รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

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

ผศ.ดร. ชยุต นันทดุสิต
ดร. กิตตินันท์ มลิวรรณ
นาย ปฐมพร นะระโต

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปี 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

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

ผศ.ดร. ชยุต นันทดุสิต
ดร. กิตตินันท์ มลิวรรณ
นาย ปฐมพร นะระโต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปี 2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz ในงานวิจัยได้พิจารณาผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่งที่มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, และ 8D โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งมีค่าเท่ากับ 47 mm ความยาวของท่อส่งที่ใช้ทดลองที่ 16D,19D, 22D, และ 25D สำหรับลักษณะการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศที่ห้องเผาไหม้มี 4 รูปแบบคือ (1) แบบท่อเดียว, (2) แบบสองท่อห่างกัน 180°, (3) แบบสองท่อห่างกัน 90°, และ (4) แบบสามท่อห่างกัน 90° สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG กำหนดให้คงที่ที่ 29.8 ลิตรต่อนาทีในทุกการทดลอง ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทอิสระตามแนวศูนย์กลางท่อส่งโดยใช้ Pitot Tube และ เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ตามลำดับ และวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน นอกจากนี้ได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้และใกล้ปากทางออกของท่อส่งโดยใช้เซนเซอร์วัดความดันทั้งสองตัว สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลและปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ใช้วิธีการจำลองการไหลและการเผาไหม้แบบไม่คงตัว 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS ver.13.0 (CFX)

จากผลการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่า ภายในห้องเผาไหม้เกิดการระเบิดเป็นจังหวะตามความถี่ Helmholtz โดยที่บริเวณปากทางเข้าของท่อทางเข้าอากาศและปากทางออกท่อส่งมีการดูดอากาศและคายแก๊สร้อนเป็นจังหวะสอดคล้องกับพฤติกรรมของความดันภายในห้องเผาไหม้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้และความเร็วที่ปากทางออกท่อส่งสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อความถี่ของความดันภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองการไหลเทียบกับการทดลอง พบว่ามีผลต่างสูงสุดไม่เกิน 10% เมื่อพิจารณาผลของการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศจากการจำลองการไหลที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งคงที่ที่ 16D พบว่ายังคงมีความสอดคล้องกับการทดลองคือ จำนวนท่อทางเข้าอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความเร็วที่ปากทางออกท่อส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอากาศภายนอกสามารถไหลเข้าห้องเผาไหม้ได้มาก มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น

จากผลการทดลองโดยภาพรวมพบว่า ความเร็วเจ็ท อุณหภูมิเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ดพุ่งชนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากปากทางออกท่อเจ็ท โดยเฉพาะอุณหภูมิเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะห่างออกจากปากทางออกท่อส่งที่อยู่ในช่วง 1D จนถึง 3D สำหรับที่ระยะห่างออกจากปากทางออกท่อส่งที่อยู่ในช่วงมากว่า 3D การเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองค่อยๆลดลงเกือบคงที่ สำหรับผลของ

ความยาวท่อส่งและรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลของอากาศที่เข้าผสมภายในห้องเผาไหม้ที่จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่เงื่อนไขท่อทางเข้าอากาศแบบสองท่อห่างกัน 90° ความยาวของท่อส่ง 16D และระยะจากปากทางออกท่อส่งถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ 1D ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่อุณหภูมิเจ็ทมีค่าสูง อย่างไรก็ตามที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ พบว่าการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแบบสองท่อห่างกัน 180° มีผลทำให้ความเร็วเจ็ทมีค่าสูงกว่า

