

ผลของคุณภาพไอเสียในขบวนการ EGR ต่อการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้

The effects of the product of recirculated exhaust gas on combustion oscillation in gas turbine

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง พิทยศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
25/25 ถ. พุทรมณฑล สาย 4 ศาลายา นครปฐม 73170
โทร 0-28892138 ต่อ 6401

Assist. Prof. Roongrueng Bhidayasiri
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University
25/25 Bhudhamonthon 4 Rd, Salaya Nakornpathom 73170 Thailand
Tel: 0-28892138 Ext. 6401

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์เป็นอุปกรณ์สำคัญที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการผลิตกระแสไฟฟ้าและอากาศยาน อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มักกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนและมักปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งเป็นมลพิษออกสู่บรรยากาศ จากการศึกษาวิจัยในอดีตของรุ่งเรือง พิทยศิริ (2544) พบว่า การนำไอเสียหมุนเวียนกลับมาเผาไหม้ใหม่หรือเรียกว่าเทคนิค EGR (Exhaust Gas Recirculation) สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ โดยที่การศึกษาดังกล่าวยังไม่ทราบถึงสาเหตุของการลดลงของการสั่นสะเทือน ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้การสั่นสะเทือนลดลง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยอากาศที่มีความถี่ต่ำกว่า 130 Hz และการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดน้ำ ทำให้นขนาดการสั่นสะเทือนลดลงเทียบเท่ากับเมื่อไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย นอกจากนี้ อุณหภูมิบริเวณแอนติโนดของความดันที่ลดลงยังเป็นผลให้นขนาดการสั่นสะเทือนลดลง

Abstract

Gas turbine combustor is one of the significant instruments used for electricity generation and also aircraft propulsion system. However, complete combustion can induce naturally-occurring oscillations in combustor and emit high temperature related pollution such as Nitrogen Oxide (NO_x) to the atmosphere. Past research has shown that the so-called technique "Exhaust Gas Recirculation" (EGR) could successfully and experimentally

reduce oscillations (Bhidayasiri, 2001). But the previous research did not clearly describe the rationals behind this secret of success. Therefore, this research is aimed to find the causes of such reduction. The result showed that the oscillations were reduced when exhaust gas was pulsed with air at frequencies below 130Hz and they were attenuated at all conditions when pulsed with water. Undoubtedly, the reduction of temperature at pressure antinode of combustor caused of oscillations reduction.

1. บทนำ

การกำเนิดการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้และพัฒนาการของการควบคุม ตลอดจนการใช้เทคนิคในการประยุกต์รูปแบบต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาของMcManas et al., 1993, Candel,1992, Bhidayasiri, 2001

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่หรือเทคนิค EGR (Exhaust Gas Recirculation หรือ Flue gas recirculation) สามารถลดการสั่นสะเทือนภายในห้องเผาไหม้ของเทอร์ไบน์ได้มากถึง 3 เท่า โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเพิ่มเติม ดังในงานวิจัยของ รุ่งเรือง พิทยศิริ (2544) อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงการจำลองไอเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่จากไอเสียที่ได้จากห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่ง เรียกว่า ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (Secondary burner) ซึ่งใช้การหมุนวนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ โดยการลดการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้ แต่ยังมีปรากฏเด่นชัดว่า การลดลงของการ

สันสะท้อนเกิดขึ้นจากสาเหตุใด ดังนั้นจุดประสงค์ในการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้การสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบมีค่าลดลง เมื่อใช้เทคนิคการนำไอเสียหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

การศึกษาเริ่มต้นที่พฤติกรรมของการสันสะท้อนตามรูปแบบห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนแปลงไป และถูกนำมาเปรียบเทียบกับสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ที่มีการปรับปรุงคุณภาพไอเสียที่การใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เท่ากันและมีปริมาณการไหลรวมเท่ากัน

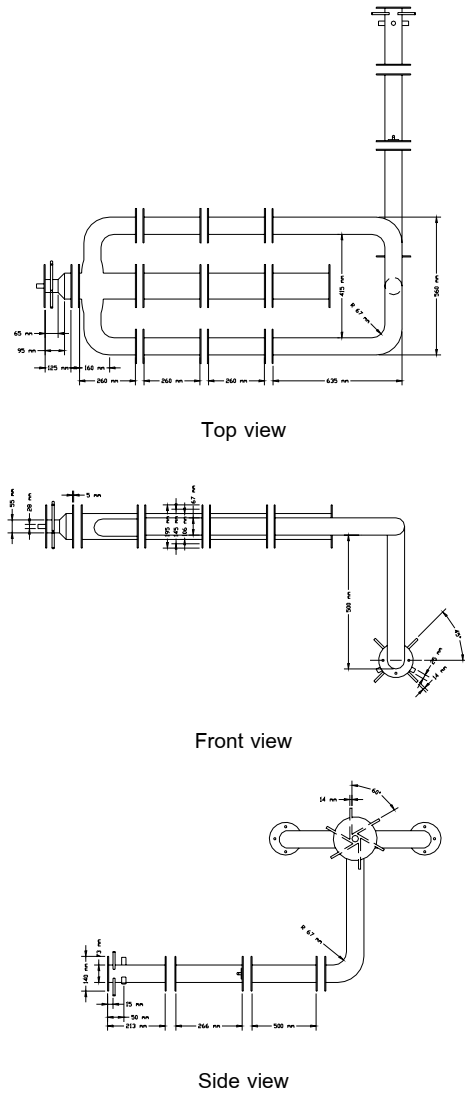
2. โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิตอุปกรณ์และเครื่องมือ

ห้องเผาไหม้เป็นรูปแบบหัวเผาแก๊สเทอร์โบใบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งปลายตันของห้องเผาไหม้หลัก (Primary burner) มีชุดหมุนวนส่วนผสม (Swirler) ประกอบด้วย ท่อในแนวสัมผัส (Tangential inlet) ขนาด 14 มม. จำนวน 6 ท่อ อยู่บนผิวปลายทางเข้าและท่อในแนวแกน (Axial inlet) ขนาด 28 มม. ที่ปลายหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ซึ่งท่อทั้ง 7 จะรับส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ถูกผสมแล้วผ่านชุดเตรียมส่วนผสม (Mixer) 2 ชุด (ชุดหนึ่งเป็นของส่วนผสมหมุนวน อีกชุดเป็นของส่วนผสมในแนวแกน) เมื่อส่วนผสมทั้ง 2 ชุด เข้าไปในห้องเผาไหม้ จะผ่านดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มจาก 55 มม. (d) เป็น 106 มม. (D) การเผาไหม้จะดำเนินต่อไปในท่อหลักที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 106 มม. (D) ซึ่งสามารถปรับความยาวได้ เนื่องจากท่อนี้ถูกทำเป็นท่อน (Module) จำนวน 4 ท่อน ขนาดท่อนละ 250 มม. โดยทำให้ห้องเผาไหม้มีความยาวสูงสุดถึง 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) และที่บริเวณปลายทางออกของห้องเผาไหม้สามารถติดตั้งนอสเชลล์ที่มีขนาดต่างๆ คือ 0.3, 0.5, 0.8 เท่าของ D

ของไหลที่มาจากชุดหมุนวนส่วนผสมจะผสมเข้ากับไอเสียที่มาบรรจบจากท่อคู่ ซึ่งเป็นท่อที่ส่งมาจากห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (Secondary burner) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 67 มม. และวางตัวอยู่ในแนวเดียวกัน ซึ่งนำไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิกลับมาสู่บริเวณ Primary zone ของห้องเผาไหม้หลัก เพื่อเผาไหม้ใหม่อีกครั้ง โดยท่อคู่นี้ผ่านข้อต่อขนาดเดียวกัน ทำให้เป็นท่อตรงคู่ที่ขนานกับแกนห้องเผาไหม้หลักก่อนที่จะไปบรรจบกันที่ตัวเชื่อมสามทางหรือ T-junction ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกันและขาของตัว T จะอยู่ในแนวตั้งก่อนที่จะผ่านข้อต่ออีกตัวหนึ่งที่ลดขนาด ทำให้เป็นท่อเดี่ยวขนาด 73 มม. ที่เชื่อมเข้ากับห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งเป็นห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กกว่าห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ

ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิเป็นห้องเผาไหม้ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 73 มม. มีความยาวจากปลายทางเข้าถึงข้อต่อประกอบ T-junction ทั้งหมดประมาณ 1048.4 มม. ใช้การรักษาสถียรภาพเปลวไฟแบบตัวกัน (Bluff Body) ที่มีลักษณะเป็นจานกลมแบน (Circular Disk) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52.3 มม. ถูกวางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ และห่างจากปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้เป็นระยะทางประมาณ 464 มม. เนื่องจากต้องการบริเวณส่วนเย็นเพียงพอสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เสริมและกันส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ถูกส่งมาจากท่อแนวแกนขนาด 14 มม. จำนวน 4 ท่อ ที่ต่อเข้าสู่ห้องเผา

