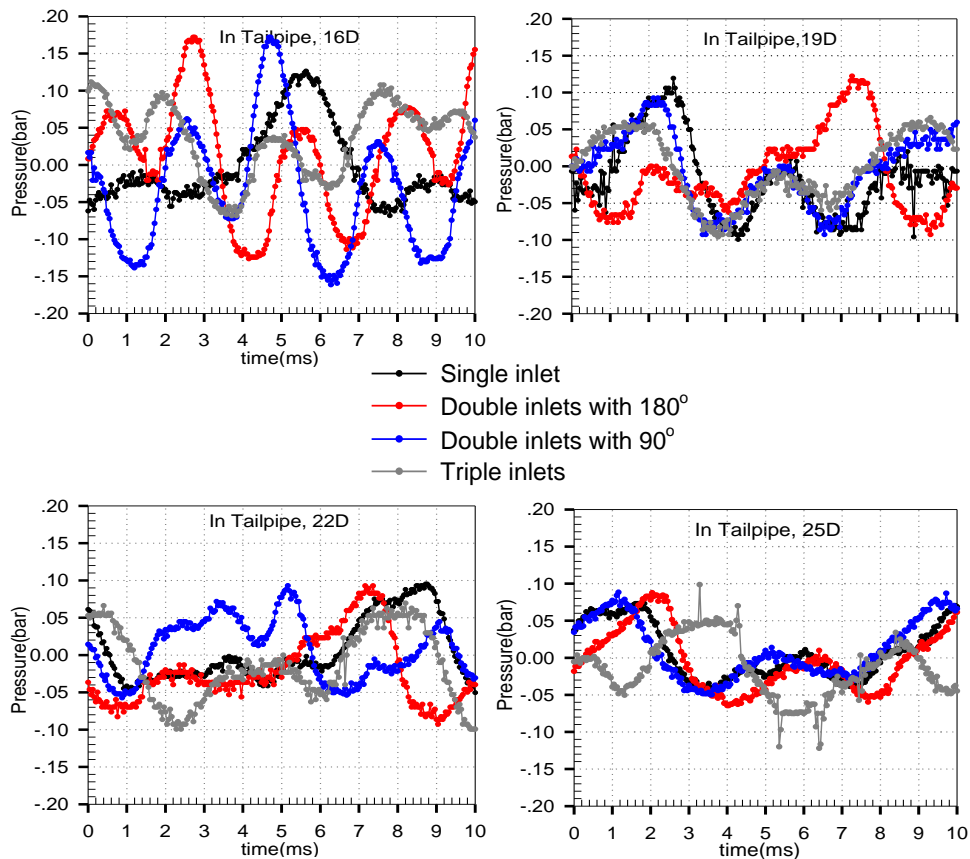
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อส่งเท่ากันทุกรูปแบบการติดตั้งท่อส่งอยู่ที่ 0.1 bar และความเป็นสุญญากาศสูงสุดอยู่ที่ -0.12 bar จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า ในหนึ่งวัฏจักรของความดันในห้องเผาไหม้ (เจ็ทอากาศร้อนไหลเข้าหนึ่งครั้งและไหลออกหนึ่งครั้ง) ส่งผลให้เกิดการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในท่อส่งสองครั้งและไหลเข้าสองครั้งจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว, สองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$ , และสามท่อทางเข้าอากาศส่วนห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลการไหลออกของเจ็ทลมร้อนในปากทางออกท่อส่งหนึ่งครั้งและไหลเข้าสองครั้ง

จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้และในท่อส่งพบว่าผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศส่งผลต่อความเป็นสุญญากาศในห้องเผาไหม้และผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศมีผลต่อคาบของความดันในท่อส่งและในห้องเผาไหม้ทำให้คาบของความดันลดลงผล

ของความดันในท่อส่งและในห้องเผาไหม้ในหนึ่งวัฏจักรเกิดขึ้นได้เร็วกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว  
ดังแสดงในรูปที่ 53



รูปที่ 52 แสดงผลของความดันในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้า  
อากาศที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 53 แสดงผลของความดันในท่อส่งในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป

#### 6.4.3 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่าง ๆ

ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จากการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Fast Fourier transform โดยการคงที่ความยาวท่อส่งและอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min แต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ดังนี้และผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปที่ 54

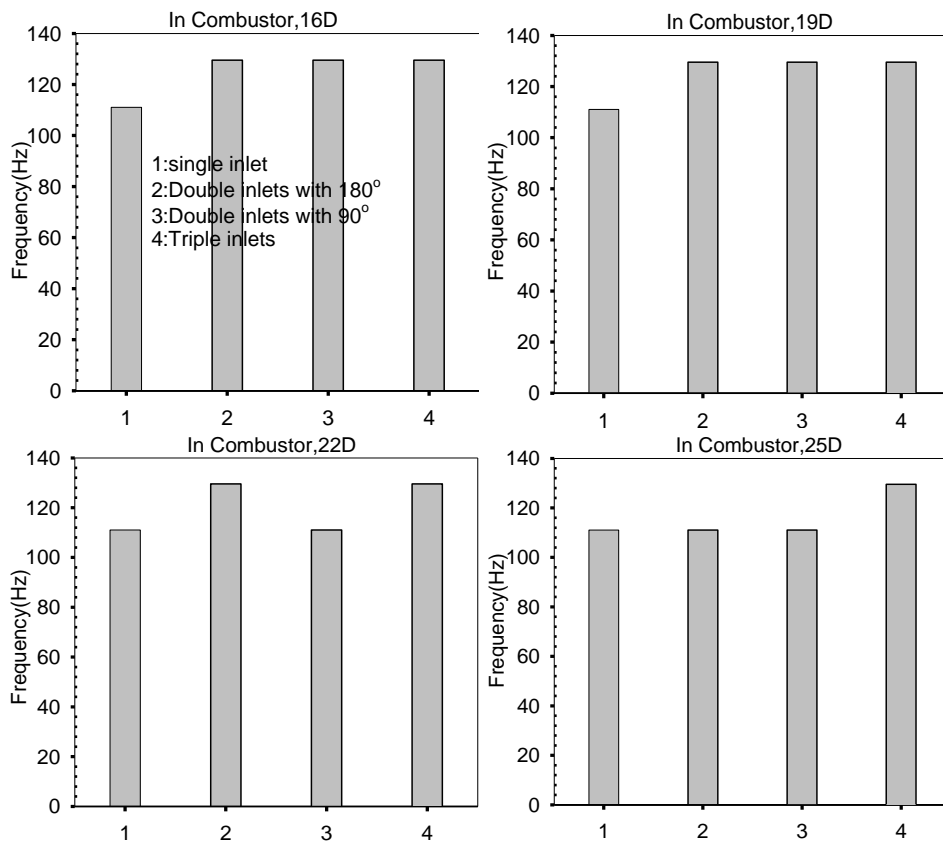
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีหนึ่งความถี่หลักสำหรับหนึ่งรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีความถี่เกิดขึ้นสองความถี่คือความถี่แรกอยู่ที่ 111.028 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว และความถี่ที่สองอยู่ที่ 129.533 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ทั้งสามรูปแบบของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่เหลือ จะเห็นได้ว่าผล

ของการเพิ่มจำนวนช่องทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 18.5 Hz (จาก 111.028 Hz ไปเป็น 129.533 Hz)

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีหนึ่งความถี่หลักสำหรับหนึ่งรูปแบบห้องเผาไหม้จากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีความถี่เกิดขึ้นสองความถี่คือความถี่แรกอยู่ที่ 111.028 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศเดี่ยว และความถี่ที่สองอยู่ที่ 129.533 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ทั้งสามรูปแบบของการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศที่เหลือ จะเห็นได้ว่าผลของการเพิ่มจำนวนช่องทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 18.5 Hz

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีหนึ่งความถี่หลักสำหรับหนึ่งรูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้จากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีความถี่เกิดขึ้นสองความถี่คือความถี่แรกอยู่ที่ 111.028 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศเดี่ยวและสองช่องทางเข้าที่ห่างกัน  $90^\circ$  ส่วนความถี่ที่สองอยู่ที่ 129.533 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และสามช่องทางเข้าอากาศ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนช่องทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นประมาณ 18.5 Hz แต่การติดตั้งช่องทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ไม่ได้ทำให้ความถี่ในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นแต่จะเท่ากับความถี่ของห้องเผาไหม้แบบท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีหนึ่งความถี่หลักสำหรับหนึ่งรูปแบบห้องเผาไหม้จากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบของการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีความถี่เกิดขึ้นสองความถี่คือความถี่แรกอยู่ที่ 111.028 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศเดี่ยว, สองช่องทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $180^\circ$ , และ สองช่องทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $90^\circ$  ส่วนความถี่ที่สองอยู่ที่ 129.533 Hz เป็นความถี่หลักของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งช่องทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนช่องทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 18.5 Hz



รูปที่ 54 ผลของความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ

#### 6.4.4 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่งใกล้ปากทางออก (ใกล้ทางออก 4D) ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ

ผลของความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่งจากการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Fast Fourier transform โดยวัดในท่อส่งเข้ามาเป็นระยะ 4D โดยการคงที่ความยาวท่อส่งและคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.8 l/min แต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ดังนี้และผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปที่ 55

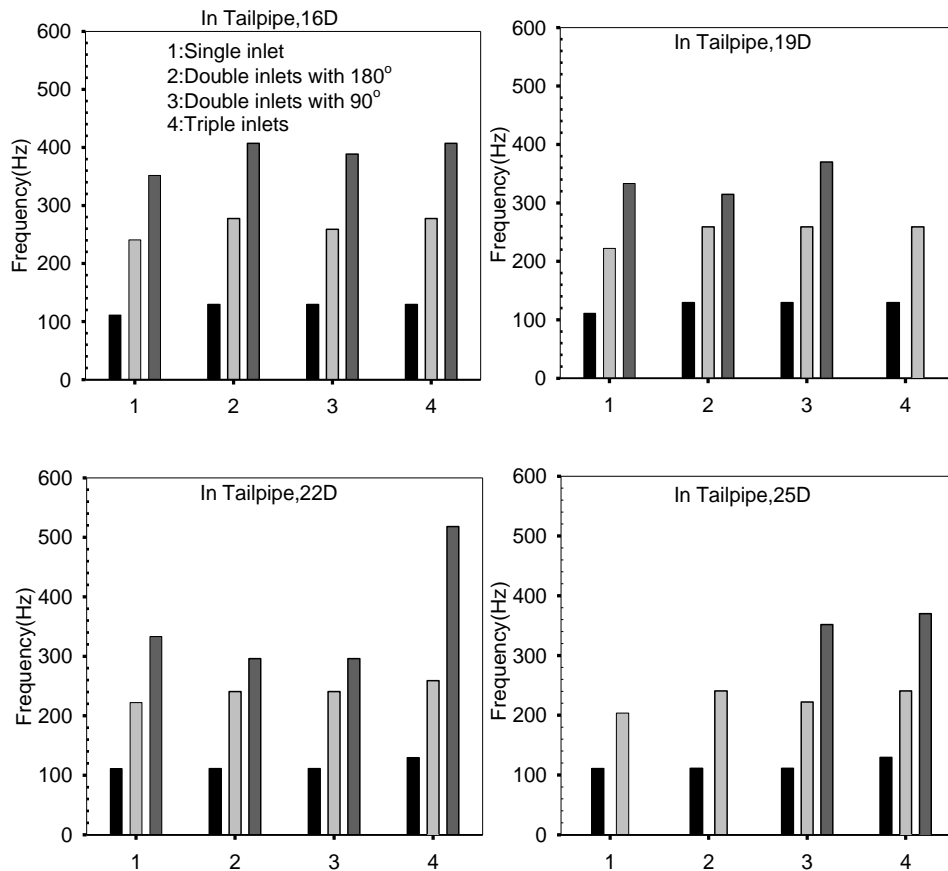
ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้หนึ่งความถี่ทำให้เกิดความถี่ย่อยในท่อส่งสามความถี่ย่อยด้วยกันในแต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศคือห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศท่อเดี่ยวสร้างความถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 111.028 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อส่งสามความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 111.028$  Hz,  $f_2 = 240.562$  Hz ( $2.166f_1$ ), และ  $f_3 = 351.591$  Hz ( $3.166f_1$ ) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  สร้างความถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 129.533 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อส่งสามความถี่ย่อยดังนี้





111.028 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสามความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 111.028$  Hz,  $f_2 = 240.562$  Hz ( $2.16f_1$ ), และ  $f_3 = 296.076$  Hz ( $2.66f_1$ ) และห้องเผาไหม้สุดท้ายเป็นห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าสร้างควมถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 129.533 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสามความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 129.533$  Hz,  $f_2 = 259.067$  Hz ( $2f_1$ ) และ  $f_3 = 518.134$  Hz ( $4f_1$ ) จะเห็นได้ว่าความถี่ย่อยลำดับที่ 1 ( $f_1$ ) คือความถี่เดียวกันกับความถี่หลักในห้องเผาไหม้แบบพัลส์สำหรับท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวและสามท่อทางเข้า

ความยาวท่อนส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้หนึ่งความถี่ทำให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสองหรือสามความถี่ย่อยขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไปคือ ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวสร้างควมถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 111.028 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสองความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 111.028$  Hz และ  $f_2 = 203.552$  Hz ( $1.83f_1$ ) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  สร้างควมถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 111.028 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสองความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 111.028$  Hz และ  $f_2 = 240.562$  Hz ( $2.16f_1$ ) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  สร้างควมถี่ในห้องเผาไหม้เป็น 111.028 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสามความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 111.028$  Hz,  $f_2 = 222.057$  Hz ( $2.f_1$ ), และ  $f_3 = 351.591$  Hz ( $3.16f_1$ ) และห้องเผาไหม้สุดท้ายเป็นห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าสร้างควมถี่หลักในห้องเผาไหม้เป็น 129.533 Hz ส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อนส่งสามความถี่ย่อยดังนี้  $f_1 = 129.533$  Hz,  $f_2 = 240.5625$  Hz ( $1.85f_1$ ) และ  $f_3 = 370.095$  Hz ( $2.85f_1$ ) จะเห็นได้ว่าความถี่ย่อยลำดับที่ 1 ( $f_1$ ) คือความถี่เดียวกันกับความถี่หลักในห้องเผาไหม้ไม่ว่ารูปแบบทางเข้าอากาศของห้องเผาไหม้จะเปลี่ยนไป



รูปที่ 55 ผลของความถี่ย่อยของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่งที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่าง ๆ

#### 6.4.5 เปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันในห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง

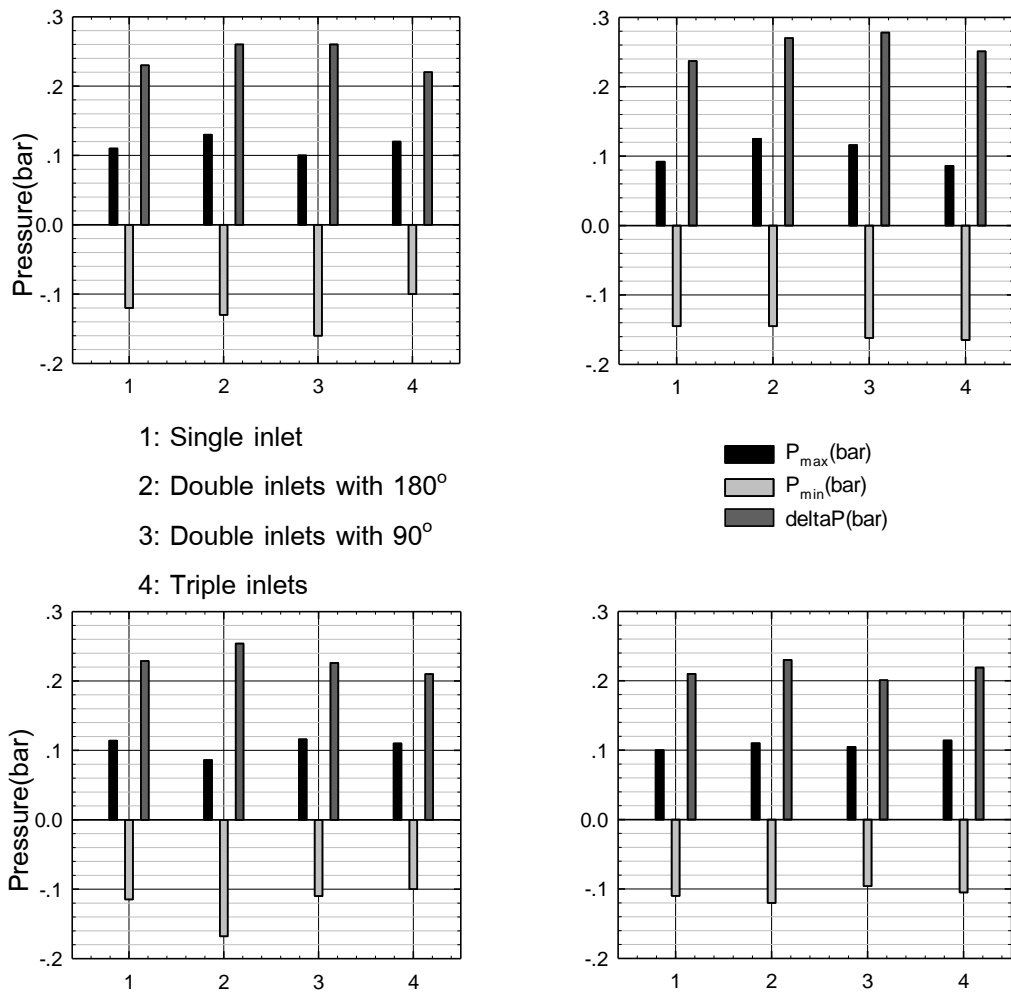
จากผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศหลายรูปแบบและความยาวท่อส่งที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบผลของความดันสูงสุด ความดันต่ำสุดและผลต่างความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ดังผลที่แสดงในรูปที่ 56 และผลเป็นดังนี้

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 16D พบว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็นสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และสามท่อทางเข้าให้ผลของความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.13 bar และ 0.12 bar ตามลำดับ ส่วนผลต่างความดันสูงสุดและความดันต่ำสุดจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และสองที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ -0.13 bar และ -0.16 bar ตามลำดับ ส่วนผลต่างความดันอยู่ที่ 0.26 bar ซึ่งเท่ากับทั้งสองรูปแบบการติดตั้งทางเข้าอากาศ

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 19D พบว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็นสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.125 bar และ 0.116 bar ตามลำดับ ส่วนผลต่างความดันสูงสุดและความดันต่ำสุดจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองและสามท่อทางเข้า ให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 22D พบว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็นสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.116 bar ผลต่างความดันสูงสุดจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.254 bar ส่วนความดันต่ำสุดอยู่ที่ การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ -0.168 bar

ความยาวท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ยาวเป็น 25D พบว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็นสองและสามท่อทางเข้าให้ผลของความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.11 bar, 0.1048 bar, และ 0.114 bar ตามลำดับ ผลต่างความดันสูงสุดการเพิ่มท่อทางเข้าสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และสามท่อทางเข้าให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวอยู่ที่ 0.23 bar และ 22 bar ตามลำดับ ส่วนผลความดันต่ำสุดอยู่ที่ -0.12 bar การเพิ่มท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  ให้ผลที่ดีกว่าท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว



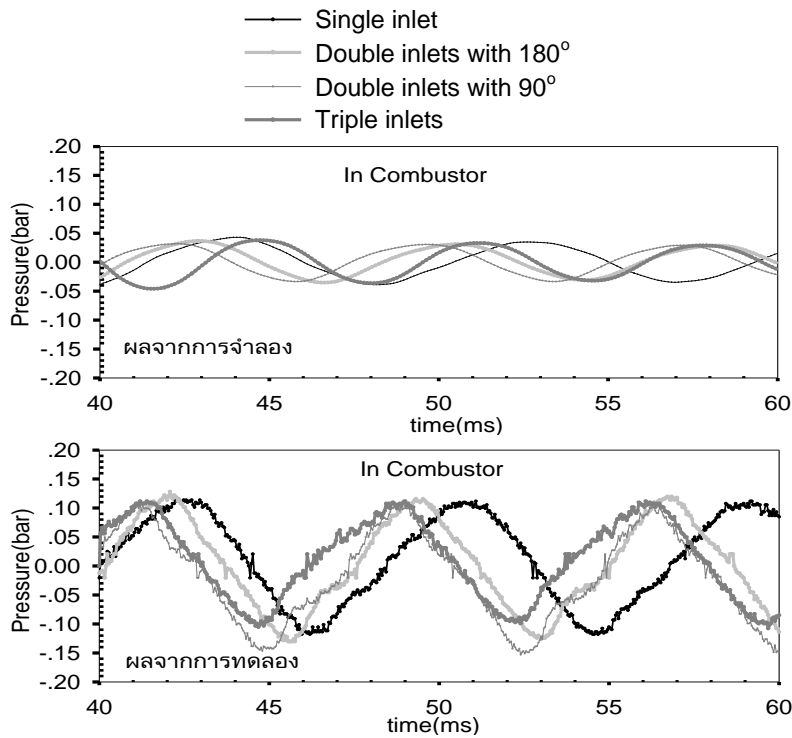
รูปที่ 56 แสดงผลการเปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันในห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง

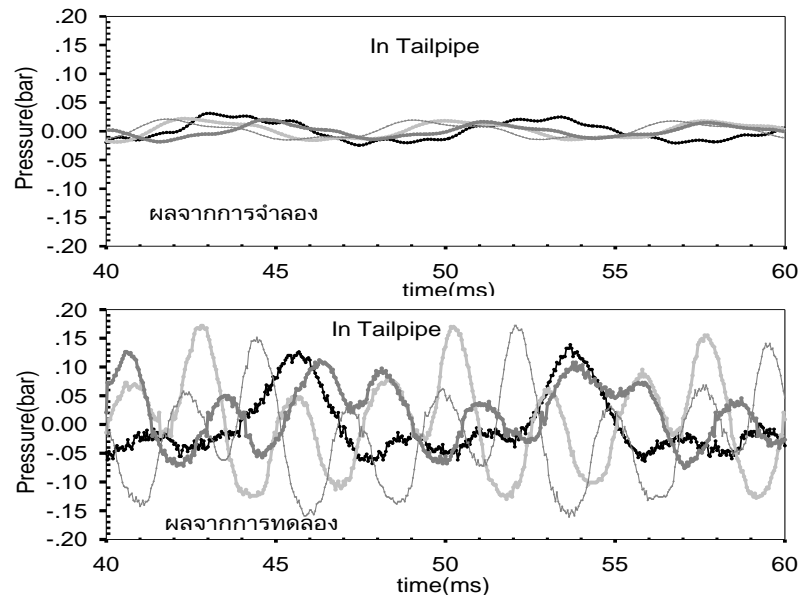
## 6.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลจากพฤติกรรมเผาไหม้แบบพัลส์กับผลการทดลอง

### 6.5.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง

ผลของความดันที่เกิดขึ้นเป็นผลของความดันในห้องเผาไหม้และในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลองซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 57 โดยที่การจำลองพฤติกรรมเผาไหม้จะใช้เชื้อเพลิงแก๊สโพรเพนในอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ 1.2435 g/s และดึงผลมาแสดงที่เวลา 40 ms ถึง 60 ms เนื่องด้วยพฤติกรรมการเผาไหม้คงที่แล้วพบว่าผลของความดันจากการจำลองที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทั้ง 4 รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศให้ผลของความดันทั้งในห้องเผาไหม้และในท่อส่งใกล้เคียงกันซึ่งค่า

ความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.04 bar และค่าความดันต่ำสุดในห้องเผาไหม้อยู่ที่ -0.04 bar ส่วนในท่อส่งค่าความดันสูงสุดอยู่ที่ 0.025 bar และค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ -0.025 bar แต่เมื่อนำผลของความดันจากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่าความดันจากผลการทดลองจะสูงกว่าจากการจำลองเนื่องด้วยการทดลองใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊ส LPG ทำให้ค่าที่ได้ไม่เท่ากับการทดลองเสียทีเดียวแต่พฤติกรรมของความดันเหมือนกับการทดลองคือเป็นวัฏจักรการเผาไหม้มีการไหลเข้าของอากาศใหม่มาผสมและมีการไหลออกของไอเสียในตอระเบิดซึ่งก็เกิดเป็นพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์ทำให้สามารถนำค่าต่างๆที่ได้จากการจำลองไปอธิบายพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ได้ด้วยพฤติกรรมเดียวกับการทดลอง



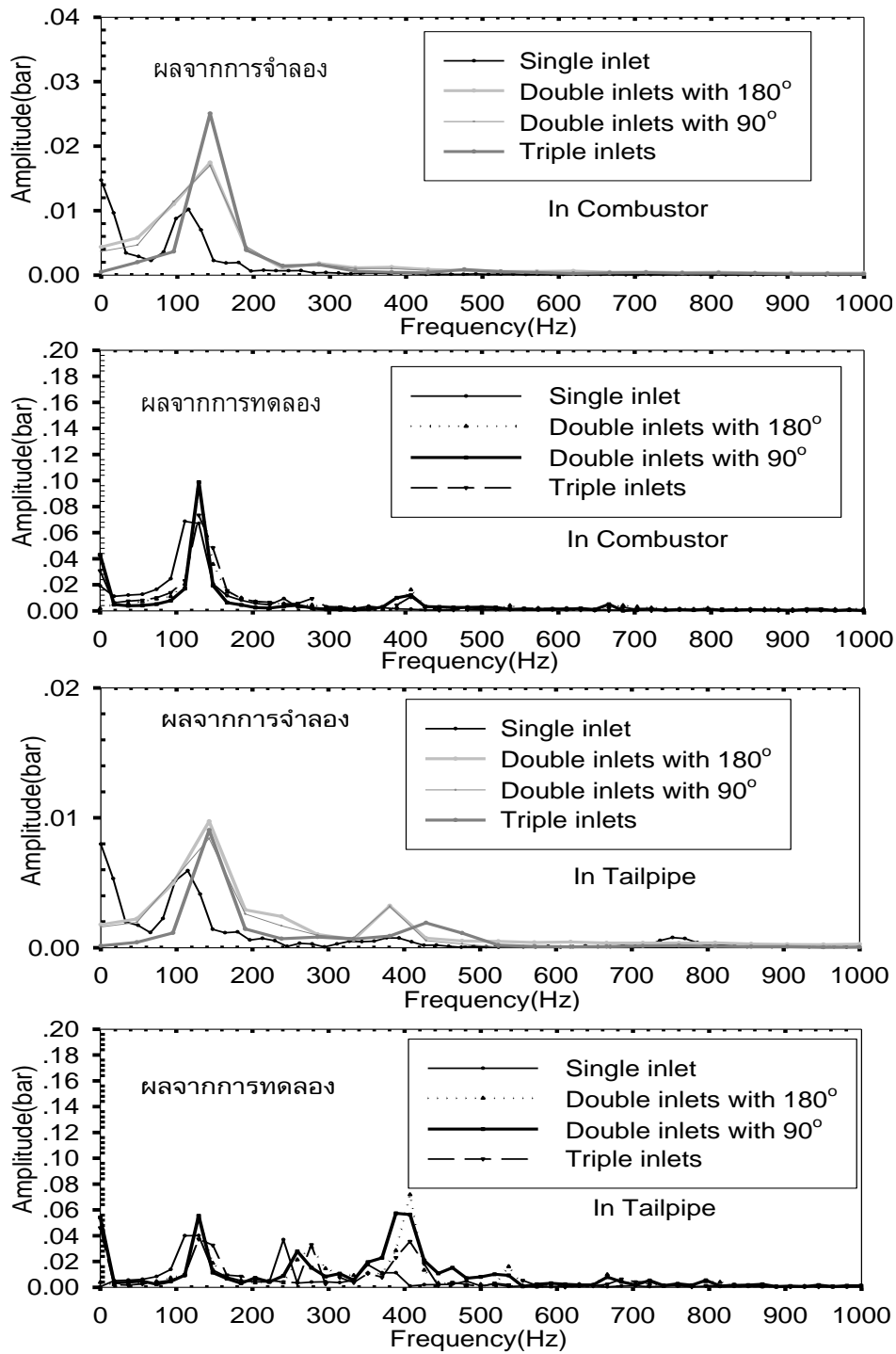


รูปที่ 57 แสดงผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรม การเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง

### 6.5.2 ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากผลการจำลองพฤติกรรม การเผาไหม้เทียบกับการทดลอง

ผลของความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จากการจำลองพฤติกรรม การเผาไหม้พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 114.65 Hz ไปเป็น 142.86 Hz ซึ่งผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลที่เหมือนกับผลจากการทดลองเพียงแต่ผลของความถี่หลักในห้องเผาไหม้จากการทดลองน้อยกว่าความถี่หลักจากผลการจำลองซึ่งจากการทดลองพบว่าการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศจากท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวเป็นสองและสามท่อทางเข้าส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มจาก 111.028 Hz ไปเป็น 129.533 Hz ซึ่งจากผลการจำลองก็สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบพัลส์ในเบื้องต้นได้เนื่องด้วยให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 58

ผลของความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่งโดยวัดในท่อส่งเข้ามาเป็นระยะ 4D จากปากทางออกของท่อส่ง ผลของการระเบิดแบบพัลส์ด้วยความถี่หลักในห้องเผาไหม้หนึ่งค่าส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อส่งสองความถี่ย่อยจากผลการจำลองส่วนจากผลการทดลอง ผลของการระเบิดแบบพัลส์ด้วยความถี่หลักในห้องเผาไหม้หนึ่งค่าส่งผลให้เกิดความถี่ย่อยในท่อส่งสามความถี่ย่อยซึ่งพบว่าทั้งจากการทดลองและการจำลองความถี่ย่อยลำดับที่หนึ่งย่อมทำกับความถี่หลักในห้องเผาไหม้เสมอไม่ว่ารูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร



รูปที่ 58 แสดงผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองเทียบกับผลการทดลอง









## 7.สรุปผลการทดลอง

7.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อส่งด้วยการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว, สองท่อทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $180^\circ$ , สองท่อทางเข้าอากาศที่ห่างกัน  $90^\circ$ , และสามท่อทางเข้าอากาศ ผลของความยาวท่อส่งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มขึ้นสูงเมื่อเทียบกับความยาวท่อส่งตั้งต้น (16D) เนื่องด้วยความยาวท่อส่งที่ยาวขึ้นส่งผลให้การดึงอากาศใหม่เข้าห้องเผาไหม้น้อยลงทำให้ผลจากการดึงอากาศไปรบกวนผลของอุณหภูมิน้อยลงตามไปด้วย แต่สำหรับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อส่งสูงสำหรับความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D, 19D, และ 25D แต่สำหรับความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D การติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าให้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงเมื่อเทียบกับท่อทางเข้าอากาศเดี่ยว (พิจารณาที่  $X/D=1$ ) สำหรับผลของอุณหภูมิต่ำกว่า  $X/D$  เกิน 3 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

7.2 ผลของความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อส่งความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ให้ผลของความเร็วเฉลี่ยที่สูงในทุกรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ใช้ในการทดลอง ส่วนการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้าในทุกความยาวท่อส่งที่ใช้ในการทดลองให้ผลของความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อส่งที่สูง (พิจารณาที่  $X/D=1$ )