ABSTRACT

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics of hot air jet generated by Helmholtz pulse combustor. The research was considered the effects of air inlet tube arrangement 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 impingement surface at 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, and 8D where D was an inner diameter of tailpipe at 47 mm. The length of tailpipe was varied at 16D, 19D, 22D, and 25D. The 4 types of air inlet tube arrangement were (1) single inlet, (2) double inlets with 180° apart, (3) double inlets with 90° apart and (4) triple inlets with 90° apart. The supplied fuel rate of LPG was fixed at 29.8 l/min for all experiments. In the experiment, the average velocity and temperature of free jet along the axial direction of jet were measured by using a Pitot-tube and a thermocouple type K, respectively. The heat transfer rate on an impingement surface was measured by using a heat flux sensor. In addition, the pressure oscillation inside the combustor and near the tailpipe outlet was measured simultaneously by using two pressure transducers. Flow characteristics and combustion phenomenon in pulse combustor were studied by using numerical simulation with 3-D unsteady flow via computational fluids dynamics software, ANSYS ver.13.0 (CFX).

The results from numerical simulation were found that the internal ignition in combustor oscillated corresponding to Helmholtz resonance. At the inlet of air inlet tube and outlet of tailpipe, the entering and releasing of intake air and exhaust gas oscillated corresponding to behavior of pressure oscillation inside the combustor. The variations of internal pressure inside combustor and velocity at tailpipe outlet corresponded to the results from experiment. When frequency of internal pressure inside combustor was compared between the numerical simulation and the experiment, it was found that maximum difference did not exceed 10%. When the effects of inlet tube arrangement were considered at fixed tailpipe length at 16D, it was found that the results still correspond to the experiment. The increased number of air inlet tube resulted on increasing of velocity at tailpipe outlet. This is due to ambient air was more introduced into the combustor, which contributed to complete combustion.

From overall 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 range of 1D to 3D, the jet temperature

and heat transfer on impingement surface decreased rapidly, and for the distance from tailpipe outlet in the range larger than 3D, they decreased gradually and almost constant. The tailpipe length and air inlet tube arrangement affected strongly on the flow rate of intake air entering and mixing in combustor to obtain complete combustion. At the condition of double air inlets with 90^{o} apart, the length of tailpipe at 16D and distance from tailpipe exit to impingement surface at 1D, the heat transfer on the impingement surface was the highest corresponding to the condition having the highest temperature of jet. However, at the same condition, the double inlets with 180^{o} causes on getting the higher velocity of jet.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตามสัญญาเลขที่ ENG550031S คณะผู้วิจัยขอขอบคุณที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภาควิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (THAI)	(2)
บทคัดย่อ (ENGLISH)	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ	(17)
1. บทนำ	1
1.1 ระบบเผาไหม้แบบพัลส์	1
1.2 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz	2
1.3 การเพิ่มความสามารถของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	5
1.4 ทบทวนเอกสารงานวิจัย	6
2. วัตถุประสงค์	15
3. ขอบเขตการศึกษา	15
4. ชุดทดลองและตัวแปร	16
4.1 ลักษณะของปัญหาและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	16
4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	16
4.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง	18
5. วิธีการทดลอง	19
5.1 การศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ปากทางออกของท่อส่ง	19
5.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลมร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน	21
5.3 การศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่งและในห้องเผาไหม้	22
5.4 ศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล(ANSYS Ver.13)	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหล	24
5.4.2 แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน	25
5.4.3 แบบจำลองการเผาไหม้และแผ่รังสี	28
5.4.4 การสร้างแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์	30
6. ผลการทดลองและอภิปรายผล	38
6.1 ผลการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบพัลส์ในห้องเผาไหม้ด้วยกระบวนการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Version 13.0, CFX	38
6.1.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดียวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ	39
6.1.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดียวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ	39
6.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ	41
6.1.4 ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms	46
6.1.5 ผลของความเร็ว (u) ที่เกิดขึ้นในท่อส่งและปลายปากทางออกของท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms	52
6.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ	53
6.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆโดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง	53
6.2.2 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆโดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ	55
6.2.3 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆโดยการคงที่รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง	57
6.2.4 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆโดยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ	60
6.3 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรง	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.1 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง 62

6.3.2 ผลการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ 64

6.4 ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่ง 66

6.4.1 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ 66

6.4.2 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่ง 70

6.4.3 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ 73

6.4.4 ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่งใกล้ปากทางออก (ใกล้ทางออก 4D) ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ 75