ไหม้ทุติยภูมิตามแนวแกนรัศมีของห้องเผาไหม้ และเมื่อผ่านตัวกันทำให้เกิดบริเวณหมุนวน (Recirculation zone) อันเป็นปัจจัยในการรักษาสถียรภาพของเปลวไฟเมื่อเกิดการเผาไหม้



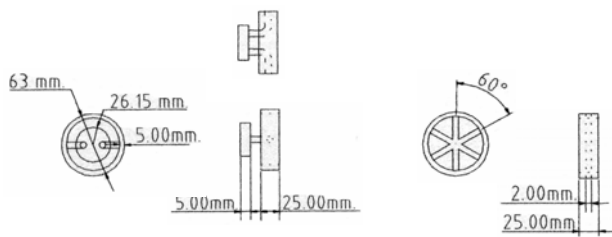
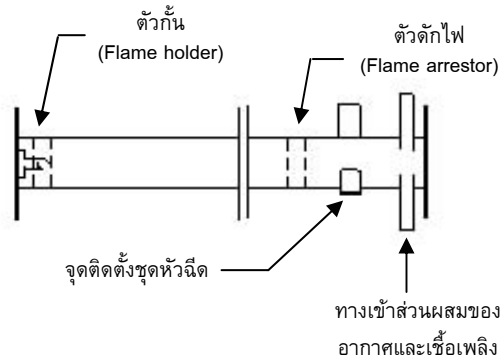
รูปที่ 1 รายละเอียดห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทำวิจัย

อากาศปกติถูกอัดด้วยเครื่องบีบลมของ PUMA (PK 300) ขนาด 30 แรงม้า 6 สูบ ซึ่งให้อัตราการไหลของอากาศสูงสุด 3,805 l/min ที่ความดันบรรยากาศ และเชื้อเพลิงซึ่งใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) อันประกอบด้วยโพรเพนประมาณ 70% และบิวเทนประมาณ 30% ของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย การวัดอัตราการไหลใช้มาตรวัดประเภทลูกลอยที่ถูกทำการปรับตั้ง (Calibrated Float-type Flowmeter) โดยอากาศใช้มาตรวัดจำนวน 4 อันของ OMEGA ที่สามารถวัดปริมาณอากาศในช่วงระหว่าง 280 ถึง 3100 l/min และในช่วงระหว่าง 110 ถึง 1100 l/min สำหรับเชื้อเพลิงใช้มาตรวัดการไหลของก๊าซธรรมชาติจำนวน 2 อัน ของ Bailey Fischer & Porter ที่สามารถวัดได้ในช่วงระหว่าง 24 ถึง 305 l/min ซึ่งมาตรวัดการไหลทั้งหมดนี้ให้ความแม่นยำภายใน 5% ของค่าที่อ่านได้ ซึ่งทำการปรับตั้งร่วมกับเกจวัดความดันที่ติดตั้งกับมาตรวัดการไหล และนำที่ฉีดไปยัง

ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิถูกวัดโดยมาตรวัดการไหลประเภทลูกกลอยของ Dwyer สามารถวัดปริมาณน้ำในช่วงระหว่าง 4 – 40 l/min

ในการวิจัยครั้งนี้ วัดการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้ โดยใช้ Pressure Sensor ของบริษัท STS Technik Sirmach AG รุ่น CH-8370 SIRMACH/SCHWEIZ ตรวจวัดความดันภายในห้องเผาไหม้ โดยติดตั้ง Sensor บริเวณตำแหน่ง Antinode ซึ่งเป็นบริเวณปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้ เนื่องจากเป็นห้องเผาไหม้ปลายปิด (One-closed and one-opened ends) ทำให้คลื่นของความดันมีความยาวคลื่นเป็นหนึ่งในสี่เท่าของความยาวห้องเผาไหม้ (Bhidayasiri, 2000) โดยเราจะป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 15-30 โวลต์ (DC) ให้กับตัวเซ็นเซอร์ เมื่อเซ็นเซอร์ได้รับความดันจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ก็จะส่งสัญญาณ Analog ที่มีแรงดันไฟฟ้า 0-10 โวลต์ (DC) ออกมา จากนั้นเราจึงนำสัญญาณไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและใช้ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA, DL 1540) แปลงสัญญาณโดยการทำ Fourier Transform ให้อยู่ในกราฟสเปกตรัม ซึ่งจะแสดงความถี่กับแอมพลิจูดของความดันและแสดงผลออกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

นอกจากนั้นแล้วยังมีการวัดอุณหภูมิโดยใช้หัววัด Temperature Probe ของ Testo รุ่น 0600.8520 ชนิด K (NiCr-NiAl) DIN IEC 584 และวัดค่า CO, CO₂, O₂ โดยใช้ Probe ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. และ Electrochemical cell ของ Testo รุ่น 342-2 ซึ่งคำนวณค่าความเข้มข้นของไอเสีย เมื่อระบุชนิดของเชื้อเพลิงที่ตรงกับที่เครื่องมีข้อมูล ทำให้ระบุค่า CO ได้ในช่วง 0-4000 ppm และ O₂ ในช่วง 0-21% ส่วน CO₂ สามารถระบุจนถึงค่าสูงสุดได้ ซึ่งทั้งหมดนี้ได้ทำการวัดที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้และบริเวณที่ไอเสียหมุนวนกลับมาเผาไหม้ โดยทำการเจาะรูไว้สำหรับการสอด Probe เข้าไป สำหรับผลนี้จะต้องมีการทำการปรับตั้ง ด้วยก๊าซมาตรฐาน (Span Gas) ด้วยความแม่นยำภายใน 1%



รูปที่ 2 รายละเอียดห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ

ชุดอุปกรณ์หัวฉีดเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ซึ่งจะประกอบด้วยหัวฉีด (Injector) จำนวน 3 ตัว ชนิด Pintle type ซึ่งติดตั้งห่างจากปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้เป็นระยะ 50 มม. โดยหัวฉีดแต่ละอันจะทำมุม 120 องศาในลักษณะสมมาตรตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีกล่องควบคุม (Control box) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดอุปกรณ์หัวฉีดซึ่งผลิตและติดตั้งตามวงจรที่เขียนเป็นการเฉพาะ โดยหัวฉีดแต่ละตัวนั้นจะต้องป้อนแรงดันขนาด 12 โวลต์ (DC) จากกล่องควบคุมหัวฉีด และกล่องควบคุมหัวฉีดจะสร้างแรงดันที่มีลักษณะเป็น Square waves สามารถปรับความถี่ได้ระหว่าง 50-500 Hz และ Time duration (ช่วงระยะเวลาการทำงานต่อหนึ่งรอบความยาวคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันส่วนกลับของความถี่) ตั้งแต่ 10-90 % ของรอบความยาวคลื่น และรับแรงดัน 220 VAC

3. คำอธิบายสัญลักษณ์

Φ_1	ค่า Equivalence ratio ที่ห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ
Φ_2	ค่า Equivalence ratio ที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ
Φ_{Total}	ค่า Equivalence ratio เฉลี่ยทั้งระบบชุดห้องเผาไหม้
Sw	Swirl number หรือตัวเลขแสดงค่าความรุนแรงในการหมุนวนหรือเป็นสัญลักษณ์แสดงทิศทางในแนวสัมผัส
Re ₁	Renolds number ตัวเลขเรโนลด์ของห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ
Re ₂	Renolds number ตัวเลขเรโนลด์ของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ

4. ผลการทดลอง

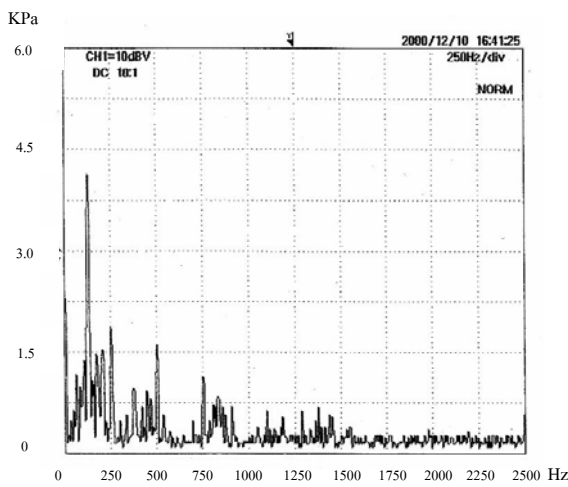
การนำเสนอผลการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ตอน ดังนี้

- ตอนที่ 1 การศึกษาพื้นฐานของการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้ เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงระหว่างห้องเผาไหม้ที่มีได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียกับห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย
- ตอนที่ 2 การศึกษาการสั่นสะเทือนของห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ
- ตอนที่ 3 การศึกษาการสั่นสะเทือนของห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดเชื้อเพลิง
- ตอนที่ 4 การศึกษาการสั่นสะเทือนของห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดก๊าซไนโตรเจน
- ตอนที่ 5 การศึกษาการสั่นสะเทือนของห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดน้ำ

