

การลดการสันเสียเทียนในห้องเผาไหม้ด้วยการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง พิทยศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา นครปฐม 73170

บทคัดย่อ

การสันเสียเทียนในห้องเผาไหม้เป็นที่ยอมรับกันดีว่าทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงเนื่องจากเกิดปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากขึ้นและในหลายกรณีส่งผลให้อุณหภูมิขาออกของห้องเผาไหม้ลดลงด้วย ยิ่งไปกว่านั้นในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานที่มีรูปแบบลำสมัย ซึ่งใช้การหมุนวนของอากาศเพื่อสนับสนุนให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กลงมักจะประสบกับปัญหาการสันเสียเทียนที่มีขนาดรุนแรงมากโดยเฉพาะที่ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับค่าที่สมบูรณ์ตามทฤษฎี (Stoichiometry) หรือที่ค่าส่วนผสมบางซึ่งนิยมใช้ในการลดมลภาวะของไนโตรเจนออกไซด์ การสันเสียเทียนจึงยังเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อเทคโนโลยีที่ลำสมัยและแนวปฏิบัติปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรม

การวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการลดลงของการสันเสียเทียนสามารถทำได้ด้วยการจำกัดสภาวะการไหลหรือใช้การควบคุมแบบแอคทีฟ อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวไม่อาจสามารถทำได้ทั้งหมดจริงเมื่อเครื่องยนต์มีภาวะไหลสูงและมีขนาดใหญ่เหมือนดังในอุตสาหกรรม การนำเทคนิค “การนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่” หรือ “Exhaust Gas Recirculation (EGR)” ซึ่งนิยมใช้เพื่อลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เนื่องจากสามารถทำให้บริเวณที่มีอุณหภูมิเผาไหม้สูงสุดลดลง จึงอาจสามารถทำให้บริเวณที่มีความดันสูงสุดมีอุณหภูมิลดลงเช่นกันพร้อมกับทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย อันทำให้การสันเสียเทียนลดลง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับขนาดทางออกของห้องเผาไหม้ไม่สามารถนำไอเสียกลับมาเผาไหม้อีกครั้งในบริเวณการเผาไหม้ปฐมภูมิ (Primary Zone) ทำให้ต้องจำลองการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยการสร้างไอเสียขึ้นมาโดยห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ การทดลองจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลกับการเผาไหม้ที่มีห้องเผาไหม้เดี่ยวและใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากันและมีสเปกตรัมการสันเสียเทียนที่คล้ายกัน โดยพบว่าการสันเสียเทียนจะขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมากกว่าในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ การนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่สามารถทำให้การสันเสียเทียนลดลงได้และการลดลงจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อส่วนผสมของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมีขนาดเล็กบาง (lean) ซึ่งสามารถทำให้การสันเสียเทียนบริเวณค่าส่วนผสมเชื้อเพลิงที่พอเหมาะ ทฤษฎีลดลงได้มากถึงสามเท่าตัวจากค่าความดันผันแปร 3.5 เหลือเพียง 1.2 กิโลปาสกาล

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรมและอากาศยาน เพราะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สูงกว่า 97% เนื่องจากลักษณะของห้องเผาไหม้ส่วนใหญ่เอื้ออำนวยให้มีเวลาสำหรับการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศหรือเชื้อเพลิงกับไอร้อนหรือไอเสีย (Residence time) ที่พอเหมาะ ยังสามารถทำให้มีระยะเวลาในการผสมกันนานขึ้นก็จะทำให้การเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากขึ้นและอาจทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์เกิดขึ้นด้วยระยะทางที่สั้นลงอีกด้วย การใช้การหมุนวน (swirl) เป็นเทคนิคที่ขณะนี้นิยมใช้เพื่อทำให้ห้องเผาไหม้ที่ขนาดกะทัดรัดและมีความร้อนจากการเผาไหม้สูง

อย่างไรก็ตามสภาวะที่การเผาไหม้สมบูรณ์ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์สามารถกระตุ้นให้เกิดการสันเสียเทียนตามธรรมชาติ (Naturally-Occurring Oscillations) ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงอีกทั้งยังทำให้เกิดการสันเสียเทียนทางกลซึ่งนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างและยังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในระหว่างการเผาไหม้ได้สูง (Bhidayasiri, 2001, McManus et al., 1993, Candel, 1992) นอกจากนั้นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยังกระตุ้นให้เกิดการปล่อยมลภาวะโดยเฉพาะอย่างยิ่งออกไซด์ของไนโตรเจนออกสู่อากาศมากขึ้นซึ่งในปัจจุบันได้เกิดการตื่นตัวในการลดและควบคุมระดับของมลพิษของไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) มากขึ้นจนเป็นการกำหนดมาตรฐานของระดับมลพิษซึ่งเป็นตัวควบคุมอย่างหนึ่งในการออกแบบลักษณะของห้องเผาไหม้ซึ่งที่ใช้อยู่ในสหรัฐอเมริกาและยุโรปก็คือ 27 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งถือว่าเข้มงวดมากและมีแนวโน้มว่าจะลดลงเป็น 9 ppm และอาจนำมาปรับบังคับใช้ในประเทศไทยในอนาคต