6.4.5 เปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันในห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง 78

6.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลจากพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์กับผลการทดลอง 80

6.5.1 ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง 80

6.5.2 ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากผลการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้เทียบกับการทดลอง 82

7. สรุปผลการวิจัย 85

บรรณานุกรม 87

ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1 90

ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2 97

ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3 106

รายการตาราง

หน้า

ตารางที่1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง 19

รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ด้วยระบบสร้างพัลส์ธรรมชาติ	2
รูปที่ 2	หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ชนิด Helmholtz	4
รูปที่ 3	การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้	5
รูปที่ 4	การเกิดชั้นขอบเขตของการไหลแบบขนานกับผนัง	6
รูปที่ 5	การเกิดชั้นขอบเขตของการไหลแบบใช้เจ็ทพุ่งชนหรือปะทะผนัง	6
รูปที่ 6	โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ	7
รูปที่ 7	การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่าง ๆ	8
รูปที่ 8	ภาพถ่ายรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศทั้งสี่รูปแบบที่ใช้ทดลอง	17
รูปที่ 9	รูปแบบของห้องเผาไหม้และการติดตั้งรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศ	17
รูปที่ 10	รูปแบบของห้องเผาไหม้และการติดตั้งรูปแบบของท่อทางเข้าอากาศ	18
รูปที่ 11	พิกัดที่ใช้ในการศึกษา	18
รูปที่ 12	ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์	21
รูปที่ 13	ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์	22
รูปที่ 14	ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งไปพร้อม ๆกัน	23
รูปที่ 15	แบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว	31
รูปที่ 16	แบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)	31
รูปที่ 17	รูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบท่อเดียว	32
รูปที่ 18	แบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 180°	32
รูปที่ 19	แบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 180° ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)	33
รูปที่ 20	รูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 180°	33