4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

การทดลองเริ่มจากการตัดแปลงห้องเผาไหม้ทุติยภูมิในงานวิจัยของรุ่งเรือง พิทยศิริ (2544) เพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลจากการปรับปรุงคุณภาพไอเสีย โดยทำการติดตั้งชุดหัวฉีด (Injector) ขึ้นที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้เทคนิคการหมุนวน (Swirl) เพื่อเสถียรเปลวไฟได้ เนื่องจากบริเวณที่ติดตั้งหัวฉีดต้องมีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงพิจารณาใช้ตัวกัน (Bluff-body หรือ Flame holder) เป็นตัวเสถียรเปลวไฟในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิแทนการใช้การหมุนวน โดยติดตั้งตัวกันที่บริเวณห่างจากทางเข้าห้องเผาไหม้เข้ามาเล็กน้อย

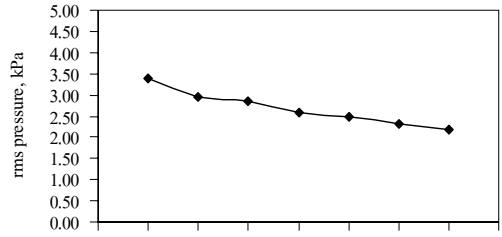
นอกจากนี้ทำการติดตั้งตัวดับไฟ (Flame arrestor) เพื่อป้องกันการเกิดเปลวไฟย้อนกลับที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ เนื่องจากส่วนผสมเป็นแบบพรีมิกซ์ (Premixed) และมีอัตราส่วนของส่วนผสมเข้าใกล้อัตราสมบูรณทางทฤษฎี (Stoichiometry) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเกิดเปลวไฟย้อนกลับขึ้น พร้อมทั้งทำการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิขึ้นอีก 20% ทำให้ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมีปริมาตรการไหลของอากาศเท่ากับ 600 l/min ($Re_1 = 11500$) และห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีปริมาตรการไหลของอากาศเท่ากับ 1400 l/min ($Re_2 = 18500$) เนื่องจากทางทฤษฎี พบว่า สาเหตุที่เปลวไฟย้อนกลับเกิดขึ้นจากความเร็วย้อนกลับของเปลวไฟมีค่าสูงกว่าความเร็วอัตราการไหลของส่วนผสมมาก ซึ่งปรากฏว่าการเพิ่มปริมาตรการไหลของอากาศสามารถแก้ไขปัญหาเปลวไฟย้อนกลับได้ และเปลวไฟยังคงสามารถเสถียรตัวได้อยู่ทั้งในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 3 สเปกตรัมความดันในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 ที่ $\phi_1 = 0.90-1.20$
 $Re_1 = 11,500$ และ $\phi_2 = 0.37-1.90$, $Re_2 = 18,500$

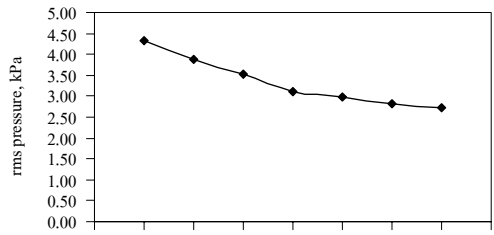
จากการวิเคราะห์สัญญาณของความดันที่ตำแหน่งแอนติโนด (Pressure Antinode) ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความดันสูงสุดในระบบ โดยใช้ Pressure Transducer พบว่า การสั่นสะเทือนมีลักษณะเป็น Single Mode Oscillations เช่นเดียวกับการศึกษาในห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะคล้ายกันนี้ (รุ่งเรือง พิทยศิริ, 2544) ซึ่งมีความถี่เด่นชัดที่ 130 Hz หรือมีค่าเป็น 4 เท่าของความยาวห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าเปลวไฟที่เสถียรตัวในห้องเผาไหม้ทั้งสองมีลักษณะปลายปิดข้างหนึ่งเปิดข้างหนึ่ง

การทดลองกรณีที่ 1 ทำโดยการปรับค่า ϕ_1 ตั้งแต่ 0.9 ถึง 1.2 และ ϕ_2 ตั้งแต่ 0.4 ถึง 1.7 กรณีที่ 2 ทดลองที่ ϕ_{Total} มีค่าคงที่ หมายถึง การจำกัดการใช้เชื้อเพลิงโดยรวมของทั้งระบบให้มีค่าคงที่ แต่ปรับค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงในส่วนต่างๆ ให้แปรค่าได้ โดยให้ $\phi_{Total} = 1.0$ ซึ่งก็คือที่ภาวะ Stoichiometry หรือการเผาไหม้สมบูรณทางทฤษฎี ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คาดว่ามีค่าความร้อนสูงสุด โดยปรับค่า ϕ_1 ตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.2 ในขณะที่ ϕ_2 มีค่าตั้งแต่ 0.6 ถึง 1.5 โดยที่การทดลองทั้งหมดให้ถือว่า Re ของระบบมีค่าคงที่ที่ $Re_1 = 11,500$ และ $Re_2 = 18,500$



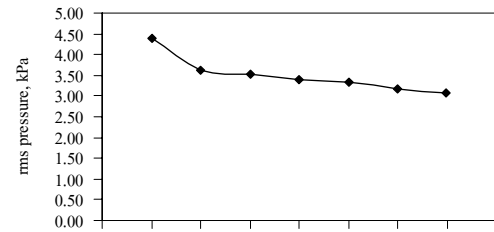
ϕ_{Total}	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
ϕ_2	0.90		1.23		1.57		1.90		
Total Fuel	69.39		77.10		80.95		92.51		

รูปที่ 4a : $\phi_1 = 0.90$, $\phi_2 = 0.90-1.90$



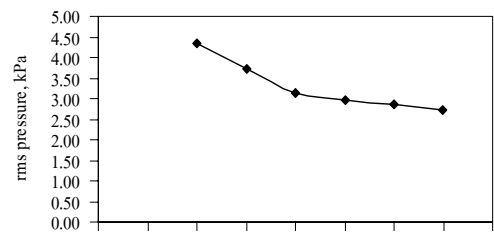
ϕ_{Total}	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
ϕ_2	0.67		1.00		1.33		1.67		
Total Fuel	69.39		77.10		80.95		92.51		

รูปที่ 4b : $\phi_1 = 1.00$, $\phi_2 = 0.67-1.67$



ϕ_{Total}	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
ϕ_2	0.43		0.77		1.10		1.43		
Total Fuel	69.39		77.10		80.95		92.51		

รูปที่ 4c : $\phi_1 = 1.10$, $\phi_2 = 0.43-1.43$



ϕ_{Total}	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
ϕ_2	0.53				0.87				1.20
Total Fuel	69.39		77.10		80.95		92.51		

รูปที่ 4d : $\phi_1 = 1.20$, $\phi_2 = 0.37-1.20$

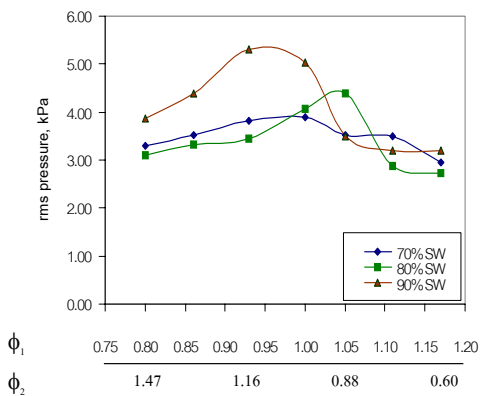
รูปที่ 4 การสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 ที่ $Re_1=11,500$
 $Re_2=18,500$

ผลการทดลองรูปที่ 4 แสดงถึง ขนาดการสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ โดย ϕ_1 มีค่าคงที่ที่ 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 ดังแสดงในรูปที่ 4a, 4b, 4c และ 4d ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าปริมาณเชื้อเพลิงโดยรวมของระบบมีการแปรค่าในทิศทางเดียวกับค่าปริมาณเชื้อเพลิงห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ

ผลการทดลองรูปที่ 4a กรณี $\phi_1 = 0.9$ พบว่า การเพิ่ม ϕ_2 จาก 0.9 เป็น 1.9 ซึ่งทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น แต่การสันสะท้อนในห้องเผาไหม้กลับลดลง ทั้งที่การเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงมักจะทำให้การสันสะท้อนมีค่าสูงขึ้น ส่วนที่ ϕ_1 มีค่า 1.0, 1.1 และ 1.2 (รูปที่ 4b, 4c และ 4d) ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าระดับการสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ขึ้นกับปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิอย่างมาก อาจเนื่องมาจาก การเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิเป็นการเพิ่มปริมาณความร้อนในแนวแกน (Axial) ของห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น เพราะช่องทางการนำไอเสียกลับสู่ห้องเผาไหม้หลักเป็นลักษณะ Coaxial Flows ที่ปะทะกันหลังจากบริเวณ Recirculation zone ที่เปลวไฟมีการเสถียรตัวอยู่ ในขณะที่การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิเป็นการกระจายตัวแบบหมุนวน (Swirl) ซึ่งทำให้การกระจายของความร้อนหลังจากผสมกับไอเสียในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิแล้วมีระดับการแผ่ขยายในแนวรัศมีลดลง ทำให้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ใกล้ผิวท่อมีระดับต่ำลงเช่นกัน จึงมีผลให้การสันสะท้อนมีระดับลดลง