ดังนั้นการควบคุมการเผาไหม้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงในขณะที่มีความเค้นทางความร้อนต่ำ ปราศจากการเหนียวทำให้เกิดการสันเสียเทียน รวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนที่สูง และเกิดมลพิษโดยรวมต่ำที่สุดจึงเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรพยายามทำการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิจัยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้กับหัวเผาในอุตสาหกรรมหรือเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ นอกจากนั้นแนวโน้มการใช้เชื้อเพลิงในประเทศตามแผนพัฒนาพลังงานของประเทศ (EGAT Power Development Plan, 1997) จะมีการใช้ก๊าซธรรมชาติได้มากถึง 60 % ของเชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งจะหมายถึงว่าการผลิตพลังงานโดยใช้ก๊าซเทอร์ไบน์จะทวีความสำคัญมากขึ้น ดังนั้นการควบคุมการเผาไหม้จากก๊าซจึงมีบทบาทสำคัญทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดปัญหาน้อยลงทั้งในด้านมลพิษและการสันเสียเทียน

งานวิจัยนี้ใช้ห้องเผาไหม้จำลองซึ่งตรงกับรูปแบบของห้องเผาไหม้แก๊สเทอร์โบไบนที่นิยมในขณะนี้ ซึ่งใช้การหมุนวนส่วนผสม (Swirl) เป็นตัวรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ โดยมุ่งเน้นต่อการแก้ปัญหาที่พื้นฐานของการสันตะเทียนที่เคยได้ทำการศึกษาวิจัยพฤติกรรมมาแล้วในอดีต (Bhidayasiri, 2001, Sivasegaram และ Whitelaw, 1991) และเนื่องจากในรูปแบบดังกล่าวการสันตะเทียนจะเกิดขึ้นโดยมีค่าสูงสุดของความดันหรือ Pressure antinode ที่ปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้กับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้ การลดอุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวรวมทั้งการทำให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้นย่อมจะทำให้การสันตะเทียนลดลง แต่การลดอุณหภูมิโดยการฉีดน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นวิธีการที่มักปฏิบัติในบริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ การฉีดในบริเวณใกล้ทางเข้าอาจทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ลดลง

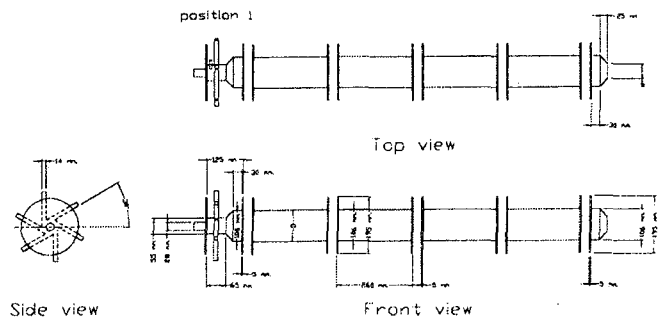
เทคนิคอย่างการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ (Exhaust Gas Recirculation; EGR) จึงถูกให้ความสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการลดออกไซด์ของไนโตรเจนด้วยผลลัพธ์จากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่เปลี่ยนแปลงซึ่งอิทธิพลนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเชื่อมโยงกับการลดลงของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ได้ เทคนิคนี้ในอดีตได้แสดงผลแล้วว่าสามารถลดอุณหภูมิในบริเวณ Primary Zone ได้ซึ่งเป็นบริเวณที่เปลวไฟเสถียรและอยู่ใกล้ปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้ โดยเป็นวิธีที่สำคัญในการออกแบบห้องเผาไหม้เพื่อลดมลพิษ NO_x ได้โดยตรง Breen (1972) พบว่าการใช้สัดส่วนการหมุนวนไอเสียจาก 0 ถึง 40 % สามารถลด NO_x ได้มากถึง 70 % แต่ยังคงพบอีกว่าการใช้สัดส่วนการหมุนวนไอเสียที่มากเกินไปจะทำให้เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนไม่เพียงพอกับเชื้อเพลิงและทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้หรือมีปัญหากับเสถียรภาพของเปลวไฟได้ (รุ่งเรือง พิทยศิริ, 2541) จึงเห็นได้ว่าการใช้เทคนิค EGR อาจนำไปสู่ศักยภาพในการลดการสันตะเทียนพร้อมกันสามารถทำให้เกิดมลพิษ NO_x ลดลงได้อีกด้วย แต่ที่ผ่านมามีการศึกษาผลของ EGR มุ่งเน้นไปที่การลด NO_x เป็นหลัก ยังไม่มีผู้ใดที่นำมศึกษาคือการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ เทคนิคนี้จึงถูกเลือกมาเป็นเทคนิคเพื่อลดการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้จำลองในการศึกษาครั้งนี้

อย่างไรก็ตามการที่จะนำเอาไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่จำเป็นต้องดัดแปลงห้องเผาไหม้ให้สามารถสนับสนุนการไหลกลับของไอเสียได้หรือต้องมีห้องเผาไหม้อีกหนึ่งชุดที่จะผลิตไอเสียมาป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลักได้ รูปแบบของห้องเผาไหม้จึงเปลี่ยนไปและจะทำให้ลักษณะของคลื่นความดันในห้องเผาไหม้เปลี่ยนตามไปด้วย การศึกษาจึงได้เริ่มต้นที่พฤติกรรมของการสันตะเทียนตามรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไป และถูกนำมาเปรียบเทียบกับกรณีสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ก่อนที่มีการดัดแปลงที่ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เท่ากัน จึงสามารถนำประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบกันได้