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 21	แบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 90°	34
รูปที่ 22	แบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 90° ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)	34
รูปที่ 23	รูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสองท่อที่ห่างกัน 90°	35
รูปที่ 24	แบบจำลองห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศแบบสามท่อที่ห่างกัน 90°	35
รูปที่ 25	แบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อที่ห่างกัน 90° ซึ่งแยกขอบเขตการคำนวณ (Domain)	36
รูปที่ 26	รูปแบบกริดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบทางเข้าอากาศ แบบสามท่อที่ห่างกัน 90°	36
รูปที่ 27	ตำแหน่งดึงผลจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์	38
รูปที่ 28	ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้	39
รูปที่ 29	ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีของท่อทางเข้าอากาศเดียวซึ่งมีความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบ	40
รูปที่ 30	ตำแหน่งและเวลาที่นำผลจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้แบบพัลส์มาใช้พิจารณา	41
รูปที่ 31	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว	42
รูปที่ 32	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 180°	43
รูปที่ 33	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90°	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 34	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ และความเร็วในกรณีที่ความยาวท่อส่งยาวเป็น 16D เป็นเครื่องต้นแบบและการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า	45
รูปที่ 35	ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้แบบพัลส์และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms	46
รูปที่ 36	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms	47
รูปที่ 37	ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และเวลาที่ใช้ในการดึงผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	47
รูปที่ 38	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศเดียว	48
รูปที่ 39	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 180°	49
รูปที่ 40	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสองท่อที่ห่างกัน 90°	50
รูปที่ 41	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้แบบพัลส์รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศสามท่อทางเข้า	51
รูปที่ 42	ผลของเศษส่วนมวลของก๊าซโพรเพนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และปลายของท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเวลา 40 ms ถึง 60 ms	52
รูปที่ 43	ผลของความเร็วในแนว X ในท่อส่งและที่ปลายปากทางออกของท่อส่ง	52
รูปที่ 44	ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง	55
รูปที่ 45	ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 46	ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง	59
รูปที่ 47	ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่างๆ ด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ	61
รูปที่ 48	ผลของวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่รูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศแต่เปลี่ยนแปลงความยาวท่อส่ง	64
รูปที่ 49	ผลของการวัดฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทลมร้อนพุ่งชนโดยตรงด้วยการคงที่ความยาวท่อส่งแต่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศ	66
รูปที่ 50	ผลของความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป	69
รูปที่ 51	ผลของความดันในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป	70
รูปที่ 52	ผลของความดันในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป	72
รูปที่ 53	ผลของความดันในท่อส่งในหนึ่งวัฏจักรการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบพัลส์จากผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่เปลี่ยนไป	73
รูปที่ 54	ผลของความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ	75
รูปที่ 55	ผลของความถี่ย่อยของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อส่งที่เงื่อนไขความยาวท่อส่งต่างๆ	78
รูปที่ 56	ผลการเปรียบเทียบความดันสูงสุด ความดันต่ำสุด และผลต่างความดันในห้องเผาไหม้แต่ละรูปแบบการติดตั้งท่อทางเข้าอากาศและความยาวของท่อส่ง	80
รูปที่ 57	ผลของความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้เทียบกับผลจากการทดลอง	82
รูปที่ 58	ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และในท่อส่งจากการจำลองเทียบกับผลการทดลอง	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ			หน่วย
C_P	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kgK
C_μ	คือ	ค่าตัวแปรไร้มิติในเทอมของความหนืดแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นค่าคงที่	-
d	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทางเข้า	mm
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่ง	mm
E_T	คือ	พลังงานรวม	kJ/kg
E_{bV}	คือ	The energy spectrum for radiation emitted by a blackbody	W/m^2Hz
f_μ	คือ	Wall damping function	-
G_V	คือ	The spectral incident radiation	W/m^2
h	คือ	static enthalpy	kJ/kg
k	คือ	พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน	m^2/s^2
K_{aV}	คือ	Absorption coefficient (สัมประสิทธิ์การดูดซับ)	-
K_{SV}	คือ	Scattering coefficient (สัมประสิทธิ์การกระจาย)	-
ℓ	คือ	ขนาดความยาวของความปั่นป่วน	mm
L	คือ	ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงพื้นผิวพุ่งชนที่ติดตั้งหัววัดการถ่ายเทความร้อนไว้	-
L	คือ	ค่าบ่งชี้เชิงขนาดของช่องการไหล	mm
P	คือ	ความดันของของไหล	Pa
S_E	คือ	แหล่งจ่ายโมเมนตัมจากภายใน	kgm/s
S_m	คือ	แหล่งจ่ายโมเมนตัมจากภายนอก	kgm/s
T_i	คือ	ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity)	-
X	คือ	ระยะจากปากทางออกของท่อส่งถึงหัววัดความเร็วและอุณหภูมิ	-
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล	Kg/m^2
ν	คือ	ค่าความหนืดคิเนเมติก (Kinematic viscosity)	m^2/s
ϑ	คือ	Velocity fluctuations	m/s
V_{kl}	คือ	สัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ของสาร I ในปฏิกิริยา K	-
λ	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/mK
τ	คือ	ความเค้นเฉือนของของไหล	N/m^2
μ	คือ	ความหนืดเชิงจลน์ของของไหล	Kg/ms
μ_t	คือ	ความหนืดแบบปั่นป่วน	Kg/ms

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์คำย่อ			หน่วย
ε	คือ	อัตราการสลายแบบปั่นป่วน	m^2/s^3
δ	คือ	ความหนาของชั้นขอบเขต	mm
ϕ	คือ	ฟังก์ชั่นการกระจายตัวของงานเนื่องจากแรงหนืด	-

รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ

ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ปฐมพร นะระโต, มักตาร์ แวหะยี, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ชยุต นันทดุสิต 2556 ผลของรูปแบบทางเข้าอากาศที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12, 14-15 มีนาคม 2556, โรงแรมอิมพิเรียลโกลเด้นไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย

ปฐมพร นะระโต, มักตาร์ 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.