7.3 ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนของความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่สูงจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $180^\circ$  และ  $90^\circ$  ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์กว่า ส่วนความยาวท่อส่งยาวเป็น 19D ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่สูงสำหรับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวและสามท่อทางเข้า สำหรับการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน  $90^\circ$  ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่สูงด้วยความยาวของท่อส่งที่ยาวเป็น 16D และ 19D การเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้าให้ผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนที่สูงในกรณีของความยาวท่อส่งยาวเป็น 22D แต่ในกรณีของความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D การเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อไม่ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชนเพิ่มขึ้นเลย

7.4 ผลการเปลี่ยนแปลงของความดันในกรณีการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจากท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อทำให้ความดันสถิตในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อทางเข้าอากาศเดี่ยวแต่ผลของความดันสูงสุดจะใกล้เคียงกันไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงซึ่งความดันสถิตในห้องเผาไหม้มีผลต่อการดึงอากาศใหม่และไอร้อนกลับมาจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นแต่ถ้าการดึงอากาศมีมากไปก็ไม่ดีสำหรับการเผาไหม้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่งที่เหมาะสมถึงจะให้การดึงอากาศและการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น

7.5 ผลของความถี่ในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อสำหรับความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D, 19D, และ 22D โดยที่ความถี่ในห้องเผาไหม้ของท่อทางเข้าอากาศสองท่อและสามท่อทางเข้าให้ค่าความถี่ที่เท่ากัน แต่สำหรับความยาวท่อส่งยาวเป็น 25D ความถี่ในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเป็นสามท่อทางเข้า

7.6 จากผลการจำลองการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยโมเดลเครื่องต้นแบบที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D ให้ผลของการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้อุณหภูมิและความถี่ที่เกิดในห้องเผาไหม้และในท่อส่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้และในท่อส่งย่อมส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์บนพื้นผิวฟุ้งชนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

7.7 จากผลการจำลองการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยโมเดลเครื่องต้นแบบที่มีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D การเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความเร็วของเจ็ทลมร้อนที่เกิดขึ้นในท่อส่งและที่ปากทางออกของท่อส่งเพิ่มขึ้นจากผลการจำลองเมื่อนำไปเทียบกับการทดลองก็ให้ผลที่เหมือนกันคือการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศส่งผลให้ความเร็วของเจ็ทลมร้อนในท่อส่งและปากทางออกของท่อส่งเพิ่มขึ้นเนื่องด้วยมวลของอากาศในการดึงเข้ามาผสมเพิ่มขึ้น





## บรรณานุกรม

- [1] B.T. Zinn, "Applications of pulse combustion in industry, In Industrial Combustion Technologies", M.A. Lukasiewicz, Ed., American Society of Metals, Warren, PA, pp. 55-61, **1986**.
- [2] B.T. Zinn, "Pulse combustion applications: past, present and future", In Unsteady Combustion, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 113-137, **1996**.
- [3] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, "Pulse combustion drying", In Advanced Drying Technologies, 2nd Edition, Taylor&Francis, pp.225-261, **2009**.
- [4] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., Button, B.L., (**1992**), "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.13, pp. 106-115.
- [5] Viskanta, R., (**1993**), "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.6, pp.111-134.
- [6] Baughn, J.W., and Shimizu, S., (**1998**), "Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet", Heat Transfer, Vol. 111, No.4, pp. 1096–1098.
- [7] Keller, J.O., Eibeck, P.A., Bramlette, T.T., and Bar, P.K., (**1993**), "Pulse combustion: tailpipe exit jet characteristics", Combustion Science and Technology, Vol. 94, pp. 167-192.
- [8] Eibeck, P.A., Keller, J.O., Bramlette, T.T., and Sailor, D.J., (**1993**), "Pulse combustion: impinging jet heat transfer enhancement", Combustion Science and Technology, Vol. 94, pp. 147-165.
- [9] Patterson, T., Ahrens, F., and Stipp, G., (**2003**), "High performance impingement paper drying using pulse combustion technology", TAPPI Engineering Conference, May 11, Chicago, Illinois.
- [10] Wu, Z.H., Mujumdar, A.S., Liu, X.D., and Yang, L., (**2006**), "Pulse combustion impingement to enhance paper drying", The 15<sup>th</sup> International Drying Symposium, August 20-23, Budapest, Hungary.
- [11] Smith, B.L. and Glezer, A., (**1998**), "The formation and evolution of synthetic jets", Physics of Fluids, Vol. 10, No. 9, pp. 2281-2297.

- [12] S. Li, "A numerical study of micro synthetic jet and its applications in thermal management", Ph.D. Thesis, the School of Mechanical Engineering, the Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, **2005**.
- [13] Pavlova, A., and Amitay, M., (**2006**), "Electronic cooling using synthetic jet impingement", Journal of Heat Transfer, Vol. 128, pp. 897-907.
- [14] Tesar, V., (**2009**), "Enhancing impinging jet heat or mass transfer by fluidically generated flow pulsation", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 87, pp. 181-192.
- [15] Vejrazka, J., Tihon, J., Mart, P. and Sobolík, V., (**2005**), "Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet", Physics of Fluids, Vol. 17, No.10, Article number 105102.
- [16] Keller, J.O., Barr, P.K., Bramlette, T.T., Evens, L.J., and Marchant, R.N., (**1989**), "Pulse combustion: demonstration of the characteristic mixing time in a commercial burner", Combustion Science and Technology, Vol. 66, pp. 127-137.
- [17] Kuts, P.S., Akulich, P.V., Grinchik, N.N., Strumillo, C., Zbicinski, I., and Nogotuv, E.F., (**2002**), "Modeling of gas dynamics in a pulse combustor chamber to predict initial drying process parameters", Chemical Engineering Journal, Vol. 86, pp. 25-31.
- [18] Geng, T., Zheng, F., Kiker, A.P., Kuznetsov A.V., Roberts, W.L., (**2007**), "Experimental and numerical investigation of an 8-cm valveless pulsejet", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.31, pp. 641-647.
- [19] Kilicarslan, A., and Arisoy, A., (**2008**), "Acoustic analysis of a liquefied petroleum gas-fired pulse combustor", Applied Acoustics, Vol.69, pp.770-777.
- [20] Ferguson, H., (**1979**), "Boundary-layer theory", 7<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York
- [21] Lam, C.K.G., and Bremhorst, K.A.,(**1981**), "Modified Form of the k- $\epsilon$  Model for Predicting wall Turbulence, Trans,ASME, J.Fluid Eng.,Vol.103,pp.456-460.
- [22] J.A. Kitchen, "Pulse combustion apparatus", United States Patent No. 4,697,358, October 6, **1987**.
- [23] Jr. H.N. Lockwood, "Pulse combustion energy system", United States Patent No. 4,941,820, July 17, **1990**.



**ภาคผนวก ก.**

**บทความสำหรับเผยแพร่ 1**

“ผลของรูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบ  
พัลส์”

การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและ  
กระบวนการ ครั้งที่ 12

# ผลของรูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

## Effect of Air Inlet Configurations on Flow Characteristics of Hot Air Jet from Pulse Combustor

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษารูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้เป็นชนิด Helmholtz แบบไร้วาล์วที่มีท่อส่งหน้าตัดกลมแบบท่อเดี่ยว ในการทดลองได้ศึกษาผลของจำนวนทางเข้าอากาศที่ต่อเข้ากับห้องเผาไหม้ และกำหนดอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่  $Q_{LPG} = 23.0, 24.7, 26.4, 28.1$  และ  $29.8$  ลิตร/นาที ในการศึกษาคุณลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนได้วัดความเร็วของเจ็ทลมร้อนด้วย Pitot tube และวัดอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนที่ออกจากท่อส่งโดยใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ล จากการทดลองพบว่าการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดี่ยวเป็น 2 ท่อมีผลให้ความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่การใช้ท่อทางเข้าอากาศเป็น 3 ท่อ มีผลทำให้เจ็ทลมร้อนมีอุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อย และความเร็วของเจ็ทลมร้อนจะลดลงตามแนวแกนเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีท่อทางเข้าอากาศ 2 ท่อ

ปฐมพร นระระโต  
มักตาร์ แวหะยี่  
กิตตินันท์ มลิวรรณ  
ชยุต นันทดุสิต  
สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112  
E-mail: [chayut@me.psu.ac.th](mailto:chayut@me.psu.ac.th)

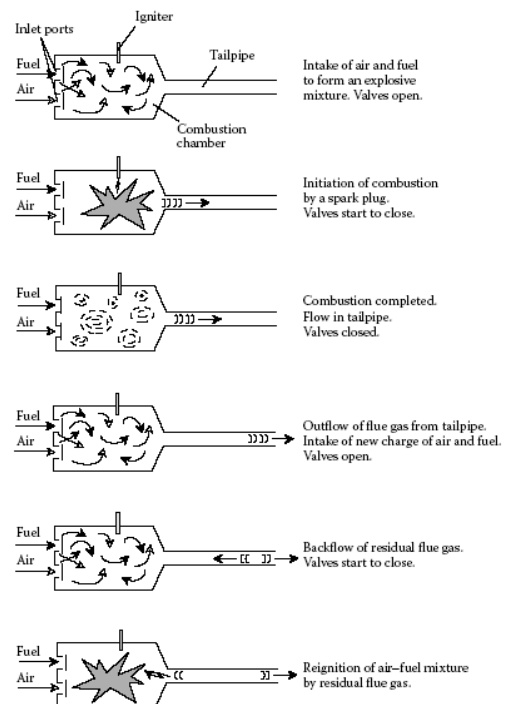
### 1. บทนำ

ในระบบการให้ความร้อนที่ใช้อยู่ทั่วไปจะใช้พัดลมในการเป่าเพิ่มความเร็วในอากาศ และใช้หัวเผาหรือฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ เกิดเป็นลมร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการอบหรือให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันดีเซล หรือก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงให้กับหัวเผา แต่ปัจจุบันราคาของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ทำให้โรงงานแบกภาระต้นทุนการผลิตมากขึ้น ในงานวิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบเผาไหม้หรือระบบให้ความร้อนแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง แทนระบบเผาไหม้แบบเดิมซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบต่อเนื่อง ระบบการเผาไหม้แบบพัลส์ (Pulse Combustion) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ สามารถนำมาใช้ในการสร้างอากาศร้อนที่มีความเร็วสูงหรือเจ็ทอากาศร้อนได้ โดยไม่ใช้เครื่องเป่าอากาศหรือเครื่องอัดอากาศ นอกจากนี้ปรากฏการณ์ของการสั่นที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของการเผาไหม้ (Combustion Intensity) ลดปริมาณการเกิดแก๊สพิษ เช่น  $NO_x$  และการไหลของเจ็ทแบบพัลส์ที่ออกจากห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ไปยังโหลดด้วยเมื่อเทียบกับระบบเผาไหม้แบบต่อเนื่อง ทำให้สามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ [1]

### 2. หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ซึ่งมีความซับซ้อนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้แบบเป็นจังหวะและการส่งผ่านคลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่ง กระบวนการเผาไหม้จะเริ่มจากอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สหรือละอองเชื้อเพลิงของเหลวถูกพ่นเข้าไปผสมกับอากาศในห้องเผา

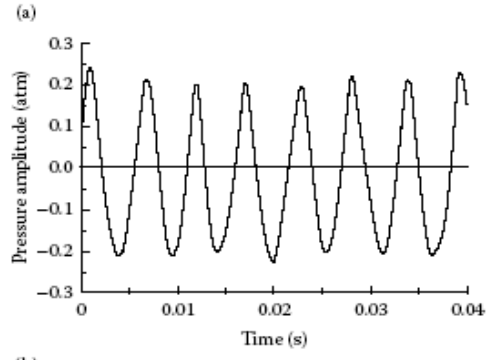
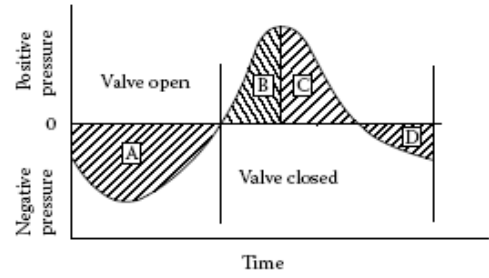
ไหม้ แล้วถูกจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Spark plug) ทำให้เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดในห้องเผาไหม้ ในจังหวะนี้ทางเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกปิดโดยวาล์วหรือด้วยความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ และแรงดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะดันให้แก๊สไอเสียไหลออกผ่านท่อส่งออกไปภายนอก



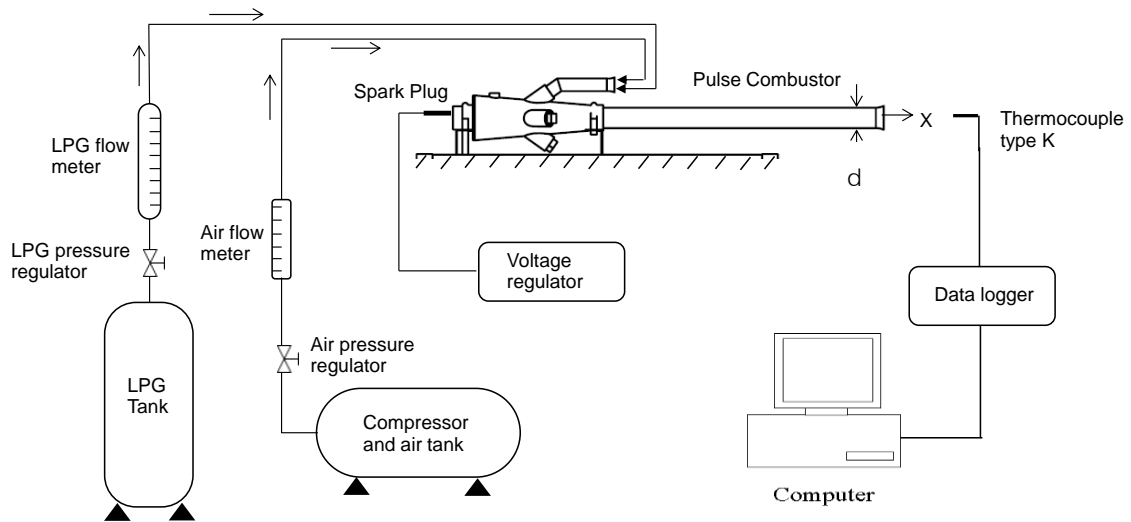
รูปที่ 1 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [1]

การไหลออกของแก๊สไอเสียจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อส่ง จนกระทั่งความดันภายในห้องเผาไหม้ลดลงต่ำสุด วาล์วอากาศและเชื้อเพลิงจะเปิดอีกครั้งทำให้อากาศและเชื้อเพลิงใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยการจุดติดไฟครั้งใหม่จะเกิดขึ้นเองอีกโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน การจุดติดจะเกิดโดยแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมายังห้องเผาไหม้ในจังหวะที่ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำสุด วัฏจักรการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเองด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการออกแบบห้องเผาไหม้และท่อส่ง สัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ชนิดของวาล์วเปิดปิดของอากาศและเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ โดยที่ในรูป (a) บริเวณ A เป็นช่วงที่อากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ B เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงใหม่จุดติดเกิดความร้อนทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูง อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ C เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกทางท่อส่ง ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง บริเวณ D เป็นช่วงที่โมเมนตัมของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกสร้างความดันติดลบภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ (a) ผลทางทฤษฎี และ (b) ผลจากการทดลอง [1]



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

#### 3.1 ชุดการทดลองและโมเดลที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบเครื่องต้นแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ชุดจ่ายเชื้อเพลิง ชุดจุดเดินเครื่อง และชุดวัดอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนจากท่อส่ง รูปที่ 3 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบระบบสร้างลมร้อน

สำหรับชุดจ่ายเชื้อเพลิง แก๊ส LPG จะถูกส่งออกจากถังแก๊ส LPG ผ่านวาล์วควบคุมความดันและอุปกรณ์ป้องกันย้อนกลับของเปลวไฟ ผ่านโรตารีเพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊สก่อนที่จะจ่าย