นอกจากนั้นจากการศึกษาในอดีตที่อ้างอิงในข้างต้นพบว่าสถานะและปริมาณของไอเสียที่นำมาใช้นั้นมีอิทธิพลต่อปริมาณออกซิเจนและคุณสมบัติของการเผาไหม้ได้ การศึกษาจึงต้องกำหนดพารามิเตอร์ของไอเสียที่ใช้ให้เป็นระบบเพื่อนำไปสู่ข้อสรุปว่าสถานะที่สามารถก่อให้เกิดการพัฒนาที่สมบูรณ์เกิดขึ้นด้วยข้อจำกัดของพารามิเตอร์ไหนและอย่างไร

2. โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิต อุปกรณ์และเครื่องมือ

ห้องเผาไหม้เป็นรูปแบบหัวเผาแก๊สเทอร์โบไบนจำลองดังแสดงในรูปที่ 1 เหมือนกับที่ใช้ในการศึกษาของ Bhidayasiri, 2001 ซึ่งปลายต้นของห้องเผาไหม้จะมีชุดหมุนวนส่วนผสม (Swirler) ซึ่งประกอบไปด้วยท่อในแนวสัมผัส (Tangential inlet) ขนาด 14 มม. จำนวน 6 ท่ออยู่บนผิวปลายทางเข้า และจะมีท่อในแนวแกน (Axial inlet) ขนาด 28 มม. ที่ปลายหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ซึ่งท่อทั้ง 7 จะรับส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ได้ถูกผสมผ่านชุดเตรียมส่วนผสม (Mixer) 2 ชุด (ชุดหนึ่งเป็นของส่วนผสมหมุนวนอีกชุดเป็นของส่วนผสมในแนวแกน) เมื่อส่วนผสมทั้ง 2 ชุดเข้าไปในห้องเผาไหม้จะผ่านดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) ซึ่งเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางจากขนาด 55 มม. (d) เป็น 106 มม. (D) ซึ่งในบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ประสงคิให้เปลวไฟเสถียรตัวอยู่ และการเผาไหม้จะดำเนินต่อไปในท่อหลักที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 106 มม. (D) และสามารถปรับความยาวได้เนื่องจากท่อนี้จะถูกทำเป็นท่อน (Module) จำนวน 4 ท่อนโดยมีขนาดท่อนละ 250 มม. โดยสามารถทำให้ความยาวของห้องเผาไหม้ยาวได้สูงสุดถึง 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ก่อนออกจากห้องเผาไหม้ ส่วนบริเวณที่ปลายทางออกจะสามารถติดตั้งนอสเซลล์ที่มีขนาดต่างๆ คือ 0.3, 0.5, 0.8 เท่าของ D เพื่อเพิ่มความเร็วที่ทางออกของห้องเผาไหม้



รูปที่ 1 รายละเอียดห้องเผาไหม้พื้นฐาน

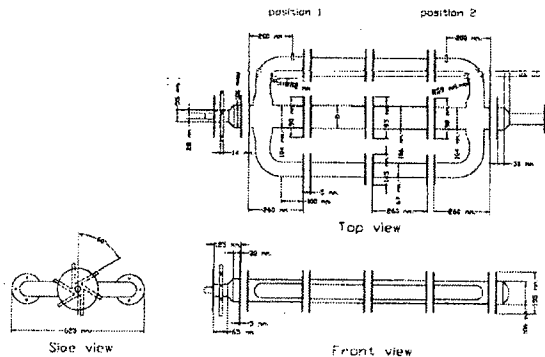
ค่า Swirl number (Sw) ได้จากการคำนวณสัดส่วนของ Flux ของโมเมนตัมในแนวสัมผัสกับในแนวแกนและหารด้วยรัศมีของการหมุนวนที่บริเวณคอคอดของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งจะต้องหาขนาดขององค์ประกอบความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัส ดังสูตรการคำนวณต่อไปนี้

$$Sw = \frac{\int_{d/2}^{D/2} 2\pi r^2 \rho U W dr}{\frac{D}{2} \int_{d/2}^{D/2} 2\pi r \rho U^2 dr}$$

โดยที่ U เป็นความเร็วในแกนและ W เป็นความเร็วในแนวสัมผัส, r และ D เป็นรัศมีและเส้นผ่าศูนย์กลางของการหมุนวน

โดยในการศึกษานี้ เนื่องจากรูปร่างเรขาคณิตของชุดผสมส่วนผสม (Swirler) มีลักษณะคล้ายกับชุดในการศึกษาของ Bhidayasiri et al. (1998) จึงได้ทำการ Interpolate จากการคำนวณในครั้งก่อนและค่า Sw สูงสุดที่ได้จากเรขาคณิตของ Swirler นี้ประมาณ 2.0