นอกจากนี้ในการทดลอง พบว่า การเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังเกิดขึ้นพร้อมกับขนาดของเปลวไฟที่ยาวขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของ Axial Flow ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีความรุนแรงมากขึ้น ดังที่ได้คาดการณ์ไว้และชี้ให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ลดลง

จากผลการทดลองครั้งก่อน (รุ่งเรือง พิทยศิริ, 2544) พบว่า ปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีอิทธิพลต่อระดับการสันสะท้อนในห้องเผาไหม้มากที่สุด และการเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิไม่ได้ทำให้การสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งให้ผลต่างจากการทดลองครั้งนี้ จึงได้มีการตรวจสอบระดับการสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ โดยจำกัดปริมาณเชื้อเพลิงในระบบมีค่าคงที่ หรือ ϕ_{Total} มีค่าประมาณ 1.0 (Stoichiometry)



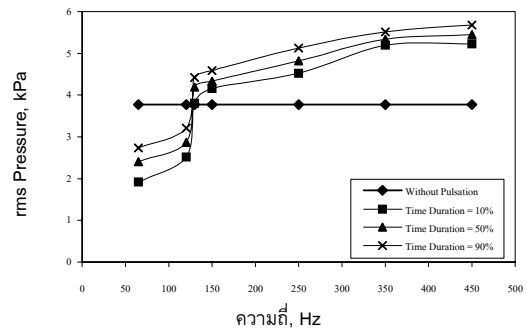
รูปที่ 5 การสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิที่ Sw ค่าต่างๆ ที่ $\phi_{Total} = 1.00$, $Re_1 = 11500$ และ $Re_2 = 18500$

ผลการทดลองรูปที่ 5 การเพิ่มอัตราส่วนผสมในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิจาก 0.8 เป็น 1.2 และอัตราส่วนผสมในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิลดลงจาก 1.47 เป็น 0.6 ที่ระดับความรุนแรงของการหมุนวน 70, 80 และ 90% แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนผสมในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การสันสะท้อนในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ดังเช่นการทดลองในครั้งก่อนและการทดลองของ Bhidayasiri et al. (1998) แต่เมื่อส่วนผสมในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีค่ามากกว่า 1.0 พบว่า ทำให้การสันสะท้อนมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเปลวไฟเริ่มเคลื่อนที่ไปเสถียรตัวห่างจากปลายทางเข้าของดีฟิวเซอร์มากขึ้น ทำให้ความร้อนในบริเวณใกล้ตำแหน่งแอนติโนดของความดันลดลง ซึ่งทำให้การสันสะท้อนมีค่าลดลง เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Bhidayasiri (2001) อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ สามารถสังเกตได้ว่าการที่การสันสะท้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนผสมในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากสาเหตุที่ว่าอัตราส่วนผสมในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิลดลงเช่นกัน ซึ่งทำให้การกระจายตัวของความร้อนในแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4

4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

เพื่อเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่การสันสะท้อนในห้องเผาไหม้ลดลงเมื่อใช้เทคนิค EGR การทดลองส่วนนี้จึงทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดอากาศ เนื่องจาก ก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ฉีดเพิ่มเข้าไปในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือเร่งการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

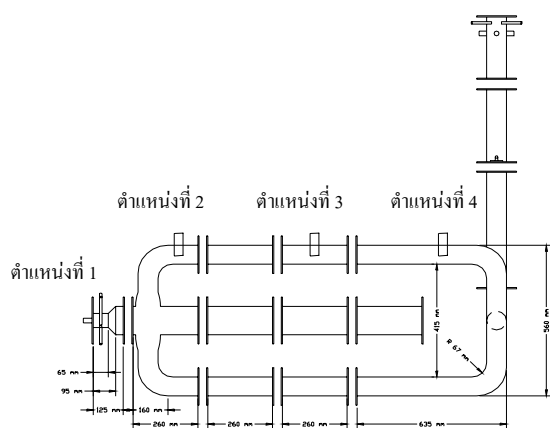
ในการทดลองทำการฉีดอากาศเพิ่มเข้าไปด้วยชุดหัวฉีดในปริมาณ 20% ของปริมาตรการไหลรวมในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (120 l/min) และกำหนดให้ $\phi_1 = 0.8$ และ $\phi_2 = 0.9$ เนื่องจาก อัตราส่วนผสมที่กำหนดนี้เมื่อทำการฉีดอากาศเพิ่มเข้าไปจะทำให้ส่วนผสมบางลงจนอยู่ในระดับที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนหลงเหลือน้อยที่สุด อันเป็นประโยชน์ต่อการเผาไหม้ในขณะที่ส่วนผสมจะไม่ต่ำกว่าขอบเขตการลุกติดไฟส่วนผสมบาง (Lean limit) พร้อมทั้งทำการแปรค่าความถี่ของการฉีดอากาศตั้งแต่ 65 ถึง 450Hz ที่ความยาวนานของการฉีด (Time duration) เท่ากับ 10, 50 และ 90% ของรอบความยาวคลื่น



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการสันสะท้อนกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดอากาศกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียที่ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

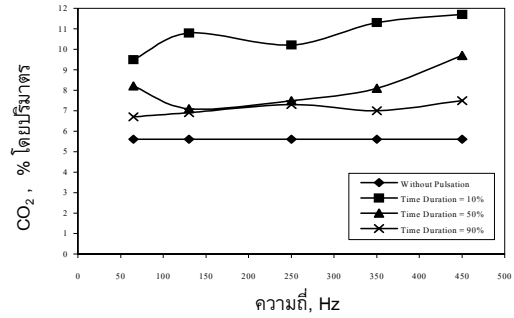
ผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสีย โดยการฉีดอากาศส่งผลกระทบต่อการสิ้นสะท้อนในห้องเผาไหม้เป็นอย่างมาก โดยเห็นได้ชัดที่ความถี่ของการฉีดอากาศต่ำกว่า 130Hz การสิ้นสะท้อนมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย แต่เมื่อให้ความถี่ของการฉีดอากาศสูงกว่า 130Hz ขึ้นไป การสิ้นสะท้อนมีค่ามากกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย โดยที่ความยาวนานของการฉีด 10% และความถี่ของการฉีด 65Hz การสิ้นสะท้อนมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียประมาณ 50% และที่ความถี่ 450Hz การสิ้นสะท้อนมีค่าสูงกว่าประมาณ 30% ซึ่งเห็นได้ว่า การสิ้นสะท้อนในห้องเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่และความยาวนานของการฉีดอากาศ โดยการสิ้นสะท้อนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดที่ช่วงความถี่ประมาณ 130Hz ในทุกค่าความยาวนานของการฉีด นอกจากนี้ขณะทำการทดลองยังพบว่า เมื่อค่าความถี่และความยาวนานของการฉีดเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เปลวไฟมีขนาดสั้นลงอีกด้วย

การลดลงของการสิ้นสะท้อนเมื่อความถี่ของการฉีดมีค่าต่ำกว่า 130 Hz อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิบริเวณแอนติโนดของความดัน (Pressure Antinode) ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิค่าลดลง อันเป็นผลมาจากเปลวไฟในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีขนาดยาวขึ้นหรือเสถียรตัวออกห่างจากบริเวณแอนติโนดของความดันมากขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันถึงสาเหตุดังกล่าว จึงได้ทำการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซออกซิเจน และอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ของห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 7

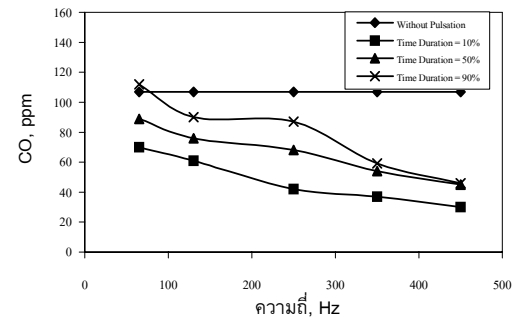


รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซออกซิเจน และอุณหภูมิ

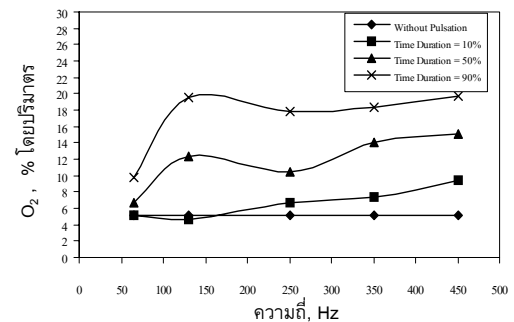
ผลการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดอากาศ ณ ตำแหน่งที่ 3 (รูปที่ 8) พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงสุดที่ความถี่ของการฉีด 450Hz ความยาวนานของการฉีด 10% ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียถึง 110% ดังผลการทดลองรูปที่ 8.1 ส่วนก๊าซออกซิเจนมีค่าสูงสุดที่ความถี่ของการฉีด 450Hz ความยาวนานของการฉีด 90% ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียถึง 300% ดังผลการทดลองรูปที่ 8.2 ในขณะที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า