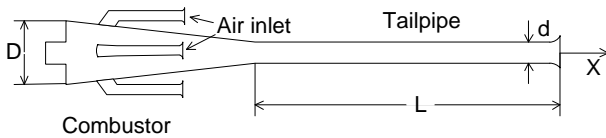
ผ่านท่อที่ติดตั้งภายในท่อทางเข้าของอากาศ โดยแก๊ส LPG จะถูกฉีดเข้าไปที่กลางของท่อส่งอากาศเพียงท่อเดียว

สำหรับชุดจุดเดินเครื่อง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวเทียนที่ติดตั้งท้ายของห้องเผาไหม้ซึ่งจะติดต่อกับชุดวงจรไฟฟ้าสำหรับจุดหัวเทียน และส่วนจ่ายอากาศผ่านท่อส่งซึ่งอากาศจะถูกส่งจากถังป้อนอากาศผ่านท่อส่งไปยังท่อทางเข้าของอากาศร่วมกับท่อแก๊ส LPG แต่หลังจากที่จุดติดแล้วจะหยุดจ่ายอากาศ และหัวเทียนถูกใช้จุดระเบิดตอนเริ่มต้นเพียงครั้งเดียวเท่านั้น หลังจากนั้นห้องเผาไหม้จะเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยตัวเอง

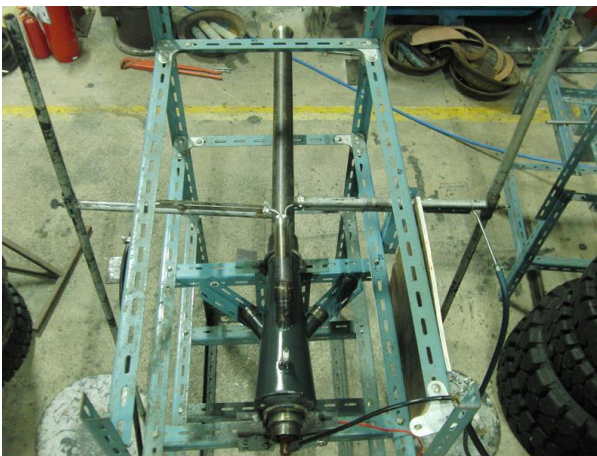
สำหรับชุดอุปกรณ์วัดประกอบด้วย อุปกรณ์วัดความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจากท่อส่งที่ระยะห่างจากท่อส่งต่างๆ โดยใช้ Pitot-static tube ในการวัดความเร็ว และใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลในการวัดอุณหภูมิ

### 3.2 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบห้องเผาไหม้ขึ้นมา เพื่อศึกษาผลของจำนวนทางเข้าอากาศและรูปแบบการติดตั้งทางเข้าที่มีต่ออุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทอากาศร้อนที่ออกจากท่อส่ง รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา โดยกำหนดให้ปริมาตรของห้องเผาไหม้คงที่ ห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ยาว 300 mm และด้านท้ายของห้องเผาไหม้ติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิงตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งจะมีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ส่วนของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งออกแบบให้เป็นข้อต่อเกลียวในสามารถเปลี่ยนท่อส่งได้ ท่อส่งทำจากท่อสเตเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d=47$  mm ยาว  $L=750$  mm (ประมาณ 16 d) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสเตเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ถูกงอให้ปลายชี้ไปที่ทิศทางเดียวกับท่อส่ง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งท่อทางเข้าอากาศสามารถปิดฝาปิดในกรณีที่ نمیใช้งานได้



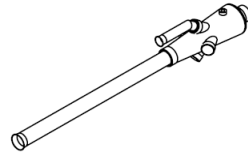
รูปที่ 4 โมเดลของห้องเผาไหม้



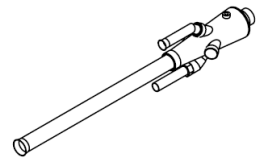
รูปที่ 5 ภาพถ่ายของห้องเผาไหม้

ในการทดลองศึกษาผลของจำนวนทางเข้าอากาศและรูปแบบการติดตั้งทางเข้าได้ศึกษาทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6 คือ รูปแบบที่ 1 มีทางเข้าอากาศทางเดียว รูปแบบที่ 2 มีทางเข้า

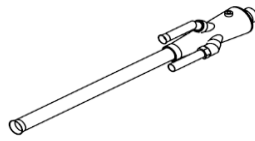
อากาศ 2 ทาง ห่างกัน 180 องศา (ทางเข้าอากาศอยู่ตรงข้ามกันพอดี) รูปแบบที่ 3 มีทางเข้าอากาศ 2 ทาง ห่างกัน 90 องศา และรูปแบบที่ 4 มีทางเข้าอากาศทั้งหมด 3 ทางเรียงติดกัน



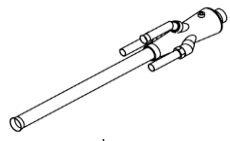
(ก)รูปแบบที่ 1 มีทางเข้าอากาศเดียว



(ข)รูปแบบที่ 2 มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา



(ค)รูปแบบที่ 3 มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา

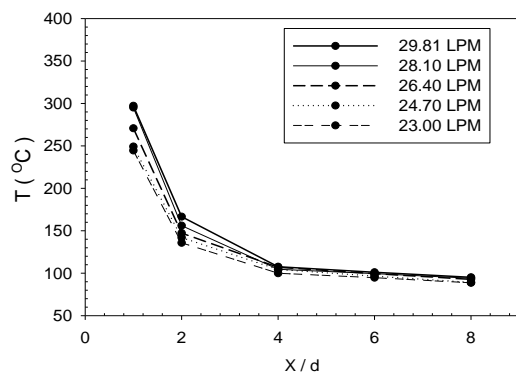


(ง)รูปแบบที่ 4 มีทางเข้าอากาศทั้งหมด 3 ทางเรียงติดกัน

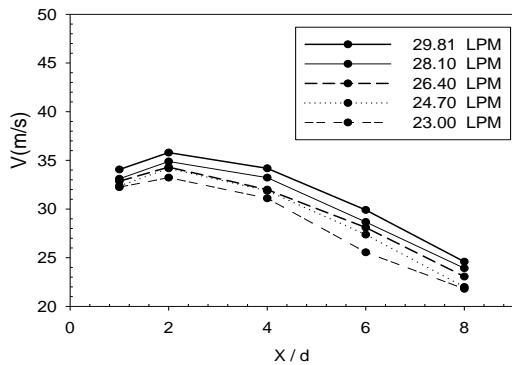
รูปที่ 6 รูปแบบทางเข้าอากาศที่ศึกษา

### 4. ผลการทดลอง

ในกรณีของรูปแบบที่ 1 ที่มีทางเข้าอากาศเดียวดังแสดงผลในรูปที่ 7 และ 8 อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนลดลงตามระยะ  $X/d$  และอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ระยะ  $X/d=1$  ในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่  $297.19$  °C ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที ส่วนความเร็วของเจ็ทลมร้อนจะอยู่ที่ระยะห่างจากปากทางออก  $X/d=2$  และความเร็วเจ็ทลมร้อนจะลดลงตามระยะ  $X/d$  ที่เพิ่มขึ้น ในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG โดยความเร็วเจ็ทลมร้อนสูงสุดอยู่ที่  $35.79$  m/s ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที การลดอัตราการไหลแก๊ส LPG ในช่วงการทดลอง มีผลให้ความเร็วของเจ็ทลมร้อนลดลงตามลำดับที่ระยะ  $X/d$  เดียวกันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่อุณหภูมิของเจ็ทที่ตำแหน่ง  $X/d=1$  และ 2 ลดลงอย่างเด่นชัด แต่ที่ระยะห่าง  $X/d= 4, 6$  และ 8 อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจะใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไข



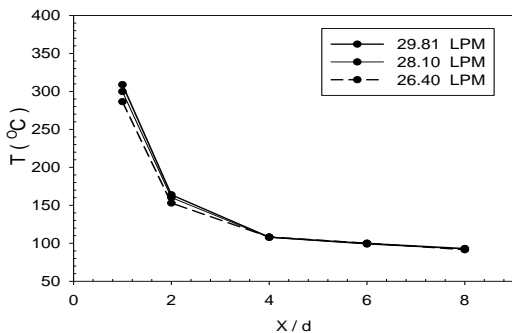
รูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 1



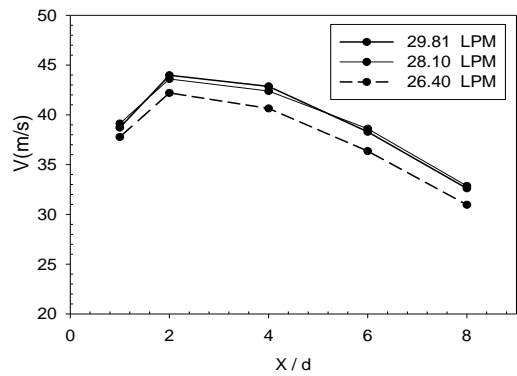
รูปที่ 8 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 1

สำหรับผลของรูปแบบที่ 2 กรณีมีทางเข้าอากาศ 2 ทางวางห่างกัน 180 องศา พบว่าในการทดสอบรูปแบบของทางเข้าอากาศในรูปแบบนี้ทดสอบได้เพียงแค่ 3 อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเท่านั้น โดยค่าต่ำสุดที่ทำให้เกิดการจุดติดและเผาไหม้ต่อเนื่องด้วยตัวเองอยู่ที่ 26.4 ลิตรต่อนาที ถ้าใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG น้อยกว่านี้ไม่สามารถเดินเครื่องด้วยตัวเองได้ จะต้องมีกรเติมอากาศช่วยผ่านทางท่อส่งตลอดเวลา สาเหตุอาจเป็นเพราะกรณีใช้อัตราการไหลแก๊สน้อยในจังหวะที่เกิดสูญญากาศในห้องเผาไหม้ จังหวะตอนที่ดึงเปลวไฟกลับเข้าห้องเผาไหม้ไม่แรงเพียงพอทำให้ระบบไม่สามารถทำงานต่อได้ด้วยตัวเอง

จากรูปที่ 9 พบว่าอุณหภูมิของเจ็ทจากท่อส่งจะลดลงตามระยะ X/d ที่เพิ่มขึ้น โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ระยะ X/d=1 ในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG และมีอุณหภูมิสูงสุดของเจ็ทลมร้อนอยู่ที่ 308.87 °C ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที และจากรูปที่ 10 พบว่าความเร็วเจ็ทจะสูงสุดที่ระยะ X/d=2 และลดต่ำลงตามระยะ X/d ที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG โดยความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 43.97 m/s ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สจะมีผลต่ออุณหภูมิของเจ็ทน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วของเจ็ท

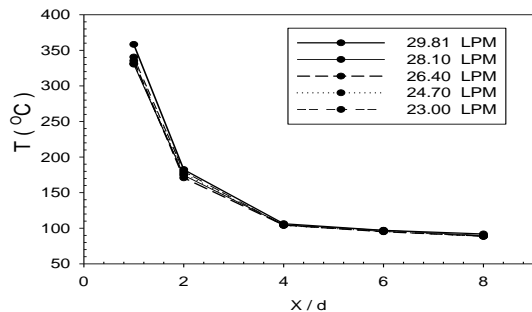


รูปที่ 9 แสดงผลของอุณหภูมิของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 2

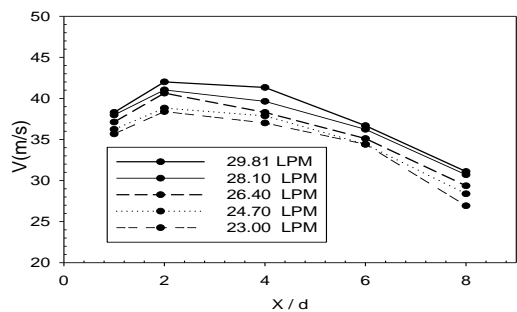


รูปที่ 10 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 2

ในกรณีของรูปแบบที่ 3 ที่มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา ดังแสดงผลในรูปที่ 11 และ 12 พบว่ากรณีรูปแบบนี้สามารถเผาไหม้ต่อเนื่องได้ทุกเงื่อนไขอัตราการไหลแก๊ส LPG อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนลดลงตามระยะ X/d ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของรูปแบบที่ 2 แต่อุณหภูมิสูงสุดที่ระยะ X/d=1 ในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 350 °C ซึ่งสูงกว่ากรณีแบบที่ 2 ในขณะที่ความเร็วจะสูงสุดที่ระยะ X/d=2 จะมีค่าต่ำกว่ากรณีแบบที่ 2 ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากรูปแบบของทางเข้าอากาศที่ต่างกัน อาจมีผลต่อรูปแบบการไหลและปรากฏการณ์เผาไหม้ที่เกิดในห้องเผาไหม้



รูปที่ 11 แสดงผลของอุณหภูมิของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 3

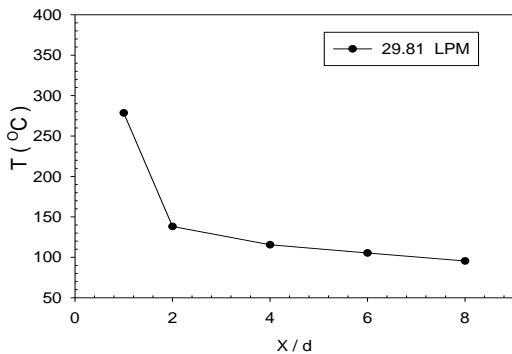


รูปที่ 12 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 3

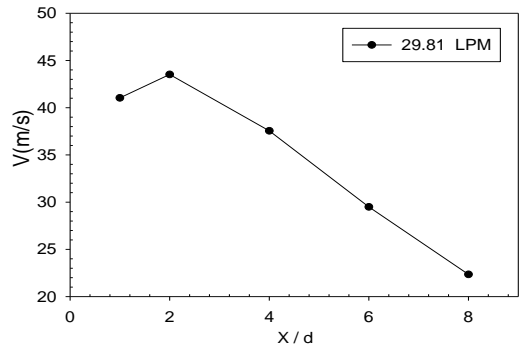
รูปแบบที่ 4 กรณีมีทางเข้าอากาศทั้งหมด 3 ทางเรียงติดกัน ในการทดสอบรูปแบบทางเข้าอากาศในรูปแบบนี้จะใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ต่ำสุดที่ทำให้รูปแบบนี้ทำงานอยู่ได้คือ 29.81 ลิตรต่อนาที จากผลพบว่าอุณหภูมิของเจ็ทจะสูงสุดที่ระยะ  $X/d=1$  และลดลงตามระยะ  $X/d$  ที่เพิ่มขึ้น โดยมีอุณหภูมิของเจ็ทสูงสุดอยู่ที่  $278.57^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่อนข้างจะต่ำกว่ากรณีอื่นๆ อาจเกิดจากปริมาณอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้มีปริมาณสูงเกินไป ทำให้เจ็ทมีอุณหภูมิต่ำลง ส่วนความเร็วของเจ็ทมีค่าสูงสุดที่ระยะ  $X/d=2$  อยู่ที่  $43.51\text{ m/s}$  ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีทางเข้าอากาศ 2 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 13 และ รูปที่ 14

หากทำการเปรียบเทียบเฉพาะเงื่อนไขที่ให้อุณหภูมิเจ็ทสูงสุดที่ตำแหน่ง  $X/d=1$  ของท่อทางเข้าแต่ละรูปแบบที่เงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 29.81 และแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นหรือลดลงเทียบกับกรณีของรูปแบบที่ 1 ที่มีท่อทางเข้าอากาศเพียงท่อเดียว จะพบว่ารูปแบบห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 ที่มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา จะให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนสูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 21% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของลมร้อนของห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 1 ส่วนห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 4 ในกรณีมีทางเข้าอากาศทั้งหมด 3 ทางเรียงติดกันพบว่าให้อุณหภูมิเจ็ทลมร้อนที่ต่ำกว่าทุกๆ แบบ โดยต่ำกว่ากรณีของรูปแบบที่ 1 ถึงประมาณ 6% ดังแสดงในรูปที่ 15