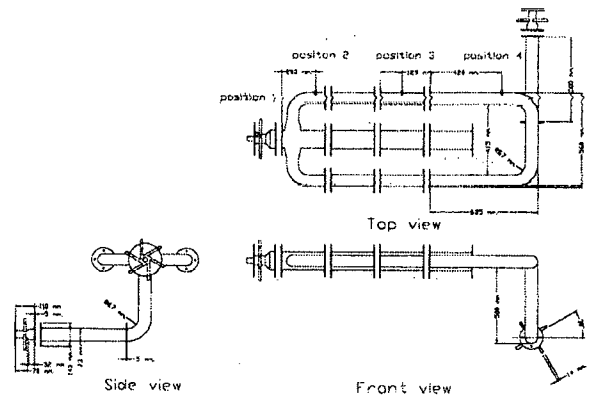
ห้องเผาไหม้ในรูปที่ 1 เป็นห้องเผาไหม้ที่ใช้ศึกษาพื้นฐานของการสันดาปและการเปรียบเทียบ อ้างอิงกับผลจากการใช้ EGR จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงการสันดาปอย่างไร ส่วนในห้องเผาไหม้ในรูปที่ 2 เป็นห้องเผาไหม้จำลองที่บริเวณปลายทางออกก่อนถึงนอสเซลล์มีท่อคู่ขนาด 67 มม. วางตัวอยู่ในแนวเดียวกันตามสมมุติฐานที่จะนำไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาสู่บริเวณ Primary zone เพื่อเผาไหม้ใหม่อีกครั้ง โดยท่อคู่นี้จะผ่านช่องขนาดเดียวกันและเป็นท่อตรงที่ขนานกับแกนห้องเผาไหม้หลักก่อนที่จะผ่านช่องขนาดเดียวกันอีกครั้งเพื่อไปบรรจบกับบริเวณ Primary zone ไกลสุดหมุนวนส่วนผสม



รูปที่ 2 รายละเอียดห้องเผาไหม้แบบมีท่อข้างคู่

ห้องเผาไหม้รูปที่ 3 เป็นชุดที่ประกอบไปด้วยห้องเผาไหม้สองตัว ตัวแรกเหมือนกับห้องเผาไหม้ในรูปที่ 2 แต่แทนที่ท่อคู่ซึ่งขนานกับแกนห้องเผาไหม้หลักจะบรรจบที่บริเวณใกล้ปลายทางออกของห้องเผาไหม้ ท่อคู่นี้จะเชื่อมโยงเข้ากับห้องเผาไหม้ขนาดเล็กอีกตัวหนึ่งที่เรียกว่าห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (Secondary burner) โดยท่อคู่จะยาวพ่นปลายทางออกของห้องเผาไหม้หลัก โดยท่อคู่นี้จะมีชุดช่องซึ่งทำให้ท่อไปบรรจบกันที่ตัวเชื่อมสามทางหรือ T-junction ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกันและขาของตัว T จะอยู่ในแนวตั้งก่อนที่จะผ่านช่องอีกตัวหนึ่งไปเชื่อมเข้ากับห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ

ห้องเผาไหม้ทุติยภูมินี้จะนำไอเสียผ่านตัว T ข้างต้นและผ่านท่อคู่ซึ่งไปบรรจบและส่งไอเสียเข้าไปในบริเวณ Primary zone ของห้องเผาไหม้หลัก โดยที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิจะมีลักษณะคล้ายกับห้องเผาไหม้ในรูปที่ 1 แต่ที่ชุดหมุนวนส่วนผสมจะประกอบด้วยท่อแนวสัมผัสขนาด 14 มม. จำนวน 4 ท่อและไม่มีท่อแนวแกนหรือ Axial inlet และมีขนาดของดัดฟิวเซอร์ที่เปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางท่อจาก 45 มม. (d) เป็น 62.5 มม. (D) จากนั้นจะเป็นท่อที่มีขนาดเดียวกันซึ่งทำให้ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมีความยาวรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ก่อนที่จะผ่านช่องเพื่อนำไอเสียแยกเข้าท่อคู่ด้านบนต่อไป



รูปที่ 3 รายละเอียดชุดห้องเผาไหม้ที่มีระบบนำไอเสียมาใช้

อากาศในความดันบรรยากาศถูกอัดด้วยเครื่องอัดอากาศของ PUMA (PK 300) ขนาด 30 แรงม้า 6 สูบ ซึ่งสามารถผลิตการไหลของอากาศได้ถึง 3805 ลิตรต่อวินาทีที่ความดันบรรยากาศ และเชื้อเพลิงซึ่งใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) อันประกอบด้วยโพรเพน 70 % และบิวเทน ประมาณ 30 % ของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยถูกวัดด้วยมาตรวัดการไหลประเภทลูกลอยที่ถูกทำการปรับตั้ง (Calibrated Float-type Flowmeter) ซึ่งสำหรับอากาศใช้มาตรวัดการไหล(สองอัน)ของ OMEGA ที่สามารถวัดปริมาณอากาศในช่วงระหว่าง 280 ถึง 3100 ลิตรต่อวินาทีและในช่วงระหว่าง 110 ถึง 1100 ลิตรต่อวินาที และสำหรับก๊าซใช้มาตรวัดการไหล(สองอัน)ของ Bailey Fischer & Porter ที่สามารถวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติในช่วงระหว่าง 24 ถึง 305 ลิตรต่อวินาที ซึ่งมาตรวัดการไหลทั้งหมดนี้สามารถให้ความแม่นยำภายใน 5 % ของค่าที่อ่านได้ซึ่งทำการปรับตั้งร่วมกับเกจวัดความดันที่ติดตั้งกับมาตรวัดการไหล