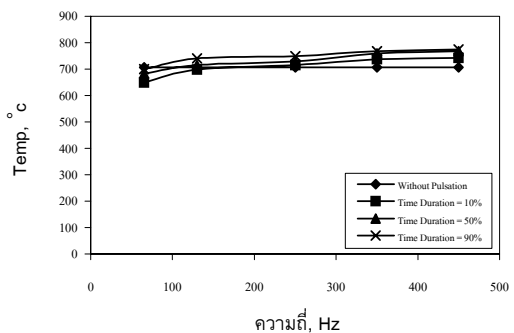
รูปที่ 8.1 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 8.2 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 8.3 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 8.4 ผลการวัดปริมาณความร้อน

รูปที่ 8 เปรียบเทียบองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนและอุณหภูมิระหว่างกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดอากาศกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ณ ตำแหน่งที่ 3 ที่สภาวะ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

น้อยลง โดยพบว่ามีความถี่ของการฉีด 450Hz ความยาวนานของการฉีด 10% ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียถึง 120% ดังผลการทดลองรูปที่ 8.3 ส่วนผลของอุณหภูมิมีลักษณะเช่นเดียวกับการสันตะเทียน คือ ในช่วงความถี่ของการฉีดต่ำกว่า 130Hz อุณหภูมิมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อความถี่ของการฉีดมีค่ามากกว่า 130Hz อุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิมีค่าประมาณ 650 °C ที่ความถี่ 65 Hz และประมาณ 750 °C ที่ความถี่ 450 Hz ที่ความยาวนานของการฉีด 10% ในขณะที่กรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียอุณหภูมิมีค่าประมาณ 700 °C ดังผลการทดลองรูปที่ 8.4 ทั้งนี้ผลการทดลอง ณ ตำแหน่งอื่นๆ (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4) ให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกัน

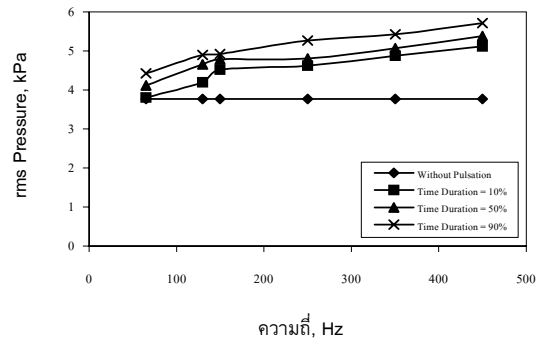
จากผลการทดลอง พบว่า ความถี่และความยาวนานของการฉีดอากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระดับการสันตะเทียนมีค่าสูงขึ้น และยังทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ดังเช่นในตำแหน่งที่ 3 อุณหภูมิเพิ่มจาก 650 เป็น 750 °C หรือประมาณ 15% เมื่อความถี่เพิ่มจาก 65 เป็น 450Hz ที่ความยาวนานของการฉีด 10% ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับขนาดการสันตะเทียน อันเป็นลักษณะของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และการเปลี่ยนแปลงของก๊าซการเผาไหม้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังเช่นการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่ไม่สูงจนเกินไป (การเพิ่มขึ้นของก๊าซออกซิเจนถึงแม้จะดูเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูง แต่เนื่องจากปริมาณต่ำจึงถือว่าระดับยังไม่สูง) และการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อย่างไรก็ตามระดับของก๊าซดังกล่าวอาจไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศ เนื่องจากมีอิทธิพลจาก Time scale ในการเผาไหม้ ซึ่งอยู่นอกเหนือจากการวัดโดยปริมาณ CO/CO₂ เพียงอย่างเดียว ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยย่อมมีผลต่อระดับการสันตะเทียนที่มากได้ ดังเช่นผลการทดลอง

จากผลการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนที่ตำแหน่งต่างๆ ของห้องเผาไหม้ (รูปที่ 8.1, 8.2, 8.3 และ 8.4) แสดงให้เห็นว่า การลดลงของการสันตะเทียนเมื่อปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดอากาศที่ความถี่ต่ำกว่า 130Hz เป็นผลมาจากอุณหภูมิต่ำที่ตำแหน่งแอนติโหนดของความดันในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิลดลง อันเป็นผลเนื่องจากการเปลวไฟเสถียรตัวห่างจากปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้มากยิ่งขึ้น และ/หรือการกระจายตัวของความร้อนในแนวรัศมีลดลง แต่เปลวไฟมีลักษณะตามแนวแกนมากขึ้นหรือยาวขึ้น

4.3 ผลการทดลองตอนที่ 3

การทดลองในส่วนนี้ เริ่มจากการผันแปรปริมาณคาร์บอนอะตอมให้กับไอเสียที่นำกลับมาเผาไหม้ใหม่ ด้วยการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มเข้าไปในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิด้วยชุดหัวฉีดในปริมาณ 4.16 l/min และที่ทางเข้าส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศอีก 20.82 l/min โดยเชื่อว่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเพิ่มเข้าไปนี้จะทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้สูงขึ้น และมีปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้นด้วย หากเป็นไปตามทฤษฎีอุณหภูมิควรมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการเผาไหม้มีความเข้มข้นสูงสุด

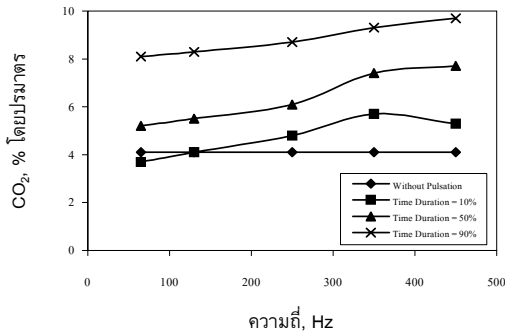
การทดลองทำโดยการแปรค่าความถี่ของการฉีดเชื้อเพลิงตั้งแต่ 65 ถึง 450Hz ที่ความยาวนานของการฉีด (Time duration) 10, 50 และ 90% ของความยาวรอบคลื่น และกำหนดให้ $\phi_1 = 0.8$ และ $\phi_2 = 0.9$ โดยที่ยังมีได้รวมกับเชื้อเพลิงที่ฉีดเพิ่มเข้าไป ซึ่งการทดลองในส่วนนี้ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงค่า ϕ_2 ที่เกิดขึ้นจากการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มเข้าไปในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอเป็นไปตามจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง



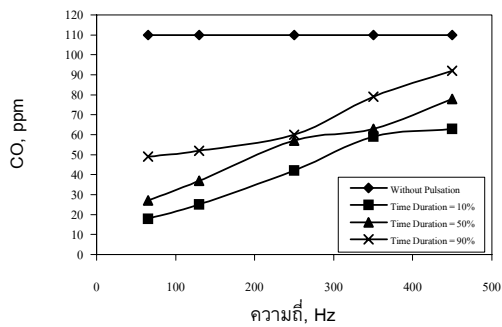
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการสันตะเทียนกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสีย โดยการฉีดเชื้อเพลิงกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียที่ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

ผลการวัดการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ (รูปที่ 9) พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดเชื้อเพลิงมีผลทำให้การสันตะเทียนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่และความยาวนานของการฉีดเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 450Hz ความยาวนานของการฉีด 90% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียมีค่าสูงกว่าประมาณ 60% ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจาก ปริมาณคาร์บอนอะตอมหรือเชื้อเพลิงที่ฉีดเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพไอเสียนั้น ทำให้ไอเสียที่นำกลับมาเผาไหม้ใหม่ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิปะทะกับส่วนผสมในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิหลังบริเวณ Recirculation zone ที่เปลวไฟเสถียรตัวอยู่ เป็นผลให้เปลวไฟเสถียรตัวเข้าไปใกล้ปลายทางเข้าหรือแอนติโหนดของความดันมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งแอนติโหนดของความดันเพิ่มขึ้นด้วย