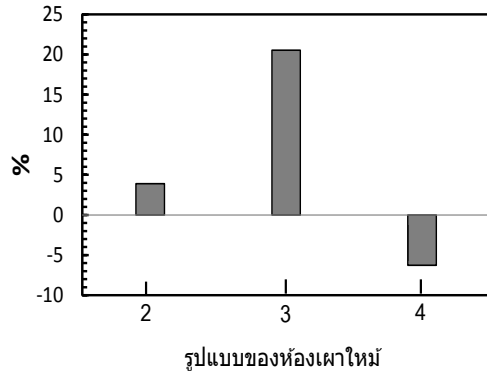
จากรูปที่ 16 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของความเร็วเฉลี่ยเมื่อเทียบกับห้องเผาไหม้ในแบบที่ 1 กรณีมีทางเข้าอากาศทางเดียว ที่เงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที และที่ตำแหน่งความเร็วเจ็ทสูงที่สุดที่  $X/d=2$  พบว่ารูปแบบห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 2 ให้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สูงที่สุดและเพิ่มขึ้น 22.87% เมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของลมร้อนของห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 1 รองลงมาคือกรณีของห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 4 และที่ 3 ตามลำดับ



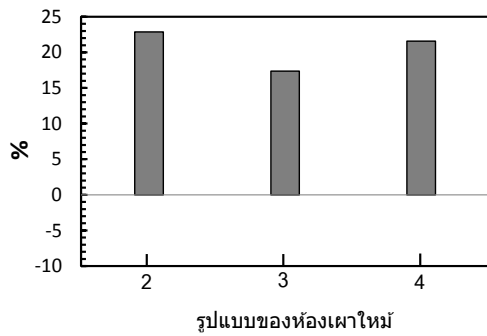
รูปที่ 13 แสดงผลของอุณหภูมิของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 4



รูปที่ 14 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของทางเข้าอากาศในรูปแบบที่ 4



รูปที่ 15 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้ทั้งสามแบบ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของลมร้อนของห้องเผาไหม้ในแบบที่ 1 ที่มีทางเข้าอากาศทางเดียวที่เงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที ที่ตำแหน่ง  $X/d=1$



รูปที่ 16 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนของห้องเผาไหม้ทั้งสามแบบ เมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของลมร้อนของห้องเผาไหม้ในแบบที่ 1 ที่มีทางเข้าอากาศทางเดียวที่เงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที ที่ตำแหน่ง  $X/d=2$

## 5. สรุปผลการศึกษา

(1) การเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดียวเป็น 2 ท่อ มีผลให้อุณหภูมิความร้อนและความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 21 และ 23 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากหลังจากเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้แล้วเกิดสภาวะสูญญากาศ แล้วอากาศจากภายนอกถูกดูดเข้าห้องเผาไหม้อีกครั้ง ซึ่งการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศมีผลให้ปริมาณอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น และมีลมร้อนที่ส่งผ่านท่อส่งมีความเร็วสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้อุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้น อาจเกิดจากการเผาไหม้ของแก๊ส LPG ที่สมบูรณ์ขึ้นเนื่องจากปริมาณอากาศที่สูงขึ้นด้วย

(2) ผลของการวางท่อทางเข้าอากาศ 2 ท่อที่ต่างกัน กรณีห้องเผาไหม้แบบที่ 2 และแบบที่ 3 มีผลให้อุณหภูมิเจ็ทลมร้อนและความเร็วเจ็ทลมร้อนแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากมีปรากฏการณ์การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่ต่างกัน

(3) การเพิ่มท่อทางเข้าอากาศเป็น 3 ท่อ ไม่ช่วยให้อุณหภูมิความร้อนจากท่อส่งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีท่อเดียวและ 2 ท่อเนื่องจากทางเข้าอากาศแบบ 3 ท่อทำให้อากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้มากเกินไป จึงกลายเป็นอากาศส่วนเกินส่งผลให้อุณหภูมิต่ำกว่ากรณีอื่นๆ

(4) สำหรับความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จะสูงที่สุดห่างจากปากทางออกเป็นระยะ 2 เท่าของขนาดท่อส่ง เนื่องจากระยะนี้เป็นระยะที่ให้โมเมนตัมสูงที่สุดและห่างจากการรบกวนเนื่องจากการไหลกลับของเปลวไฟในขณะเกิดสูญญากาศในการระเบิดรอบถัดไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Kudra, T. and Mujumdar, A. S., 2009, Pulse combustion drying, In *Advanced Drying Technologies*, 2nd Edition, Taylor&Francis, pp.225-261.
- [2] B.T., Zinn, 1986, Applications of pulse combustion in industry, In *Industrial Combustion Technologies*, M.A. Lukasiewicz, Ed., American Society of Metals, Warren, PA, pp. 55-61.
- [3] Zinn, B.T., 1996, Pulse combustion applications: past, present and future, In *Unsteady Combustion*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 113-137.
- [4] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., Button, B.L., 1992, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.13, pp. 106-115.
- [5] Viskanta, R., 1993, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.6, pp.111-134.
- [6] Vejrazka, J., Tihon, J., Mart, P. and Sobollik, V., 2005, Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 105102
- [7] Keller, J.O., Eibeck, P.A., Bramlette, T.T., and Bar, P.K., 1993, Pulse combustion: tailpipe exit jet characteristics, *Combustion Science and Technology*, Vol. 94, pp. 167-192.

- [8] Eibeck, P.A., Keller, J.O., Bramlette, T.T., and Sailor, D.J., 1993, Pulse combustion: impinging jet heat transfer enhancement, *Combustion Science and Technology*, Vol. 94, pp. 147-165.

**ภาคผนวก ข.**

**บทความสำหรับเผยแพร่ 2**

“คุณสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์”  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27





TSF-2011

## คุณสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ Flow Characteristics of Hot Air Jet from Pulse Combustor

ปฐมพร นระระโต, มั๊กตาร์ท แวหะยี่ , กิตติพันธ์ มลิวรรณ และ ชยุต นันทคุสิต\*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112  
\*ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th โทรศัพท์: 074 287 036, โทรสาร: 074 558 830

### **บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาระบบการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ ความถี่และระดับความดันเสียงที่มีผลมาจากการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้ศึกษาเป็นชนิด Helmholtz แบบไร้วาล์วที่มีท่อส่งแบบท่อเดี่ยว ในการทดลองได้ศึกษาผลของจำนวนท่อทางเข้าอากาศที่ต่อเข้ากับห้องเผาไหม้และความยาวท่อส่งที่มีต่อความเร็วและอุณหภูมิลมร้อนที่ทางออกท่อส่งในช่วงอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่  $Q_{LPG} = 21-30$  ลิตร/นาที่ โดยใช้ Pitot tube ในการวัดความเร็วและหัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลในการวัดอุณหภูมิ ในการวัดความถี่ของการสั่นของเจ็ทลมร้อนโดยใช้หัววัดความดันติดตั้งในห้องเผาไหม้ และวัดระดับความดันเสียงด้วย Sound pressure level จากการทดลองพบว่า การเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดี่ยวเป็น 2 ท่อ มีผลให้ความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน ระดับความดันเสียงและความถี่เพิ่มสูงขึ้น

**คำหลัก:** ห้องเผาไหม้แบบพัลส์, เจ็ทลมร้อน, ความดันในห้องเผาไหม้, ความถี่ในห้องเผาไหม้

### **Abstract**

This article presents the pressure variation in pulse combustor. frequency and sound pressure levels that result from the pulse combustion chamber. The combustion chamber is valveless Helmholtz-type with single tailpipe. In the experiments, the effect of number of air inlet pipes connected to combustion chamber on the velocity and temperature of air jet was studied with flow rate of LPG fuel at  $Q_{LPG} = 21-30$  L/min. The jet velocity was measured using a Pitot tube and the temperature of jet was measured using a thermocouples. To measure the frequency of pulsating jet, a pressure transducer was installed on the combustion chamber wall. Sound pressure level was used for sound pressure level of jet from tailpipe. The results showed that increasing the air inlet pipe with two air inlet pipes give higher temperature, pressure, sound pressure level and frequency.

Keyword: Pulse Combustor, Hot air jet, Pressure in combustion chamber, Frequency in combustion chamber

## TSF-2011

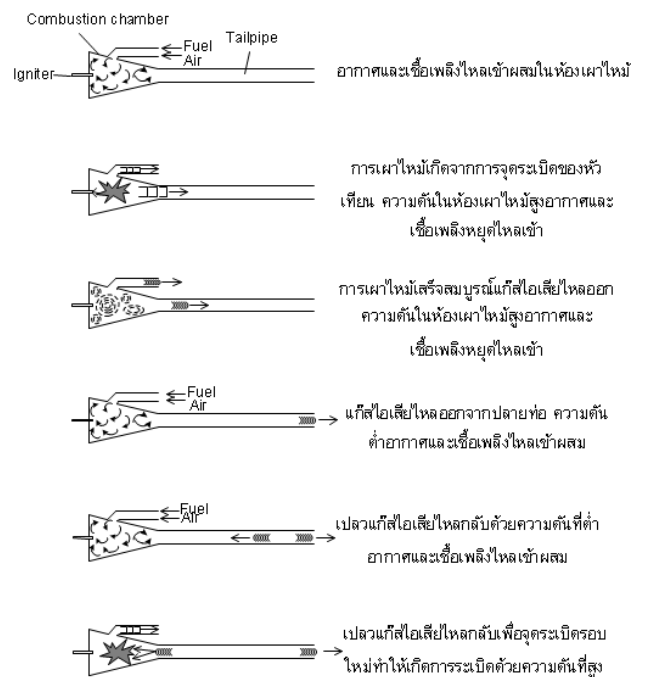
### 1. บทนำ

ในระบบการให้ความร้อนที่ใช้อยู่ทั่วไปจะใช้พัดลมในการเป่าเพิ่มความเร็วในอากาศ และใช้หัวเผาเชื้อเพลิงหรือฮีทเตอร์ไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ เกิดเป็นลมร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการอบหรือให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันดีเซล หรือก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงให้กับหัวเผา แต่ปัจจุบันราคาของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นทำให้โรงงานแบกภาระต้นทุนการผลิตมากขึ้น ในงานวิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบสร้างลมร้อนแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง แทนระบบเผาไหม้แบบเดิมซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบต่อเนื่อง ระบบการเผาไหม้แบบพัลส์ (Pulse Combustion) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ สามารถนำมาใช้ในการสร้างอากาศร้อนที่มีความเร็วสูงหรือเจ็ทอากาศร้อนได้ โดยไม่ใช้เครื่องเป่าอากาศหรือเครื่องอัดอากาศ นอกจากนี้ปรากฏการณ์ของการสั่นที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของการเผาไหม้ (Combustion Intensity) ลดปริมาณการเกิดแก๊สมลพิษ เช่น  $\text{NO}_x$  และการไหลของเจ็ทแบบพัลส์ที่ออกจากห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังโหลดด้วยเมื่อเทียบกับระบบเผาไหม้แบบต่อเนื่อง ทำให้สามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ [1]

### 2. หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz

รูปที่ 1 แสดงลักษณะห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ซึ่งประกอบด้วยห้องเผาไหม้และท่อส่ง และการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้แบบเป็นจังหวะและการส่งผ่านคลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่ง กระบวนการเผาไหม้จะเริ่มจากอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สหรือละอองเชื้อเพลิงของเหลวถูกพ่นเข้าไปผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ แล้วถูกจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Spark plug) ทำให้เกิดการจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ ในจังหวะนี้ทางเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกปิดโดยวาล์วหรือด้วย

ความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ และแรงดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะดันให้แก๊สไอเสียไหลออกผ่านท่อส่งออกไปภายนอก การไหลออกของแก๊สไอเสียจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อส่ง จนกระทั่งความดันภายในห้องเผาไหม้ลดลงต่ำสุด วาล์วอากาศและเชื้อเพลิงจะเปิดอีกครั้งทำให้อากาศและเชื้อเพลิงใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยการจุดติดไฟครั้งใหม่จะเกิดขึ้นเองอีกโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน การจุดติดไฟเกิดโดยแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมายังห้องเผาไหม้ ในจังหวะที่ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำสุด วัฏจักรการเผาไหม้จะเกิดซ้ำเองด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้และท่อส่ง สัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ชนิดของวาล์วเปิดปิดของอากาศและเชื้อเพลิง

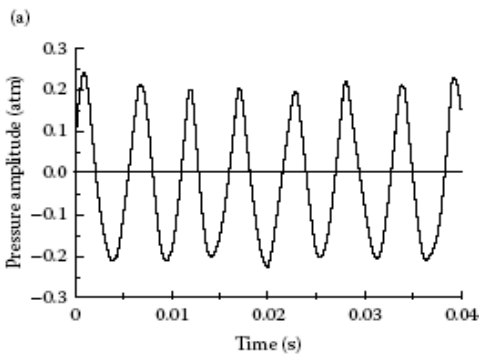
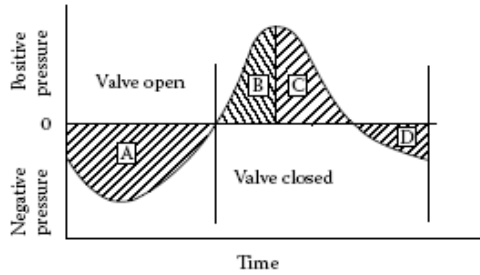


รูปที่ 1 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [1]

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ โดยที่ในรูป (a) บริเวณ A เป็นช่วงที่อากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้

## TSF-2011

บริเวณ B เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงใหม่จุดติดเกิดความร้อนทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูง อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ C เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกทางท่อส่ง ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง บริเวณ D เป็นช่วงที่โมเมนตัมของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกสร้างความดันติดลบภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ (a) การเปลี่ยนแปลงความดันในแต่ละกระบวนการ (b) การเปลี่ยนแปลงความดันตามเวลา [1]

### 3. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

#### 3.1 ชุดการทดลองและโมเดลที่ใช้ในการทดลอง

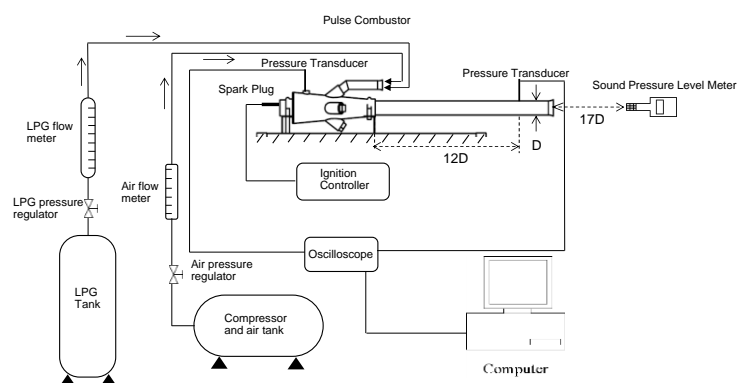
สำหรับชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ห้องเผาไหม้ ชุดจ่ายเชื้อเพลิงและชุดจุดเดินเครื่อง ชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว อุณหภูมิ ระดับความดันเสียงและความดันภายในห้องเผาไหม้ รูปที่ 3 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบระบบสร้างลมร้อน

สำหรับชุดจุดจ่ายเชื้อเพลิง แก๊ส LPG จะถูกส่งออกจากถังแก๊ส LPG ผ่านวาล์วควบคุมความดันและอุปกรณ์ป้องกันย้อนกลับของเปลวไฟ ผ่านโรตา

มิเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊สก่อนที่จะจ่ายผ่านท่อที่ติดตั้งภายในท่อทางเข้าของอากาศ โดยแก๊ส LPG จะถูกฉีดเข้าไปที่กลางของท่อส่งอากาศเพียงท่อเดียว

สำหรับชุดจุดเดินเครื่อง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนหัวเทียนที่ติดตั้งท้ายของห้องเผาไหม้ซึ่งจะติดต่อกับชุดวงจรไฟฟ้าสำหรับจุดหัวเทียน และส่วนจ่ายอากาศผ่านท่อส่งซึ่งอากาศจะถูกส่งจากถังอัดอากาศผ่านท่อส่งไปยังท่อทางเข้าของอากาศร่วมกับท่อแก๊ส LPG แต่หลังจากที่จุดติดแล้วจะหยุดจ่ายอากาศ และหัวเทียนถูกใช้จุดระเบิดตอนเริ่มต้นเพียงครั้งเดียวเท่านั้น หลังจากนั้นห้องเผาไหม้จะเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยตัวเอง

สำหรับชุดอุปกรณ์วัดประกอบด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจากท่อส่งที่ระยะห่างจากท่อส่งต่างๆ โดยใช้ Pitot-static tube ในการวัดความเร็ว และใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิใกล้กับปากทางออกเจ็ท และอุปกรณ์วัดระดับความดันเสียงซึ่งวางห่างจากปากท่อส่งเป็นระยะ 17 เท่าของขนาดท่อส่ง ส่วนความดันในห้องเผาไหม้ใช้ Pressure Transducer วัดความดันโดยอ่านค่าผ่าน Oscilloscope และเก็บข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3 แผนภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบระบบสร้างลมร้อน

#### 3.2 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

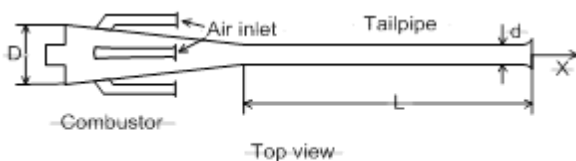
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบห้องเผาไหม้ขึ้นมา เพื่อศึกษาผลของจำนวนทางเข้า

## TSF-2011

อากาศและรูปแบบการติดตั้งทางเข้าที่มีต่ออุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทอากาศร้อนที่ออกจากท่อส่ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงรายละเอียดและภาพถ่ายของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา โดยกำหนดให้ปริมาตรของห้องเผาไหม้คงที่ ห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ยาว 300 mm และด้านท้ายของห้องเผาไหม้ติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิงตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งจะมีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ส่วนของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งออกแบบให้เป็นข้อต่อเกลียวในสามารถเปลี่ยนท่อส่งได้ ท่อส่งทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d=47$  mm ยาว  $L=750$  mm (ประมาณ 16  $d$ ) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ถูกงอให้ปลายชี้ไปที่ทิศทางเดียวกับท่อส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งท่อทางเข้าอากาศสามารถติดฝาปิดในกรณีที่ไม่ใช้งานได้

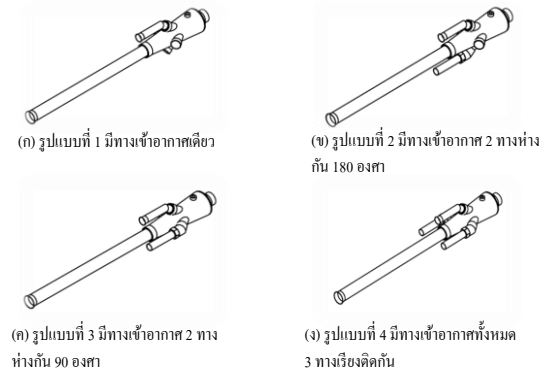
ในการทดลองศึกษาผลของจำนวนทางเข้าอากาศและรูปแบบการติดตั้งทางเข้าได้ศึกษาทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6 คือ รูปแบบที่ 1 มีทางเข้าอากาศทางเดียว รูปแบบที่ 2 มีทางเข้าอากาศ 2 ทาง เยื้องกัน 180 องศา (ทางเข้าอากาศอยู่ตรงข้ามกันพอดี) รูปแบบที่ 3 มีทางเข้าอากาศ 2 ทาง เยื้องกัน 90 องศา และรูปแบบที่ 4 มีทางเข้าอากาศทั้งหมด 3 ทางเรียงติดกัน วางเยื้องกัน 90 องศา



รูปที่ 4 โมเดลของห้องเผาไหม้



รูปที่ 5 ภาพถ่ายของห้องเผาไหม้



รูปที่ 6 รูปแบบทางเข้าอากาศที่ศึกษา

### 4. ผลการทดลอง

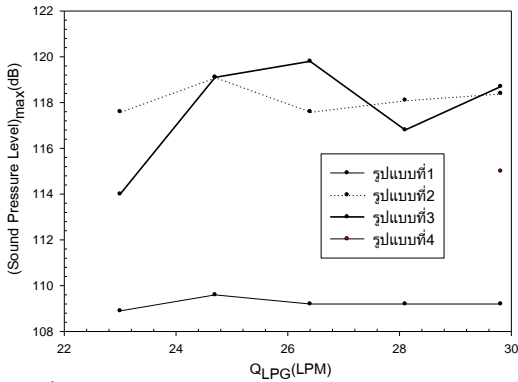
#### 4.1 ผลของระดับความดันเสียง

จากรูปที่ 7 เป็นผลของระดับความดันเสียงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับรูปแบบของห้องเผาไหม้ในแต่ละรูปแบบโดยจะวัดระดับความดันเสียงห่างออกไปจากปากทางออกของท่อส่ง (Tailpipe) เป็นระยะ 17D และการทดลองของห้องเผาไหม้ในรูปแบบที่ 4 สามารถทดลองได้เพียงแต่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ได้เพียงแต่อัตราการไหลเดียวทำให้เห็นแค่เพียงจุดเดียว จากกราฟพบว่าระดับความดันเสียงสูงสุดจะเกิดขึ้นกับห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) 119.8 dB ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 26.4 ลิตรต่อนาที ระดับความดันเสียงต่ำสุดจะเกิดขึ้นกับห้องเผาไหม้



## TSF-2011

ในรูปแบบที่ 1 (ทางเข้าอากาศเดียว) 108.9 dB ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 23 ลิตรต่อนาที จากผลที่ได้พบว่าระดับความดันเสียงสูงสุดในแต่ละรูปแบบห้องเผาไหม้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ระดับความดันเสียงสูงสุดกับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่เพิ่มขึ้นและรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่ต่างกัน

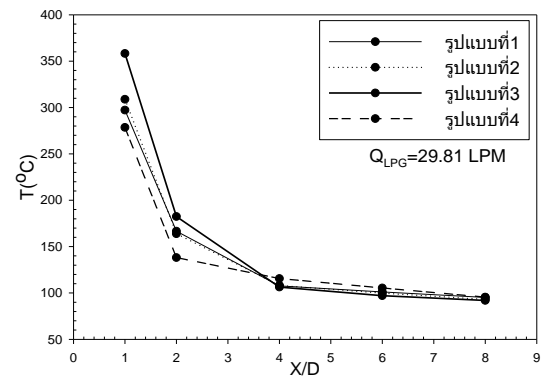
### 4.2 ผลของความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อน

จากรูปที่ 8 เป็นผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ระยะ  $X/D$  ต่างๆ โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปแต่ละคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.81 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนลดลงตามระยะ  $X/D$  และอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ระยะ  $X/D=1$  ในทุกรูปแบบของห้องเผาไหม้ โดยอุณหภูมิสูงสุดจะเท่ากับ  $358.23^{\circ}\text{C}$  จากห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) ในขณะที่อุณหภูมิของเจ็ทที่ตำแหน่ง  $X/D=1$  และ 2 ลดลงอย่างชัดเจนแต่ที่ระยะ  $X/D=4, 6$  และ 8 อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจะใกล้เคียงกันทุกรูปแบบของห้องเผาไหม้

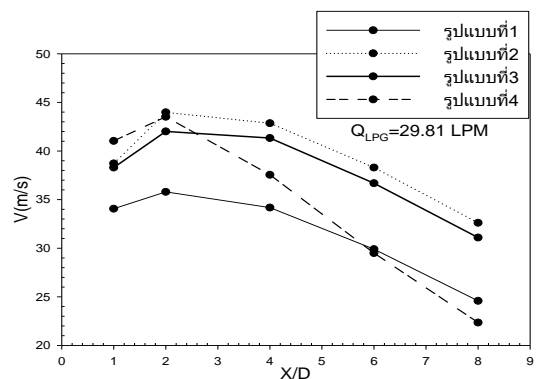
จากรูปที่ 9 เป็นผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ปากทางออกที่ระยะ  $X/D$  ต่างๆ โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปแต่ละคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.81 ลิตรต่อนาที พบว่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจะสูงสุดที่  $X/D=2$  ทุกรูปแบบของห้องเผาไหม้และจะลดลงตาม  $X/D$  ที่เพิ่มขึ้นโดยความเร็วสูงสุดเท่ากับ  $43.9\text{ m/s}$  จากห้อง

เผาไหม้ในรูปแบบที่ 2 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา)

จากรูปที่ 10 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนที่ระยะ  $X/D=1$  โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่ต่างกันแต่จะคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.81 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่  $358.23^{\circ}\text{C}$  จากห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) และความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนสูงสุดอยู่ที่  $41\text{ m/s}$  จากห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 4 (มีทางเข้าอากาศทั้งหมดสามทางเรียงติดกัน) จะเห็นว่าผลของการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเทียบกับทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว



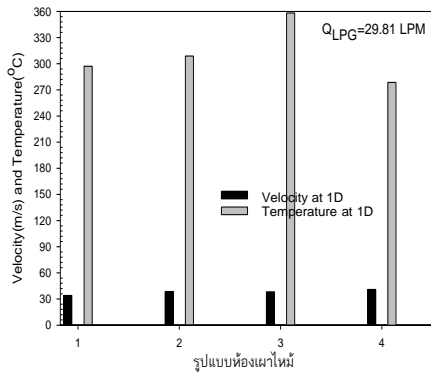
รูปที่ 8 อุณหภูมิเมื่อรูปแบบของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป



รูปที่ 9 ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเมื่อรูปแบบห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป



## TSF-2011



รูปที่ 10 ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนเมื่อรูปแบบห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป

### 4.3 ผลของความดันและความถี่ในห้องเผาไหม้และท่อส่ง(Tailpipe)

จากรูปที่ 11 และรูปที่ 12 เป็นผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้โดยคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.81 ลิตรต่อนาที พบว่าผลต่างของความดันสูงสุดอยู่ที่ 5.21 Bar อยู่ที่ห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) และรูปแบบที่ 2 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา) ความดันสูงสุดอยู่ที่ 2.61 Bar โดยห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 4 (มีทางเข้าอากาศทั้งหมดสามทางเรียงติดกัน) และความเป็น Vacuum สูงสุด -3.06 Bar โดยห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) จากผลของความดันพบว่าการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศมีผลให้ความดันในห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นจากท่อเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อตามลำดับ

จากรูปที่ 11 และรูปที่ 13 เป็นผลของความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่ง (Tailpipe) โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG 29.81 ลิตรต่อนาที พบว่าผลต่างความดันในท่อส่ง (Tailpipe) สูงสุดอยู่ที่ 6.7 Bar โดยห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) ความดันสูงสุดอยู่ที่ 3.6 Bar โดยห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 2 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา) และความเป็น Vacuum สูงสุดในท่อส่งอยู่ที่ -3.27 Bar โดยห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) จากผลของความดันในท่อส่งพบว่าการเพิ่มจำนวนท่อ

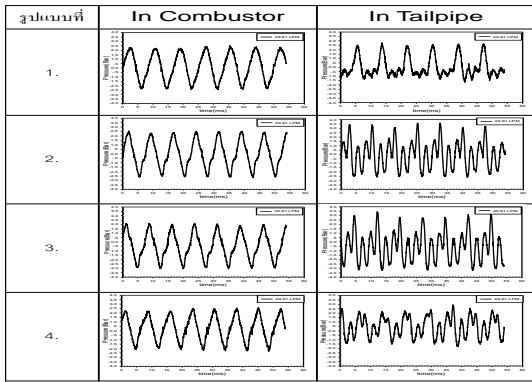
ทางเข้าอากาศจากท่อเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อมีผลให้ความดันในท่อส่งเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 14 และรูปที่ 15 เป็นผลของความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้โดยคงที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ไว้ที่ 29.81 ลิตรต่อนาที จากการวิเคราะห์โดย Fast Fourier transform พบว่าความถี่หลักของห้องเผาไหม้ทั้ง 4 รูปแบบมีค่าดังนี้ รูปแบบที่ 1 (มีทางเข้าอากาศเดี่ยว) 127.5 Hz รูปแบบที่ 2 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา) 129.5 Hz รูปแบบที่ 3 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 90 องศา) 130.5 Hz และรูปแบบที่ 4 (มีทางเข้าอากาศทั้งหมดสามทางเรียงติดกัน) 134.8 Hz จากผลการวิเคราะห์ความถี่ในห้องเผาไหม้ทำให้ทราบว่า การเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศจากท่อเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น

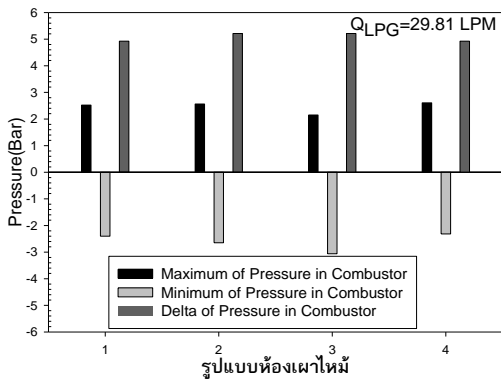
รูปที่ 16 และรูปที่ 17 เป็นผลของความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่ง (Tailpipe) โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG เท่ากับ 29.81 ลิตรต่อนาที จากการวิเคราะห์ด้วย Fast Fourier transform พบว่าความถี่ย่อยในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้มีอยู่ด้วยกันสามความถี่ย่อย โดยความถี่ลำดับที่ 1 มีอยู่สี่ความถี่จาก 4 รูปแบบของห้องเผาไหม้คือ 127.5 Hz , 129.5 Hz , 130.5 Hz และ 134.8 Hz ตามลำดับความถี่ย่อยลำดับที่ 2 มีอยู่ด้วยกันสี่ความถี่ย่อยคือ 238.9 Hz , 277.5 Hz , 260.9 Hz และ 269.7 Hz ตามลำดับ และความถี่ย่อยลำดับที่ 3 มีอยู่ด้วยกันสี่ความถี่ย่อยคือ 366.4 Hz , 407.1 Hz , 391.3 Hz , และ 421.4 Hz ตามลำดับ ผลของความถี่ย่อยลำดับที่ 1 ในท่อส่ง (Tailpipe) มีค่าเท่ากับความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และพบว่าการเพิ่มจำนวนท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้จากท่อเดี่ยวเป็นสองท่อและสามท่อส่งผลให้ความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่งมีค่าเพิ่มขึ้น