ในการวิจัยครั้งนี้ การสันดาปในห้องเผาไหม้ถูกวัดโดยใช้ Pressure Sensor ของบริษัท STS Technik, Sirmach AG รุ่น CH-8370 SIRMACH/SCHWEIZ ตรวจวัดความดันภายในห้องเผาไหม้ โดยจะติดตั้ง Sensor บริเวณตำแหน่ง Antinode ซึ่งเป็นบริเวณส่วนหัวหรือปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้เนื่องจากเป็นห้องเผาไหม้ปลายปิด (One-closed and one-opened ends) ทำให้คลื่นของความดันมีความยาวคลื่นเป็นหนึ่งในสี่เท่าของความยาวห้องเผาไหม้ (Bhidayasiri, 2000) โดยเราจะป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 15-30 โวลต์ (DC) ให้กับตัวเซ็นเซอร์ เมื่อเซ็นเซอร์ได้รับความดันจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ Sensor ก็จะส่งสัญญาณ Analog ซึ่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีแรงดัน 0-10 โวลต์ (DC) ออกมาจากนั้นเราจึงนำสัญญาณไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลและใช้ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA, DL 1540) แปลงสัญญาณโดยการทำ Fourier Transform ให้อยู่ในกราฟสเปกตรัมซึ่งจะแสดงความถี่กับแอมพลิจูดของความดันและแสดงผลออกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

นอกจากนั้นแล้วยังมีการวัดอุณหภูมิโดยใช้หัววัด Temperature Probe ของ Testo รุ่น 0600.8520 ชนิด K (NiCr-NiAl) DIN IEC 584 และวัดค่า CO, CO₂, O₂ โดยใช้ Probe ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 มม. และชุดวิเคราะห์ไอเสียของ Testo รุ่น 342-2 แบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่ง

สามารถวัด CO ได้ในช่วงระหว่าง 0-4000 ppm และ O_2 ในช่วงระหว่าง 0-21 % ส่วน CO_2 สามารถวัดจนถึงค่าสูงสุดได้ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำการวัดในบริเวณที่ทางออกของห้องเผาไหม้และบริเวณที่ไอเสียหมุนวนกลับมาเผาไหม้ซึ่งได้ทำการเจาะรูไว้สำหรับการสอด Probe เข้าไป สำหรับผลนี้จะต้องมีการทำการปรับตั้ง (Calibration) ด้วยก๊าซมาตรฐาน (Span Gas) ด้วยความแม่นยำภายใน 1 %

3. คำอธิบายสัญลักษณ์

d	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านต้นของดีฟิวเซอร์หรือเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปลายคอคอด (Nozzle) ของห้องเผาไหม้
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านปลายของดีฟิวเซอร์
L	ความยาวของห้องเผาไหม้
Sw	Swirl number หรือตัวเลขแสดงค่าความรุนแรงในการหมุนวน หรือเป็นสัญลักษณ์แสดงว่ามีทิศทางในแนวสัมผัส
Ax	สัญลักษณ์แสดงว่ามีทิศทางขนานกับแนวแกนของห้องเผาไหม้
Re	Reynolds number ตัวเลขเรโนลด์
ϕ	Equivalence ratio ค่าสัดส่วนมาตรฐานของความเข้มข้นเชื้อเพลิงเทียบกับความเข้มข้นที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎี
ϕ_1	ค่า Equivalence ratio ที่ห้องเผาไหม้หลัก (Main combustor)
ϕ_2	ค่า Equivalence ratio ที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (Secondary combustor)
ϕ_{total}	ค่า Equivalence ratio เฉลี่ยทั้งระบบชุดห้องเผาไหม้
η	ค่าสัดส่วนระหว่าง Equivalence ratio ของการไหลที่หมุนวน (Sw) กับการไหลตามแนวแกน (Ax)
Prms	ค่า rms ของความดันแปรปรวน (Pressure fluctuations) ในห้องเผาไหม้

4. ผลการทดลอง

การนำเสนอผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็นสี่ตอน ตามวิธีการดำเนินการวิจัย คือ

- ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาพื้นฐานของการสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงระหว่างห้องเผาไหม้ที่มีรูปแบบเดียวกับห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงใช้การหมุนวนของไอเสีย
- ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 2
- ตอนที่ 3 เป็นการศึกษาการสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 3 โดยที่ใช้อากาศที่ไม่มีการเผาไหม้ส่งผ่านห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ
- ตอนที่ 4 เป็นการศึกษาการสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 3

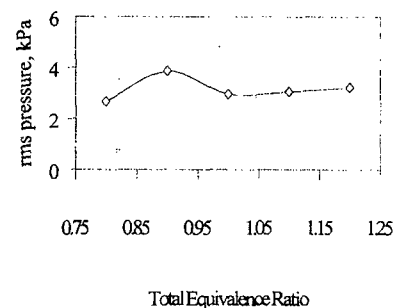
4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

การสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการสันดาปเกิดขึ้นที่ความถี่เดียว (Single-frequency oscillations) ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นนี้เป็นความถี่ที่สอดคล้องกับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นเสียงที่วางตัวอยู่ตามความยาวของห้องเผาไหม้ (A quarter-wave

frequency) เนื่องจากห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นปลายเปิดข้างหนึ่ง (ด้านปลาย) และปลายปิดอีกข้างหนึ่ง (ด้านต้น) และเปลวไฟเสถียรตัวอยู่ที่บริเวณใกล้ปลายทางเข้าทำให้บริเวณปลายทางเข้าจะเป็นแอนติโนดของความดัน (Pressure antinode) จึงเป็นจุดที่ติดตั้ง Pressure transducer