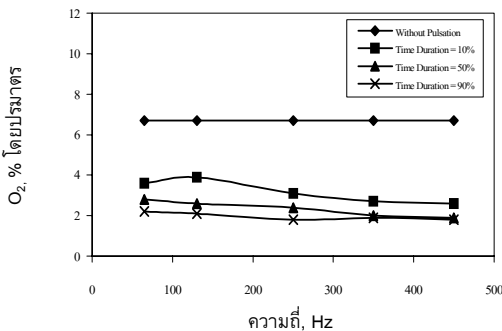
ผลการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดเชื้อเพลิง ณ ตำแหน่งที่ 1 ดังผลการทดลองรูปที่ 10 พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ความถี่ของการฉีด 450Hz ความยาวนานของการฉีด 90% ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ประมาณ 150% ดังผลการทดลองรูปที่ 10.1 ส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงต่ำสุดประมาณ 80% ที่ความถี่ของการฉีด 65Hz ความยาวนานของการฉีด 10% และปริมาณก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลงประมาณ 70% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ทั้งนี้เมื่อความถี่ของการฉีดเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณก๊าซออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังผลการทดลองรูปที่ 10.2 และ 10.3 ตามลำดับ



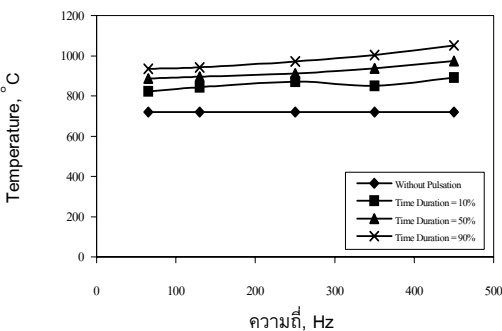
รูปที่ 10.1 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 10.2 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 10.3 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 10.4 ผลการวัดปริมาณความร้อน

รูปที่ 10 เปรียบเทียบองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนและอุณหภูมิระหว่างกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดเชื้อเพลิงกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ณ ตำแหน่งที่ 1 ที่สภาวะ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

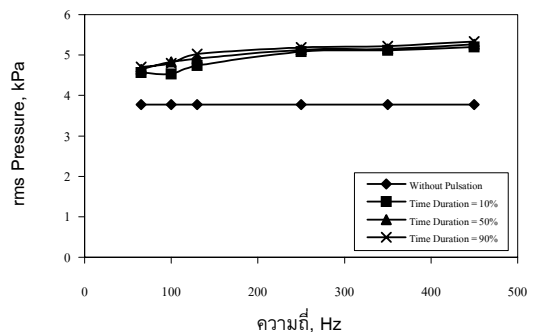
ผลจากการวัดปริมาณความร้อน พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่และความยาวนานของการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของห้องเผาไหม้มีค่าลดลงตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบที่มีลักษณะห้องเผาไหม้แบบรูปร่างยาว ทั้งนี้ ผลการทดลอง ณ ตำแหน่งอื่นๆ (ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4) ให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลอง พบว่า ขนาดการสันเสที่เพิ่มขึ้นมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตามค่าความถี่และความยาวนานของการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้พบว่า การสันเสที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดเชื้อเพลิง เกิดขึ้นพร้อมๆ กับเปลวไฟในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิที่สั้นลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิใกล้กับตำแหน่งแอนติโหนดของความดันในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อประมวลผลรวมกับการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน (เปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย) แสดงให้เห็นว่าการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่น้อยเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม เปรียบเสมือนการกระตุ้นการสันเสที่เนื่องในการเผาไหม้ ทำให้ส่วนผสมโดยรวมเผาไหม้ด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

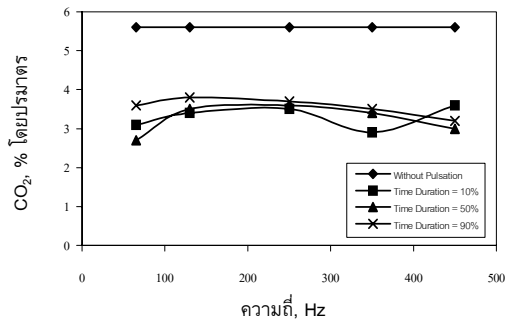
4.4 ผลการทดลองตอนที่ 4

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้มีความจำเป็นในการศึกษาความเข้มข้นของความร้อน โดยที่ไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อพารามิเตอร์อื่นๆ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดก๊าซไนโตรเจน เพราะก๊าซไนโตรเจนช่วยลดความเข้มข้นของความร้อน โดยที่ไม่กระทบต่อความร้อนทั้งหมดของระบบ (Bhidayasiri, 1998)

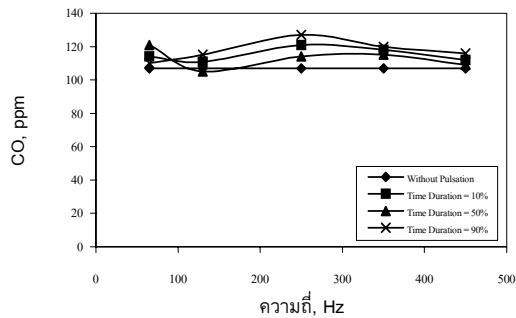
การทดลองเริ่มจากการฉีดก๊าซไนโตรเจนด้วยชุดหัวฉีดในปริมาณ 120 l/min ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ เนื่องจากเป็นปริมาณมากที่สุดที่เปลวไฟสามารถเสถียรตัวได้โดยไม่ดับ โดยทำการแปรค่าความถี่ของการฉีดก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่ 65 ถึง 450 Hz ที่ความยาวนานของการฉีด (Time duration) 10, 50 และ 90% ของความยาวรอบคลื่น ซึ่งทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทั้งสองที่ $\phi_1 = 0.8$ และ $\phi_2 = 0.9$



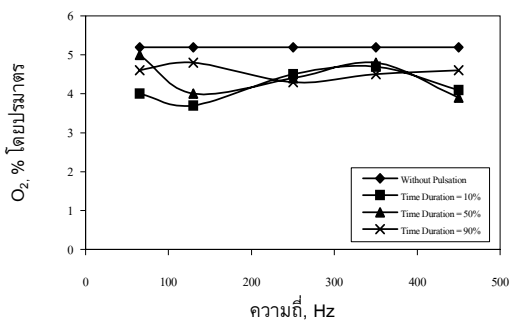
รูปที่ 11 เปรียบเทียบการสันเสที่เนื่องกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดก๊าซไนโตรเจน กับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียที่ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$



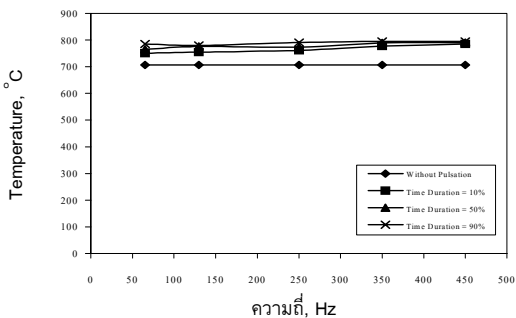
รูปที่ 12.1 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 12.2 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 12.3 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 12.4 ผลการวัดปริมาณความร้อน

รูปที่ 12 เปรียบเทียบองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนและอุณหภูมิระหว่างกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดก๊าซไนโตรเจน กับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ณ ตำแหน่งที่ 3 ที่สภาวะ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

ผลการวัดการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้รูปที่ 11 พบว่า การสันตะเทียนมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียประมาณ 35% ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการฉีดก๊าซไนโตรเจนเป็นการเพิ่มค่าโมเมนต์ให้กับระบบ ส่งผลให้ไอเสียมีโมเมนต์สูงขึ้นและไอเสียดังกล่าวเมื่อเข้าไปปะทะกับส่วนผสมของห้องเผาไหม้ปฐมภูมิบริเวณหลัง Recirculation zone ซึ่งเปลวไฟเสถียรตัวอยู่ อาจทำให้เปลวไฟในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิเสถียรตัวใกล้กับแอนติโหนดของความดันมากยิ่งขึ้น ดังเช่นในกรณีเดียวกับการฉีดอากาศ เพียงแต่กรณีนี้ไม่ได้มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของเชื้อเพลิง

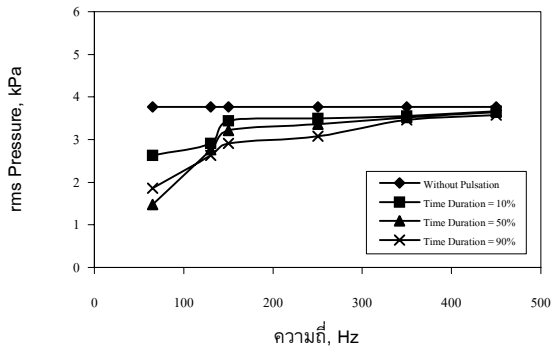
ผลการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดก๊าซไนโตรเจน ณ ตำแหน่งที่ 3 ดังผลการทดลองรูปที่ 12 พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 35 - 40% และก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 15 - 30% ส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ซึ่งคาดคะเนได้ว่าการเผาไหม้มีความสมบูรณ์ลดลง เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนหลงเหลือมากขึ้น ดังผลการทดลองรูปที่ 12.1, 12.2 และ 12.3 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารวมกับผลการวัดปริมาณความร้อน (รูปที่ 12.4) พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดก๊าซไนโตรเจน ทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 15% แสดงว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้มีการใช้คาร์บอนในระบบมากขึ้น ปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือแล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีปริมาณลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสันตะเทียนที่เพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดก๊าซไนโตรเจนเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิใกล้กับแอนติโหนดของความดันเพิ่มขึ้น และยังสอดคล้องกับขนาดเปลวไฟในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิที่สั้นลง ซึ่งผลของอุณหภูมินี้เป็นไปตามขนาดของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้