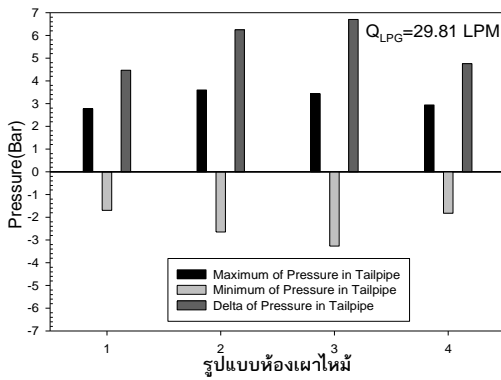
**TSF-2011**



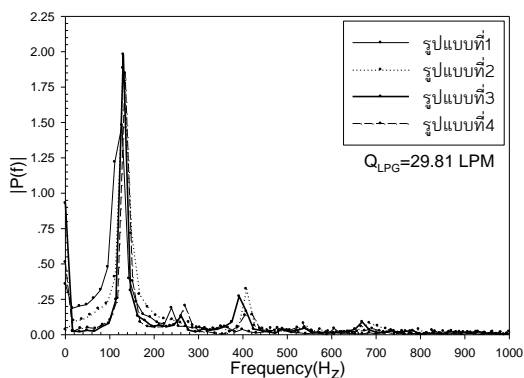
รูปที่ 11 ความดันในห้องเผาไหม้และในท่อส่ง (Tailpipe) โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไป



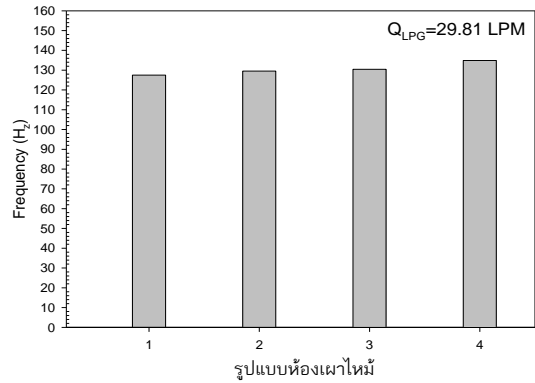
รูปที่ 12 ความดันสูงสุด ความดันต่ำสุดและผลต่างความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ในแต่ละรูปแบบ



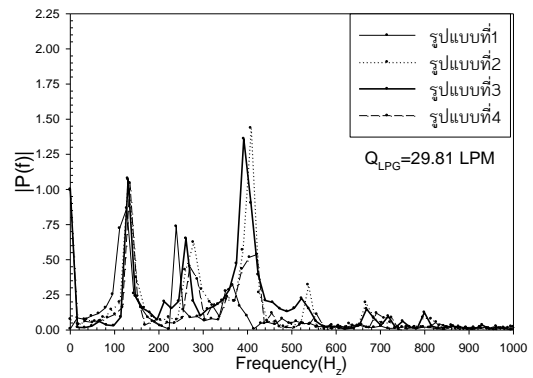
รูปที่ 13 ความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่ง (Tailpipe) ในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้



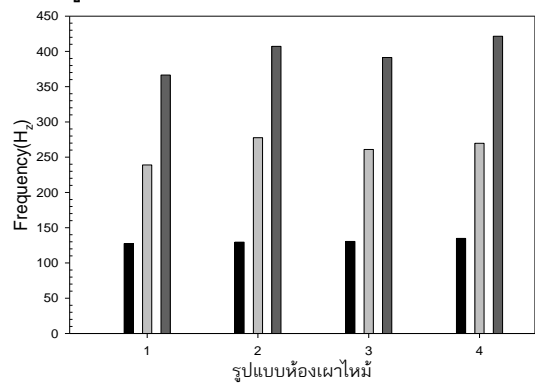
รูปที่ 14 ความถี่หลักที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้



รูปที่ 15 ความถี่หลักในห้องเผาไหม้ในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้



รูปที่ 16 ความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่ง (Tailpipe) ในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้



รูปที่ 17 ความถี่ย่อยที่เกิดขึ้นในท่อส่ง (Tailpipe) ในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้ ที่  $Q_{LPG}=29.81$  ลิตรต่อ นาที



## TSF-2011

### 5.สรุปผลการศึกษา

(1) สำหรับระดับความดันเสียงสูงสุดในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สLPG ที่เพิ่มขึ้น

(2) สำหรับความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จะสูงที่สุดห่างจากปากทางออกเป็นระยะ 2 เท่าของขนาดท่อส่ง (Tailpipe) เนื่องจากระยะนี้เป็นระยะที่ให้โมเมนตัมสูงที่สุดและห่างจากการรบกวนเนื่องจากการไหลกลับของเปลวไฟในขณะที่เกิดสภาวะการระเบิดรอบถัดไป

(3) ผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้จากท่อเดียวเป็นสองท่อและสามท่อมีผลให้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อน อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อน ความดันในห้องเผาไหม้ ความดันในท่อส่ง ความถี่ในห้องเผาไหม้ และ ความถี่ย่อยในท่อส่ง (Tailpipe) มีค่าเพิ่มขึ้น

(4) ผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศทำให้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของความดันในท่อส่ง (Tailpipe) และความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากห้องเผาไหม้รูปแบบที่ 2 (มีทางเข้าอากาศ 2 ทางห่างกัน 180 องศา) โดยความดันในท่อส่งเท่ากับ 3.6 Bar ซึ่งสูงกว่าห้องเผาไหม้รูปแบบอื่นๆทำให้ความเร็วที่ออกจากปากทางออกมีค่าสูง (โดยความเร็วเฉลี่ยพิจารณาที่ระยะ $X/D=2$ )

(5) ผลของการเพิ่มท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของความถี่ย่อยในท่อส่งและความถี่หลักในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

[1] Kudra, T. and Mujumdar, A. S., 2009, Pulse combustion drying, In Advanced Drying Technologies, 2nd Edition, Taylor&Francis, pp.225-261.

[2] B.T., Zinn, 1986, Applications of pulse combustion in industry, In Industrial Combustion Technologies, M.A. Lukasiewicz, Ed., American Society of Metals, Warren, PA, pp. 55-61.

[3] Zinn, B.T., 1996, Pulse combustion applications: past, present and future, In Unsteady Combustion, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 113-137.

[4] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., Button, B.L., 1992, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.13, pp. 106-115.

[5] Viskanta, R., 1993, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.6, pp.111-134.

[6] Vejrazka, J., Tihon, J., Mart, P. and Sobollik, V., 2005, Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet, Physics of Fluids, Vol. 17, 105102

[7] Keller, J.O., Eibeck, P.A., Bramlette, T.T., and Bar, P.K., 1993, Pulse combustion: tailpipe exit jet characteristics, Combustion Science and Technology, Vol. 94, pp. 167-192.

[8] Eibeck, P.A., Keller, J.O., Bramlette, T.T., and Sailor, D.J., 1993, Pulse combustion: impinging jet heat transfer enhancement, Combustion Science and Technology, Vol. 94, pp. 147-165.



**ภาคผนวก ค.**

**บทความสำหรับเผยแพร่ 3**

**“Heat Transfer Enhancement of Impinging Jet from Pulse Jet Combustor”**

**The 5<sup>th</sup> KKU International Engineering Conference 2014**

# Heat Transfer Enhancement of Impinging Jet from Pulse Jet Combustor

Pathomporn Narato<sup>1,a</sup>, Kittinan Maliwan<sup>1,b</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>1,c\*</sup>

<sup>1</sup>Energy Technology Research Center and Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand

<sup>a</sup>yun.357@hotmail.com, <sup>b</sup>mkittina@me.psu.ac.th, <sup>c</sup>chayut@me.psu.ac.th

**Keywords:** Pulse jet combustion, Air inlet configurations, Impinging jet, Heat transfer characteristics, Flow characteristics

**Abstract.** The aims of this study are to investigate flow characteristics in pulse jet combustor and heat transfer characteristics of impinging jet from pulse jet combustor. The combustor is Helmholtz type which has single combustor chamber and single tailpipe. The inner diameter ( $D$ ) of tailpipe was 47 mm and tailpipe length was about  $16D$ . The effect of number of air inlets: single inlet, double inlets with  $90^\circ$  apart, double inlets with  $180^\circ$  apart and triple inlets with  $90^\circ$  apart on flow and heat transfer characteristics were studied. A water cooled heat flux sensor was applied to measure heat transfer rate on the surface at stagnation point. The jet-to-plate distance was varied at  $L=1D, 2D, 4D, 6D$  and  $8D$ . Two of pressure transducers were mounted on the wall of combustion chamber and on the wall of tailpipe at  $4D$  from tailpipe outlet to measure pressure simultaneously. It is found that the variation of pressure near the tailpipe outlet is strongly depended on air inlet configurations. The pressure variations in pulse jet combustor could be preliminary related to the temperature and velocity of jet from tailpipe and heat transfer rate on jet impingement surface.

## Introduction

Pulse combustion technology has been firstly published in 1906 [1, 2]. This technology is very important to develop for using in jet propulsion applications. The major advantages of pulse combustion are to provide a way for the efficient combustion of a variety of difficult-to-burn fuels as well as reduce operation energy consumption and reduce contaminant emissions [3]. According to the specific acoustic system on which their operation depends, pulse combustors can be categorized into three distinct classes: the quarter-wave combustor, the Helmholtz combustor and the Rijke-type combustor.

Helmholtz pulse combustor is simple model of pulse combustor which small diameter of tailpipe is attached to one of large cavity (combustion chamber). It is operated under the principle of the standard acoustic Helmholtz resonator. A Helmholtz resonator is operated at a frequency determined by both the volume of the combustion chamber and the length and cross-sectional area of the tailpipe [6]. It can be operated with valve system that valves are placed at the combustor wall opposite to the tailpipe [5, 6] or with valveless system [4, 6 and 7].

In previous study, the pulse jet combustor was studied in valveless mode with either a forward-facing inlet or a pair of rearward-facing inlets. Pressure, temperature, thrust, and frequency were measured as changing configuration of valveless inlet and tailpipe length with different geometries [4]. Many researchers have concerned to study the important impact of pulse combustor on combustion efficiency [3, 8, and 9]. They found that the tailpipe length, combustor chamber geometry and air inlet configuration effect on combustion efficiency and thermal performance. Other works have been concerned on progressive thrust force, combustion efficiency, noise reduction and pressure level in combustor chamber [4, 5, and 7]. However, the flow characteristics in pulse jet combustion are still unclear and the heat transfer rate of impinging jet from pulse jet combustor is not mentioned.

The aim of this research is to study the effect of air inlet geometries on flow and heat transfer characteristics of pulse combustor with Helmholtz type. A heat flux sensor was used to measure heat transfer rate on the impingement surface at stagnation point. The pressure transducers were used to measure a static pressure at combustor wall chamber and tailpipe wall simultaneously.

## Experimental Model and Apparatus

**Experimental Model and Parameter.** The detailed pulse jet combustor used in this study is shown in Fig.1(a). The pulse jet combustor is valveless Helmholtz type consisting of single combustor and single tailpipe. The dimension of the tailpipe was 47 mm in diameter ( $D$ ) and 750 mm in length (about  $16D$ ). The dimension of the combustor was 110 mm in diameter and 300 mm in length. The pulse jet combustor was made of stainless steel. A spark plug was installed at the bottom of combustor chamber for ignition during starting system. In this experiment, the number of air inlet was examined. The pipe air inlet was installed at combustor chamber as shown in Fig. 1(b). The pipes were bent toward the tailpipe direction. The dimension of the air inlet was 29 mm in diameter and 165 mm in length. The configurations of air inlet were (a) single inlet, (b) double inlets with  $180^\circ$  apart, (c) double inlets with  $90^\circ$  apart and (d) triple inlets with  $90^\circ$  apart as shown in Fig. 1(b).

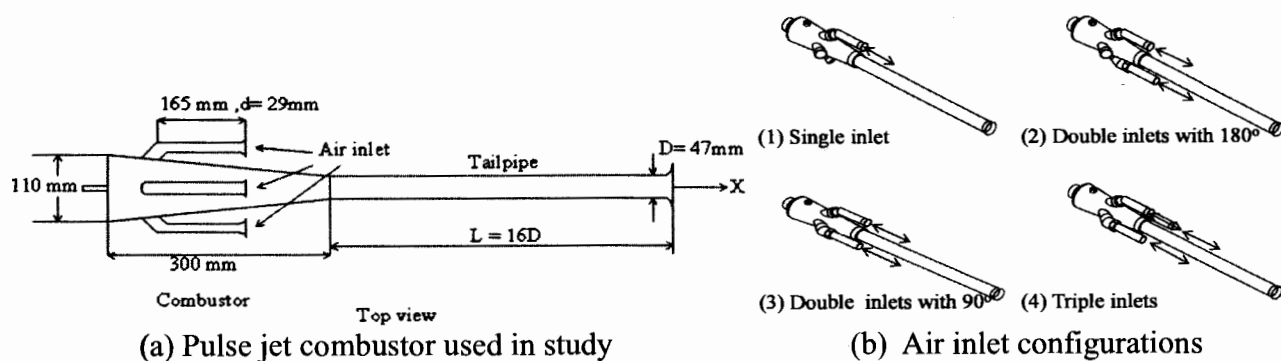


Fig. 1 Detail of pulse jet combustor and air inlet configurations

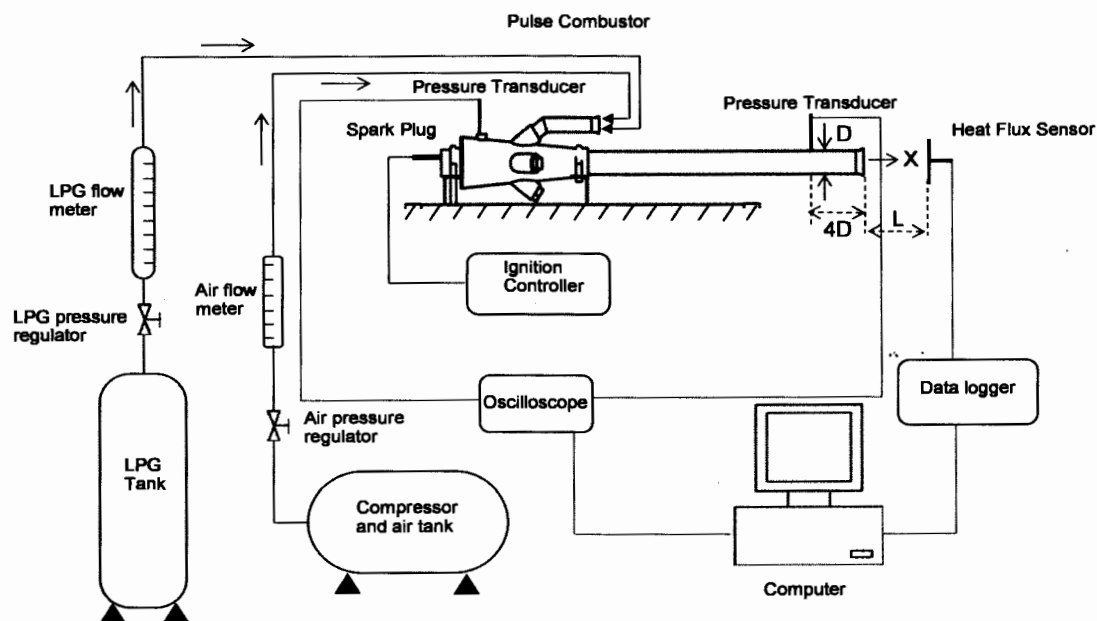


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

**Experiment set up.** Experiment setup consists of pulse jet combustor, fuel supply and starting system and measurements system for pressure and heat transfer as shown in Fig.2. Liquefied petroleum gas (LPG) fuel was supplied from LPG tank, and its flow rate was controlled by pressure regulator and calibrated rotameter. The LPG was injected to the center of one air inlet pipe through stainless tube. A spark plug was installed at the end of combustion chamber for starting the combustion system. The compressed air from air pump was supplied through a flow regulator and an air flow meter and discharged through the stainless tube into the air inlet pipe that supply LPG. Both of spark plug and compressed air were used only at the beginning for starting the combustion system.

A heat flux sensor was embedded on the impingement plate at its center to measure heat transfer rate on the surface at stagnation point. The impingement plate was made of steel plate with 12 mm in thickness and 100 mm in diameter, respectively. It was movable along axial jet (X-axis) to examine the effect of jet-to-plate distance. The jet-to-plate distance was varied at  $L = 1D, 2D, 4D, 6D$  and  $8D$ . The pressure transducers were mounted on combustor wall chamber and on the wall of tailpipe at  $4D$  from tailpipe outlet for measuring the pressure variation with time simultaneously. All of experiments were done at the same flow rate of LPG at 29.8 l/min.