จากการศึกษาที่ผ่านมาในลักษณะของห้องเผาไหม้ (Bhidayasiri, 2000, Bhidayasiri et al., 1998) พบว่าการสันดาปจะมีความถี่สูงขึ้นตามค่า Sw เนื่องจากการเพิ่มค่า Sw จะทำให้เปลวไฟเสถียรตัวอยู่ใกล้บริเวณปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้มากขึ้นซึ่งเป็นบริเวณแอนติโนดของความดัน ทำให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวสูงขึ้นส่งผลทำให้การสันดาปสูงขึ้นด้วย (ตามผลสะท้อนระหว่างการพ้องกันของความดันกับความร้อน; ทฤษฎีของ Rayleigh Criteria) และการศึกษาที่ผ่านมาดังกล่าวได้ทำการวิเคราะห์รายละเอียดของการสันดาปในห้องเผาไหม้โดยละเอียดแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกภาวะการสันดาปที่ความถี่ที่เหมาะสมกับการปรับปรุงและเกิดขึ้นในภาวะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับในภาคอุตสาหกรรม จึงได้เลือกสภาวะการไหลที่ไม่มีคอคอดที่ปลายทางออกเนื่องจากทำให้การสันดาปมีความถี่สูงเหมาะแก่การหาแนวทางปรับลด และที่ค่า Sw ที่ 1.0 ซึ่งไม่รุนแรงจนเกินไปและเป็นค่าที่มักใช้กันในภาคอุตสาหกรรม ค่า Re ที่ 20,000 และสภาวะที่มีความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในการไหลแบบหมุนวนและแนวแกนที่มีค่าเท่ากัน (Premixed Flow) โดยค่าและภาวะเหล่านี้จะถูกรักษาให้คงที่ตลอดการวิจัยเว้นแต่จะระบุไว้เป็นอย่างอื่น

โดยที่ที่ภาวะนี้ การสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 แสดงอยู่ในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการสันดาปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยระหว่างค่า ϕ ระหว่าง 1.0 ถึง 1.2 หรือมีปริมาตรการไหลของเชื้อเพลิงระหว่าง 55 ถึง 70 ลิตรต่อนาที อย่างไรก็ตามเมื่อลดค่า ϕ ให้ต่ำกว่า 1.0 จะทำให้การสันดาปเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากว่าเสถียรภาพของเปลวไฟลดลง ทำให้การเกิดพ้องกันระหว่างความดันกับความร้อนเพิ่มขึ้น ระดับของการสันดาปที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ระหว่าง 3-4 kPa ซึ่งถือเป็นขนาดที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงในห้องเผาไหม้จำลองเนื่องจากจะทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการสันดาปไม่อยู่ในระดับที่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับพลังงานที่ป้อนโดยเชื้อเพลิง



รูปที่ 4 การสันดาปในห้องเผาไหม้รูปที่ 1, ปราศจากคอคอดที่ทางออก, $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

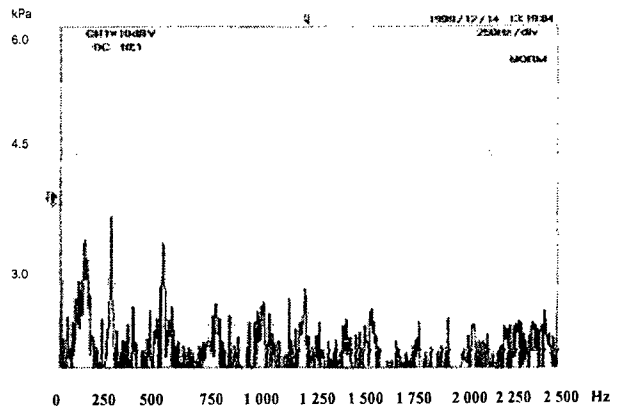
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

ความพยายามในการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่อีกครั้งถูกริเริ่มด้วยแนวคิดที่จะดึงไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้บริเวณก่อนไหลออกจากปลายทางออกของห้องเผาไหม้กลับเข้ามาในบริเวณ Primary zone ใกล้ดีฟไฟวเซอร์ที่เปลวไฟเสถียรตัวอยู่ อย่างไรก็ตามการดึงไอเสียกลับมาโดยกลไกทางธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้ ความดันบริเวณที่จะมีการไหลกลับจะต้องมีขนาดสูงกว่าบริเวณที่จะไหลมา แต่เนื่องจากบริเวณที่จะไหลกลับนั้นอยู่ใกล้เคียงกับโหนดของความดันในห้องเผาไหม้ และบริเวณที่จะไหลมาอยู่ใกล้เคียงกับแอนติโหนด ทำให้การจะไหลกลับมาเองนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง จึงต้องทำให้ความดันในบริเวณที่จะไหลกลับมีความดันเพิ่มมากขึ้น ห้องเผาไหม้จึงปรับปรุงให้มีรูปแบบดังรูปที่ 2 โดยที่บริเวณใกล้ทางออกได้มีความพยายามที่จะเพิ่มความดันโดยติดตั้งคอคอด (Nozzle) เข้าที่ปลายทางออก เพื่อเป็นตัวขัดขวางให้ความดันสูงขึ้นในประการแรก และจะทำให้มีบริเวณที่เกิดการหมุนวนของโครงสร้างของการไหลหรือ Wake เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเกิดบริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยเป็นศูนย์ อันจะทำให้ความดันในบริเวณทางออกเพิ่มขึ้นโดยปริยาย และความดันจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของคอคอด (d) ที่เล็กลง ดังนั้นเพื่อให้มีศักยภาพในการนำไอเสียกลับมาได้มากที่สุด ขนาดของคอคอดที่เลือกใช้จึงเลือกขนาดเล็กที่สุด ซึ่งมีสัดส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง (d/D) เท่ากับ 0.3 และที่ไม่เลือกขนาดของ d/D ที่เล็กกว่านี้ก็เพราะจะทำให้คุณสมบัติของการเผาไหม้ได้รับการกระทบกระเทือนรุนแรงเกินไป ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะลดลงอย่างมาก และการสันตะเทียนก็จะลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากความร้อนในห้องเผาไหม้ลดลง มิใช่จะลดลงจากการนำเอาไอเสียมาเผาไหม้ใหม่อีกครั้ง

อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันที่บริเวณปลายทางออกจะยังไม่ทำให้ความดันเฉลี่ยสูงกว่าค่าที่บริเวณดีฟไฟวเซอร์เนื่องจากขนาดของพื้นที่ที่มีความเร็วเป็นศูนย์ในบริเวณใกล้ดีฟไฟวเซอร์และใกล้ Recirculation zone ย่อมมีขนาดมีใหญ่กว่าบริเวณใกล้ Nozzle แต่โอกาสที่จะมีการไหลกลับจะเกิดขึ้นได้หากความดันของของไหลเฉพาะจุดในบริเวณใกล้ทางออกจะสูงกว่าบริเวณใกล้ดีฟไฟวเซอร์ ซึ่งจะสามารถทำให้มีปริมาณบางส่วนไหลกลับซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์หาปริมาณที่ไหลกลับได้นั้นเกิดขึ้นจริงหรือมีขนาดพอเพียงหรือไม่ การทดลองจึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาลักษณะของการสันตะเทียนและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 โดยแบ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ อิทธิพลของการหมุนวนส่วนผสม (Swirl), อิทธิพลของขนาดคอคอด (Nozzle)

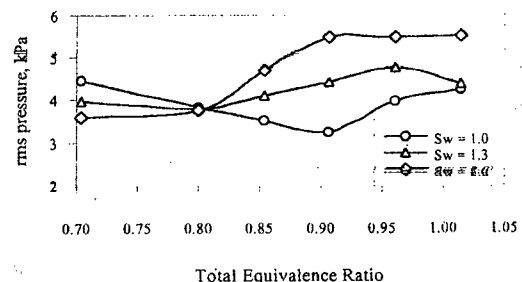
จากการวัดลักษณะของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้พบว่าการสันตะเทียนยังคงมีลักษณะเด่นที่ความถี่เดียว (Single-frequency oscillations) เหมือนในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 ซึ่งเป็นความถี่ที่สอดคล้องกับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในห้องเผาไหม้นั้นคือที่ 130 Hz อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความดันแปรปรวนในห้องเผาไหม้แสดงให้เห็นว่าการกระจายการสันตะเทียนที่ความถี่รอบข้างมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากบางส่วนของการคลื่นความดันมีการเสถียรตัวเข้าไปยังบริเวณปลายทั้งสองของท่อข้างเล็กน้อย ทำให้การสันตะเทียนที่ความถี่อื่น ๆ มีขนาดสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 แต่โดยสรุปแล้วจะเห็นว่ากรณีที่ท่อข้างเพื่อนำไอเสียกลับมาใช้เผาไหม้ใหม่นั้นมิได้ทำให้ลักษณะของการสันตะเทียนเปลี่ยน

แปลงไปมาก หรือการสันตะเทียนยังคงขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของท่อหลักเป็นหลัก



รูปที่ 5 สเปกตรัมความดันในห้องเผาไหม้รูปที่ 2
ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$, $\phi=1$

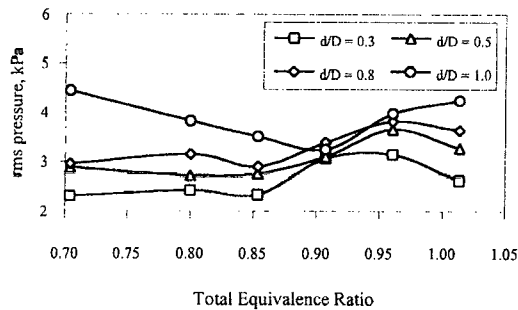
จากรูปที่ 6 พบว่าการเพิ่มค่า Swirl number (Sw) จาก 1.0 เป็น 2.0 ทำให้ภาพรวมของการสันตะเทียนมีขนาดสูงขึ้น สอดคล้องกับการค้นพบในอดีตของ Fernandes และ Heltor (1990) ดังจะเห็นได้ตามแนวโน้มของการสันตะเทียนที่เกิดขึ้นที่ ϕ สูงกว่า 0.8 โดยการเพิ่มค่า Sw จาก 1.0 เป็น 2.0 ที่ ϕ ประมาณ 0.9 ทำให้การสันตะเทียนมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 3.2 เป็น 5.5 kPa อย่างไรก็ตามที่ ϕ ระหว่าง 0.7 ถึง 0.8 นั้นการเพิ่มขนาดของ Sw ทำให้การสันตะเทียนลดลงเล็กน้อยเนื่องจากที่ ϕ ใกล้กับ 0.7 เป็นบริเวณใกล้ขอบเขตส่วนผสมบางของห้องเผาไหม้ซึ่งเปลวไฟมีเสถียรภาพต่ำและการเพิ่มค่า Sw ทำให้เสถียรภาพของเปลวไฟดีขึ้นเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น จึงทำให้ความแปรปรวนของความดันลดลงจาก 4.5 เป็น 3.5 kPa ที่ ϕ เท่ากับ 0.7



รูปที่ 6 ผลของการหมุนวนของส่วนผสมต่อการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$, $\eta=1$