4.5 ผลการทดลองตอนที่ 5

จากการศึกษาการวิจัยในอดีต พบว่า การฉีดน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ก๊าซเทอร์โบไบโกลองในลักษณะคล้ายกับการศึกษาที่สามารถลดการสันตะเทียนได้ดังในงานวิจัยของ Tsai et al. (1995) ดังนั้นในการวิจัยในครั้งนี้จึงใช้น้ำเป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ทำการศึกษา ซึ่งการฉีดน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้จะทำให้ปริมาณความร้อนในห้องเผาไหม้ลดลง และยังเป็นผลลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนกับออกซิเจน

การทดลองในส่วนนี้ทำการฉีดละอองน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิที่อัตราการไหล 1.30 l/min เพื่อนำความร้อนออกจากห้องเผาไหม้ซึ่งทำให้ความร้อนลดลงประมาณ 4% ของความร้อนทั้งระบบ โดยทำการฉีดละอองน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิด้วยชุดหัวฉีดซึ่งแปรค่าความถี่ตั้งแต่ 65 ถึง 450Hz ที่ความยาวนานของการฉีด (Time Duration) เท่ากับ 10, 50 และ 90% ของรอบความยาวคลื่น โดยทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทั้งสองที่ $\phi_1 = 0.8$ และ $\phi_2 = 0.9$ เช่นเดียวกับการทดลองในส่วนที่ผ่านมา



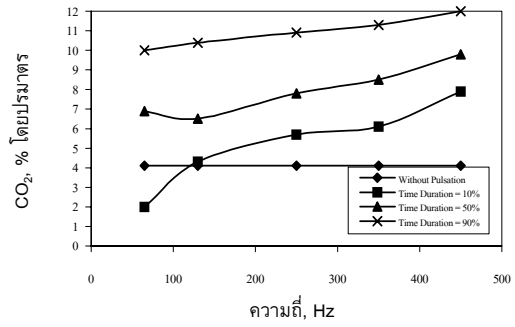
รูปที่ 13 เปรียบเทียบการสันสะเทือนกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสีย โดยการฉีดน้ำกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสียที่ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

ผลการวัดการสันสะเทือนในห้องเผาไหม้ (รูปที่ 13) พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดน้ำมีผลทำให้การสันสะเทือนมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย เนื่องจากการฉีดละอองน้ำให้กับไอเสียเป็นการดึงความร้อนออกจากระบบ ขนาดการสันสะเทือนในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิจึงมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพไอเสีย นอกจากนี้พบว่า การสันสะเทือนมีค่าต่ำในช่วงความถี่น้อยๆ (65-150Hz) เนื่องจากที่ความถี่ต่ำๆ การกระจายตัวของละอองน้ำเกิดขึ้นได้ดีเป็นผลให้ความร้อนในไอเสียลดลงได้มากขึ้น

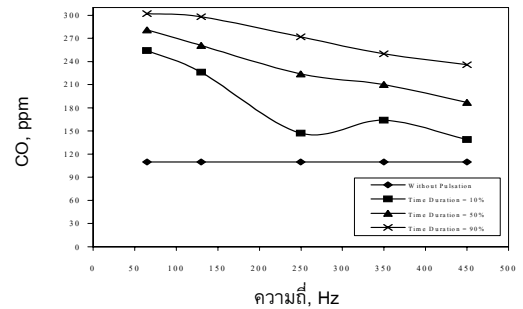
อย่างไรก็ตามที่ความถี่ของการฉีดละอองน้ำสูงกว่า 150Hz พบว่าการสันสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ทั้งนี้เนื่องมาจาก การฉีดละอองน้ำที่ความถี่สูงละอองน้ำมีการฟอร์มตัวเป็นสายทำให้มีอัตราการลดความร้อนในไอเสียต่ำ

ผลการวัดองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดน้ำ ณ ตำแหน่งที่ 1 ดังผลการทดลองรูปที่ 14 พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 200% ก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 150% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า การปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดน้ำมีผลทำให้องค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนในไอเสียเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้มีคุณภาพต่ำลง อย่างไรก็ตามผลการวัดอุณหภูมิชี้ให้เห็นว่าการสันสะเทือนที่ลดลงเกิดขึ้นพร้อมๆ กับอุณหภูมิที่ลดลง ซึ่งเห็นได้จากปริมาณความร้อนมีค่าลดลง เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดน้ำ

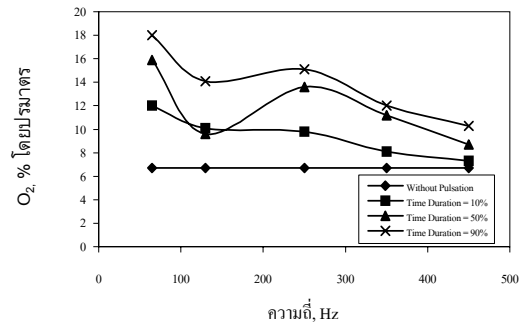
จากผลการวัดองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนและก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (รูปที่ 14.1, 14.2 และ 14.3) ชี้ให้เห็นว่าการลดอุณหภูมิโดยการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดน้ำยังมิได้เป็นข้อจำกัดให้เกิดการดับของเปลวไฟ (Quenching) และละอองน้ำมีการฟอร์มซึ่งเป็นสายมากขึ้น ทำให้เกิดบริเวณที่มีการดับของเปลวไฟมากขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรคาร์บอนหลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้น โดยแสดงออกทางปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปรากฏ ณ ภาวะความถี่ต่างๆ ดังเห็นได้จากระดับการสันสะเทือนที่ลดลงมากที่สุดและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด



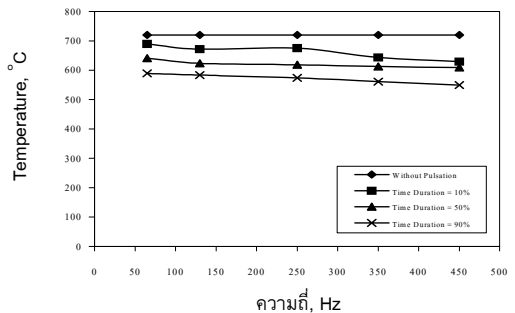
รูปที่ 14.1 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 14.2 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 14.3 ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 14.4 ผลการวัดปริมาณความร้อน

รูปที่ 14 เปรียบเทียบองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอนและอุณหภูมิระหว่างกรณีปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดน้ำ กับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ณ ตำแหน่งที่ 1 ที่สภาวะ $\phi_1 = 0.8$, $Re_1 = 11500$ และ $\phi_2 = 0.9$, $Re_2 = 18500$

5. บทสรุปและวิจารณ์

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้การสันตะเทียนในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ลดลง เมื่อใช้เทคนิค EGR โดยเริ่มจากการศึกษาลักษณะการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ที่ตัดแปลงจากการศึกษาของรุ่งเรือง พิทยศิริ (2544) โดยการวิจัยครั้งนี้ใช้ Flame Holder หรือ Bluff-Body เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟแทนการใช้เทคนิคการหมุนวนส่วนผสม

จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการสันตะเทียนหลักมิได้เปลี่ยนแปลงไป คือ เป็นแบบ Single Mode Oscillations โดยมีความถี่เด่นชัดที่ 130Hz เช่นเดียวกับการศึกษาของรุ่งเรือง พิทยศิริ (2544) นอกจากนี้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับแอนติโหนดของความดันมีผลอย่างมากต่อขนาดของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ เพราะการลดขนาดความร้อนในทิศทางหมุนวนจากการเผาไหม้ในบริเวณดังกล่าว โดยการเพิ่มโมเมนตัมของการไหลในแนวแกนจากการป้อนไอเสียเข้าสู่การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ทำให้การสันตะเทียนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้ง ๆ ที่ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ในระบบจะเพิ่มขึ้นก็ตาม (โดยปกติการสันตะเทียนมักเพิ่มขึ้นตามปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง) ทิศทางของการไหลจึงมีผลมากเช่นกัน หากแต่ความเข้าใจพื้นฐานมักมุ่งเน้นเฉพาะที่ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว

เมื่อศึกษาสาเหตุที่การสันตะเทียนในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์มีค่าลดลงเมื่อใช้เทคนิค EGR ด้วยการปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดอากาศ, เชื้อเพลิง, ก๊าซไนโตรเจน และน้ำ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพไอเสียโดยการฉีดอากาศที่ดีต่ำกว่า 130Hz การสันตะเทียนมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเปลวไฟในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิเสถียรตัวออกจากตำแหน่งแอนติโหนดของความดันมากขึ้น ในขณะที่เมื่อความถี่ของการฉีดมากกว่า 130Hz ทำให้เปลวไฟเสถียรตัวเข้าใกล้กับแอนติโหนดของความดันมากขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น การสันตะเทียนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2. การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดเชื้อเพลิง ทำให้การสันตะเทียนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ทั้งนี้เนื่องจากเปลวไฟเสถียรตัวเข้าใกล้ปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งทำให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น อันสอดคล้องกับการสังเกตเห็นว่าเปลวไฟมีขนาดสั้นลง

3. การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดก๊าซไนโตรเจน เป็นผลให้การสันตะเทียนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณใกล้เคียงกับแอนติโหนดของความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเปลวไฟเสถียรตัวเข้าใกล้บริเวณแอนติโหนดของความดันมากขึ้น

4. การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดน้ำ ทำให้การสันตะเทียนลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพไอเสีย ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิใกล้เคียงกับแอนติโหนดของความดันต่ำลง ทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยการฉีดน้ำยังมีได้เป็นข้อจำกัดให้เกิดการดับของเปลวไฟ (Quenching) นอกจากนี้การสันตะเทียนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการรับความร้อนจากไอเสียของละอองน้ำมีค่าลดลงจากการฟอร์มตัวเป็นสายของละอองน้ำ

อย่างไรก็ดี การศึกษาในครั้งนี้เป็นเพียงการปรับปรุงคุณภาพไอเสียในลักษณะที่ความถี่มีเฟสตรงกับความถี่ของการสันตะเทียนของห้องเผาไหม้ ซึ่งเห็นได้ชัดชัดเจนว่า อุณหภูมิที่ลดลงในบริเวณแอนติโหนดของความดันเป็นผลให้การสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ลดลง อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพไอเสียด้วยความถี่ที่เฟสสัมพันธ์กับความถี่ของการสันตะเทียนของห้องเผาไหม้ย่อมมีผลต่อความดันผันแปรที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ด้วยเช่นกัน และยังคงศึกษาความเป็นไปได้ในอนาคตถึงข้อสรุปที่ชัดเจนอย่างสมบูรณ์ของการลดลงของอุณหภูมิที่บริเวณแอนติโหนดของความดัน ซึ่งต้องใช้เทคนิคการวัดขั้นสูง เช่น LDV เพื่อให้รายละเอียดของค่า rms ของอุณหภูมิและปริมาณโมเลกุลอิสระที่เป็นองค์ประกอบของคาร์บอน

นอกจากนี้ในการวิจัยยังให้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่ออุปกรณ์เทอร์ไบน์ที่ใช้การหมุนวนส่วนผสม (Swirl) และแนวทางการใช้ตัวกัน (Bluff body) เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้มีได้ค่าหนึ่งถึงก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จึงอาจเป็นไปได้ว่าการใช้เทคนิคขั้นสูงในการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนและสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์เทอร์ไบน์ได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่ และห้องปฏิบัติการ ตลอดจนอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำการทดลอง และนักศึกษา วิศวกรรมศาสตร ์ ชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ดังต่อไปนี้

1. นายชัยวัฒน์ แก่นสิงห์
2. นายแมนพงษ์ ธราภูมิพิพัฒน์
3. นายอนันตชัย ไชยวิริยะโชค
4. นายอภิสิทธิ์ สรรพดิกล

ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลองและวัดผลด้วยความอุทิศ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] รุ่งเรือง พิทยศิริ (2541), "การควบคุมการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์", เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12, จัดโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] รุ่งเรือง พิทยศิริ (2544), "การศึกษาผลของรูปร่างทางเรขาคณิตและการหมุนวนไอเสียต่อการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ก๊าซเทอร์ไบน์เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงาน", เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15, จัดโดยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [3] รุ่งเรือง พิทยศิริและมดtima อริยะชัยพาณิชย์ (2542), "แนวทางการลดการสันตะเทียนและออกไซด์ของไนโตรเจนในห้องเผาไหม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตอนที่ I และ II", เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, จัดโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- [4] Billoud, G., Galland, M., Huynh, C. and Candel, S. (1992), "**Adaptive Active Control of Combustion Instabilities**", *Combustion Science and Technology*, Vol. 81, pp. 257-283
- [5] Bhidayasiri, R. (2001), "**Oscillations in Ducted Swirl-Stabilised Flames**", Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, May 29 - June 1, New Orleans, Louisiana
- [6] Bhidayasiri, R. (1998), "**Control of Combustion**", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London
- [7] Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1998), "**Control of Oscillations in Premixed Gas Turbine Combustors**", *Advances in Chemical Propulsion*, edited by G.D. Roy
- [8] Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1997), "**Control of Combustion and NO_x Emissions in Open and Ducted Flames**", Proceedings of the Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Vol. 2, Paper 29.1
- [9] Bloxside, G.J., Dowling, A.P., Hooper, N. and Langhorne, P.J. (1988), "**Active Control of Reheat Buzz**", *Journal of AIAA*, Vol. 26, pp. 783-790
- [10] Brancewell, R.N. (1965), "**The Fourier Transform and its Application**", McGraw-Hill
- [11] Breen, B.P. (1972), "**Emissions from Continuous Combustion Systems**", Plenum Press, pp. 325
- [12] Candel, S.M. (1992), "Combustion Instabilities Coupled by Pressure Waves and Their Active Control", 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1277-1296
- [13] De Zilwa, S.R.N., Uhm, J.H. and Whitelaw, J.H. (1999), "**Combustion Oscillations Close to the Lean Flammability Limit**", Internal Report of Imperial College, University of London
- [14] **EGAT Power Development Plan (PDP 97-02) General Information**, 1997, Generation System Development Planning Department, System Planning Division, Electricity Generating Authority of Thailand, December 1997
- [15] Fernandes, E.C. and Heitor, M.V. (1990), "**On the Noise Characteristics of Confined Swirl Combustor**", ASME Winter Annual Meeting, Texas
- [16] Gupta, A.K., Ramavajjala, M.S. and Chomiak, J. (1991), "**Burner Geometry Effects on Combustion and NO_x Emission Characteristics Using a Variable Geometry Swirl Combustor**", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 7, No. 4
- [17] Gutmark, E.J., Parr, T.P., Hansan-Parr, D.M. and Schadow, K.C. (1992), "**Structure of a Controlled Ducted Flame**", *Combustion Science and Technology*, Vol. 87, pp. 217-239
- [18] Gutmark, E., Schadow, K.C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1991), "**Interaction Between Fluid Dynamic and Acoustic Instabilities in Combusting Flows Within Ducts**", *Combustion Science and Technology*, Vol. 79, pp. 161-166
- [19] Katsuki, M. and Hasegawa, T. (1998), "**The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air**", Proceedings of the 27th Symposium (International) on Combustion, pp. 3135-3146.
- [20] McManus, K.R., Poinot, T. and Candel, S.M. (1993), "**A Review of Active Control of Combustion Instabilities**", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, pp. 1-29
- [21] McManus, K.R., Vandsbyrger, U. and Bowman, C.T. (1990), "**Combustor Performance Enhancement Through Direct Shear layer Excitation**", *Combustion and Flame*, Vol. 82, pp.75-92
- [22] Ochi, T., Katsuki, M., Mizutani, Y and Morinishi, Y (1995), "**An Active Control of Acoustic Noise Generated by Combustion Oscillation**", Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Conference, ASME, Vol. 3, No. H0933C-1995
- [23] Poppe, C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1998), "**Control of NO_x Emissions in Confined Flames by Oscillations**", *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 13-26
- [24] Putnam, A.A. (1971), "**Combustion-Driven Oscillations in Industry**", American Elsevier Publisher
- [25] Sivasegaram, S., Thompson, B.E. and Whitelaw, J.H. (1989), "**Acoustic Characterization Relevant to Gas Turbine Augmentors**", *Journal of Propulsion*, Vol. 5, No. 1
- [26] Sivasegaram, S., Tsai, R.F. and Whitelaw, J.H. (1995a), "**Control of Combustion Oscillation by Forced Oscillation of Part of the Fuel Supply**", *Combustion Science and Technology*, Vol. 105, pp. 67-83
- [27] Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1991), "**The Influence of Swirl on Oscillations in Ducted Premixed Flames**", *Combustion and Flame*, Vol. 85, pp. 195-205
- [28] Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1996), "**Control of Flame and Emissions by Oscillation**", Proceedings of the 9th ONR Propulsion Meeting, pp. 272-285