## Results and discussion

Fig. 3 shows the pressure (gage) variation with time in combustion chamber and in tailpipe at  $4D$  from tailpipe outlet for each type of air inlet configurations. The pressure in combustion chamber changes periodical with time and has same pattern for all air inlet configurations. For single inlet (type 1), when the combustion occurs in combustion chamber, the pressure in the chamber increases and becomes maximum at a certain time in each cycle. When the combustion gas flows out to the tailpipe, the pressure in combustion chamber starts to decrease and becomes vacuumed in combustion chamber and the pressure near the tailpipe outlet tends to increase. For multiple air inlets, the pressure fluctuation near the tailpipe outlet increases. For each cycle of pressure in combustion chamber, the outlet of tailpipe has three maximum peaks of pressure. It should be noticed that the pressure near the tailpipe outlet is positive when the pressure in combustion is positive (combustion occurs) and the pressure near the tailpipe outlet becomes small or negative when the pressure in combustion becomes negative for case of double inlets with  $180^\circ$  apart (type 2) and case of triple inlets (type 4). While, the pressure pattern for case of double inlets with  $90^\circ$  apart (type 3) is similar to case of single inlet (type 1). That is the pressure near outlet becomes largely vacuum or negative when the pressure in combustion chamber is positive and the pressure near tailpipe outlet becomes positive when the pressure in combustion chamber is negative. So, the pressure difference at a time between combustion chamber and near the tailpipe outlet is maximum for case of double inlets with  $90^\circ$  apart (type 3).

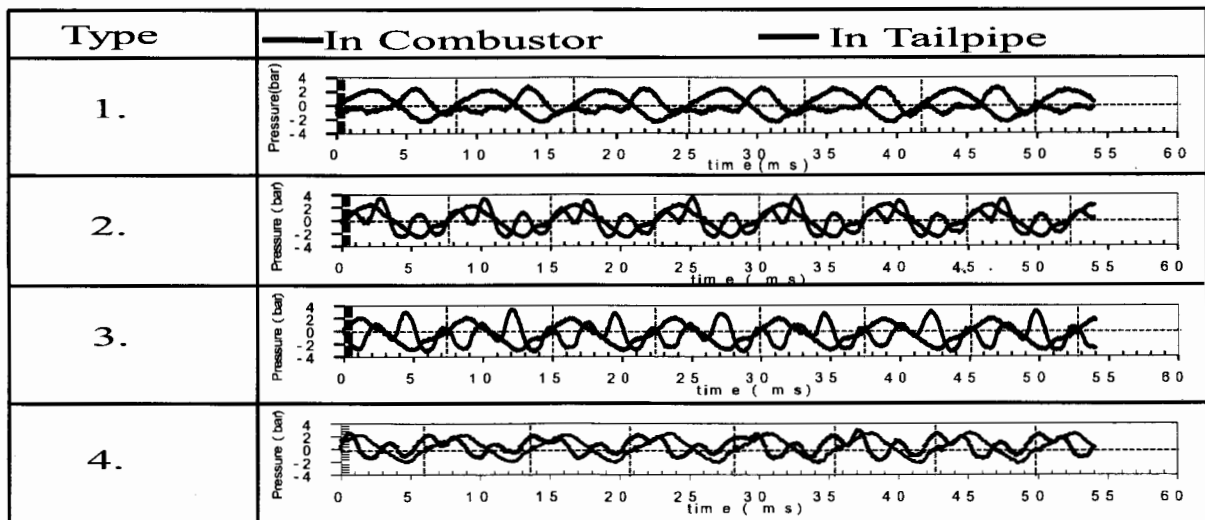


Fig.3 Pressure variation in combustor and near tailpipe outlet

The pressure data was then analyzed using Fast Fourier Transform (FFT) to produce the amplitude spectrum of the pressure signal. Fig. 4 shows the spectrum analysis of pressure in combustion chamber for each air inlet configuration. The maximum amplitude is at about 127.5 Hz for single inlet, 129.5 Hz for double inlets with  $180^\circ$  apart, 130.5 Hz for double inlets with  $90^\circ$  apart and 134.8 Hz for triple inlets. The main frequency of pressure in combustion chamber tends to increase with increasing the number of air inlet.

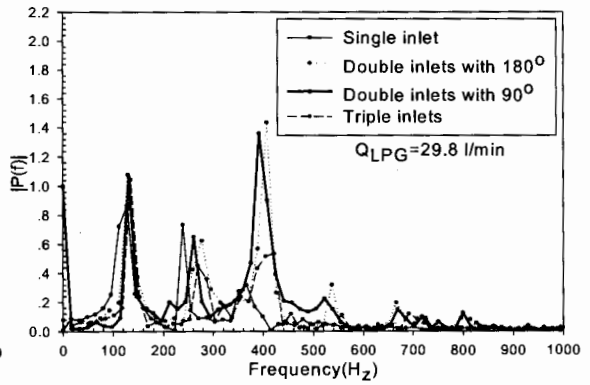
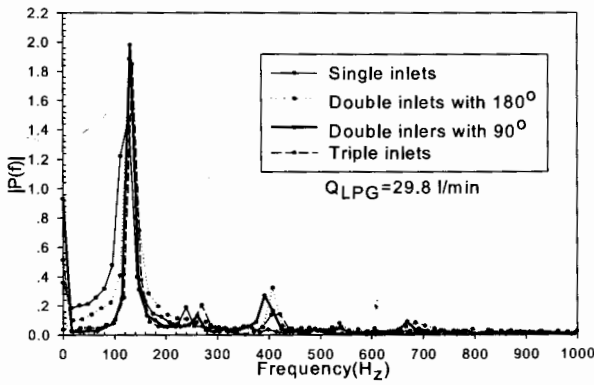


Fig.4 Amplitude spectrum of pressure in combustor

Fig.5 Amplitude spectrum of pressure near tailpipe outlet

Fig. 5 shows the amplitude spectrum of pressure near tailpipe outlet. It is found that there are three peaks of amplitude at three frequencies for all cases. Fig. 6 shows the three of minor frequency of pressure fluctuation near tailpipe outlet for each type of air inlet configurations. The first frequency for case of inlet type 1, 2, 3, and 4 is 127.5 Hz, 129.5 Hz, 130.5 Hz, and 134.8 Hz respectively. The second frequency for case of inlet type 1, 2, 3, and 4 is 238.9 Hz, 277.5 Hz, 260.9 Hz, and 269.7 Hz respectively. The third frequency for case of inlet type 1, 2, 3, and 4 is 366.4 Hz, 407.1 Hz, 391.3 Hz, and 421.4 Hz respectively. The first frequency is equal to the major frequency in combustor.

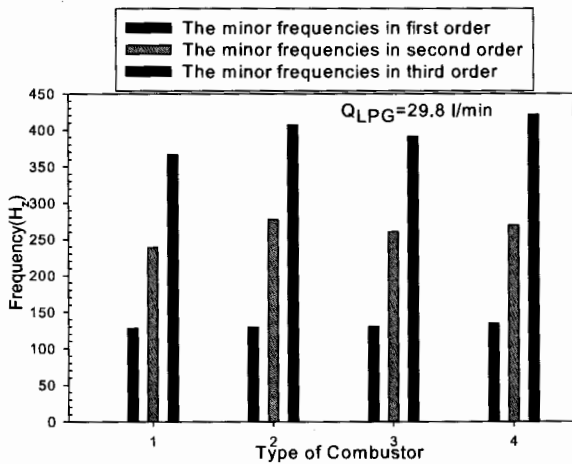


Fig.6 Frequency of pressure fluctuation near tailpipe outlet

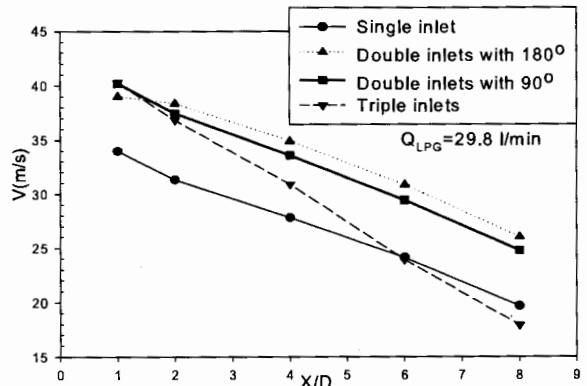


Fig.7 Velocity of free air jet at different X/D

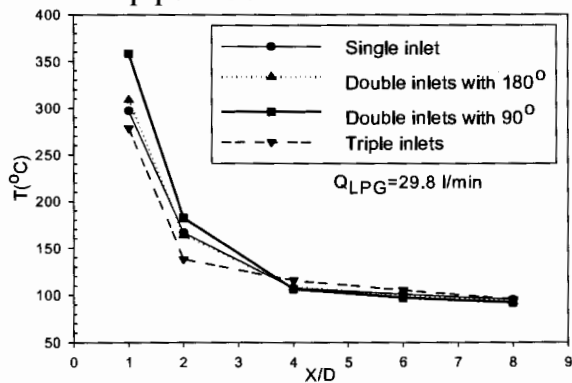


Fig.8 Temperature of free air jet at different X/D

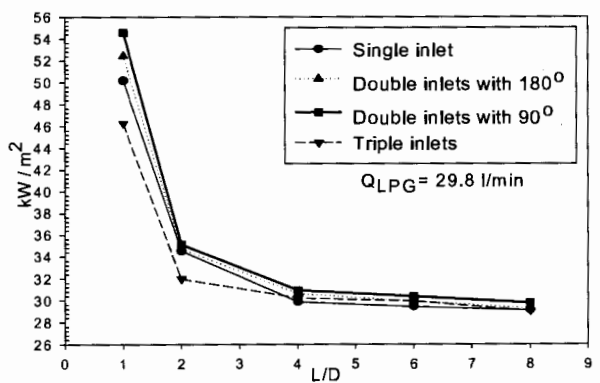


Fig.9 Heat transfer rate on impinging surface with impinging air jet at different jet-to-plate distance L/D

The velocity of free air jet measured on the jet axial with Pitot-static tube is shown in Fig. 7. It is found that the pulse jet combustor for case of double inlets with 180° apart gives the highest velocity.

While, the case of single inlet gives the lowest jet velocity, this is due to the small pressure difference between combustor and tailpipe outlet according to Fig.3. For all cases, the velocity decreases almost linearly as going far from tailpipe outlet.

Fig. 8 displays results for the temperature of free air jet measured with thermocouples probe type K at various distance  $X/D$  from the outlet of tailpipe. For all cases, it is found that the temperature of free jet decreases rapidly from  $X/D=1$  to 4 and becomes almost constant at  $T=100^\circ\text{C}$  from  $X/D=4$  to 8. At position  $X/D=1$ , the air jet from case of double inlets with  $90^\circ$  apart gives the largest temperature at  $T=358^\circ\text{C}$ . While, the case of triple inlets gives the lowest temperature at  $T=280^\circ\text{C}$ . This may be due to the air flow rate induced to the combustion chamber is too much and then reduces the temperature of combustion gas. The case of double inlets with  $180^\circ$  apart and single inlet give the air jet temperature about  $T=300^\circ\text{C}$ . The difference between double inlets with  $90^\circ$  apart and  $180^\circ$  apart can be explained by the flow characteristics of air induced into the combustion chamber. The flow in case of double inlets with  $90^\circ$  apart may promote the turbulent flow in combustion chamber than case of  $180^\circ$  apart. So, the combustion intensity for case of  $90^\circ$  apart is better.

Fig. 9 shows the heat transfer rate from air jet impingement measured at stagnation point on impingement plate at various jet-to-plate distance  $L/D$ . As shown in Fig. 9, the heat transfer rate is maximum at  $L/D=1$ . But, the heat transfer rate tends to decrease as increasing the jet-to-plate distance. This is due to the temperature and velocity of jet decreasing as far from the tailpipe outlet. The pulse jet combustor for case of double inlets with  $90^\circ$  apart give the highest heat transfer rate about  $55\text{ kW/m}^2$  for case of  $L/D=1$ . While, the case of double inlets with  $180^\circ$  gives the highest heat transfer rate about  $52\text{ kW/m}^2$ , the case of single inlet gives the highest heat transfer rate about  $50\text{ kW/m}^2$  and the case of triple inlets gives the highest heat transfer rate about  $46\text{ kW/m}^2$  at  $L/D=1$ . However, the heat transfer rate for all cases decrease to  $30\text{ kW/m}^2$  at jet-to-plate distance  $L/D=4, 6$  and  $8$ .

## Conclusion

The flow characteristics were studied by measured pressure variation with time in combustion chamber and pressure near tailpipe outlet simultaneously. It is found that the pressure variation in combustion chamber is not dependent on air inlet configurations, but the pressure near the tailpipe outlet is strongly dependent on air inlet configurations. The pressure variations in pulse jet combustor could be preliminarily related to the temperature and velocity of jet from tailpipe and heat transfer rate on jet impingement surface.

## References

- [1] Giammer RD, Putnam AA. Noise reduction using paired pulse combustion. *J Energy* 1978;2(5):319–20.
- [2] Putnam AA, Belles FE, Kentfield JAC. Pulse combustion. *Prog Energy Combust Sci* 1986;12:43–79.
- [3] Zinn BT. Pulse combustion: recent applications and research issues. In: Twenty-fourth symposium (international) on combustion/the combustion institute; 1992. p. 1297–305.
- [4] Geng, T.; Zheng, F.; Kiker, A.P.; Kuznetsov, A.V.; Roberts, W.L. Experimental and numerical investigation of an 8-cm valveless pulsejet. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31(2007) 641-647.
- [5] Kilicarslan, A.; Arisoy, A. Acoustic analysis of a liquefied petroleum gas-fired pulse combustor. *Applied Acoustics* 69(2008) 770-777.
- [6] Kudra, T.; Mujumdar, A.S. Pulse combustion drying. In *Advance Drying Technologies*, 2nd Edition, Taylor & Francis, pp. 225-261.
- [7] Geng, T.; Schoen, M.A.; Kuznetsov, A.V.; Roberts, W.L. Combined Numerical and Experimental Investigation of a 15-cm Valveless Pulsejet. *Flow Turbulence combust* 78 (2007) 17-33.
- [8] Waitz, I.A.; Gauba, G.; Tzeng, Y.: Combustors for micro-gas turbine engines. *J. Fluids Eng.* 120, 109-117 (1998)
- [9] Spadaccini, C.M.; Mehra, A.; Lee, J.; Zhang, X.; Lukachko, S.; Waitz, I.A.: High power density silicon combustion systems for micro gas turbine engines. *J. Eng. Gas Turbines Power* 125, 709-719 (2003)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นาย ปฐมพร นระระโต

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5510120017

วุฒิการศึกษา

| วุฒิ      | ชื่อสถาบัน               | ปีที่ |
|-----------|--------------------------|-------|
| ปริญญาตรี | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2554  |

ทุนการศึกษา

ทุนศึกษย์กักนุญคณะวิศวกรรมศาสตร์ปีการศึกษา 2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

### ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ปฐมพร นระระโต, มัถดาร์ แวหะยี่, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ชยุด นันทดุดสิต 2556 ผลของรูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของเจ็ทความร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12, 14-15 มีนาคม 2556, โรงแรมอิมพีเรียลโกลเด้น ไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย

ปฐมพร นระระโต, มัถดาร์ แวหะยี่, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ชยุด นันทดุดสิต 2556 คุณสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, พัทยา จังหวัดชลบุรี

### บทความวิชาการ (Journal paper)

Narato, P., Maliwan, K. and Nuntadusit, C., (2014), "Heat Transfer Enhancement of Impinging Jet from Pulse Jet Combustor", Advanced Materials Research, Vols.931-932, pp.1228-1232.