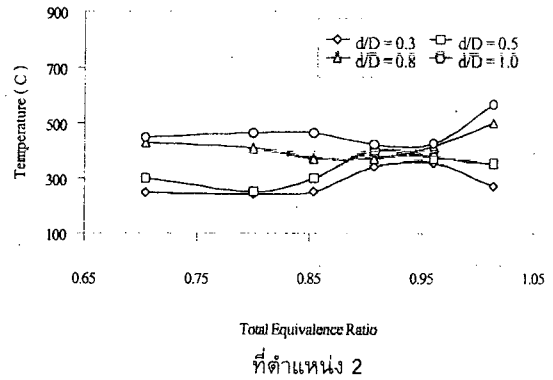
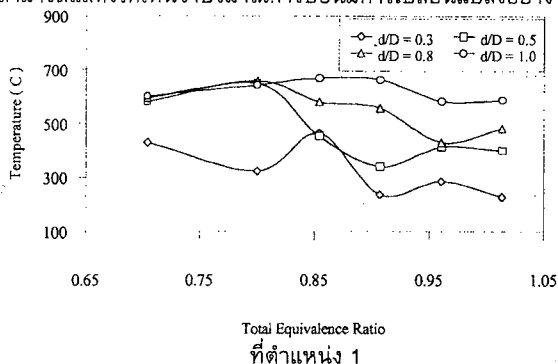
สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของคอคอดที่ปลายทางออก (Nozzle) นั้น การลดขนาดที่รูทางออกทำให้การสันตะเทียนมีขนาดลดลงตามลำดับและจากรูปที่ 7 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ ϕ เท่ากับ 0.7 การลดขนาดสัดส่วนคอคอด d/D จาก 1.0 เป็น 0.3 ทำให้การสันตะเทียน

ลดลงจาก 4.5 เป็น 2.3 kPa แต่การลดลงของการสันสะท้อนนั้นจะเกิดขึ้นพร้อมกับภาวะที่การเผาไหม้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงและความสมบูรณ์ลดลงเนื่องจากจะสังเกตเห็นได้ว่าเปลวไฟจะมีขนาดยาวขึ้นและเปลวไฟกลายเป็นสีส้มมากขึ้น อันเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาในการเผาไหม้ ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่ได้ศึกษาในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 ของ Bhidayasiri, 2000 ดังนั้นจึงยังไม่สามารถชี้แจงได้ว่าการใช้คอคอดที่ปลายทำให้เกิดการไหลกลับของไอเสียหรือไม่ จึงจำเป็นต้องมีการวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของไอเสียซึ่งก็คือ CO และ CO₂ ณ ตำแหน่งต่างๆของห้องเผาไหม้ดังรายละเอียดในรูปที่ 2 เพื่อยืนยันว่ามีปริมาณไอเสียไหลกลับหรือไม่



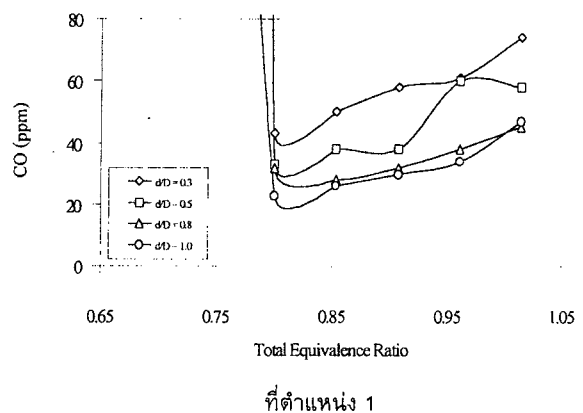
รูปที่ 7 ผลของสัดส่วนคอคอดทางออกต่อการสันสะท้อนในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

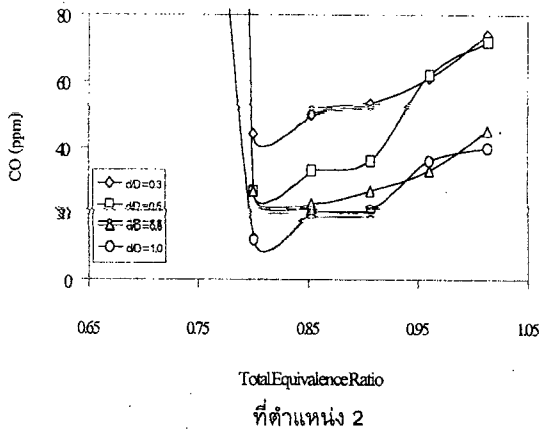
จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งใกล้ตีฟิวเซอร์บริเวณที่เปลวไฟเสถียรตัวและตำแหน่งที่ 2 คือตำแหน่งใกล้บริเวณคอคอดทางออกของห้องเผาไหม้ จากรูปที่ 8 ซึ่งแสดงอุณหภูมิที่วัด ณ ตำแหน่ง 1 และ 2 ขณะที่ใช้คอคอดขนาดต่างๆ จะเห็นว่าแทบจะทุกขนาดของคอคอด อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 สูงกว่าตำแหน่ง 2 ด้วยขนาดประมาณ 100-200 K มีเพียงสภาวะที่ใช้คอคอดขนาดเล็กที่สุดและ ϕ สูงกว่า 0.9 ที่อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 สูงกว่าตำแหน่งที่ 1 ซึ่งอาจเกิดจากการที่เปลวไฟซึ่งยาวขึ้นจากการใช้คอคอดที่ปลายทางออกทำให้เปลวไฟบางส่วนเข้าไปในบริเวณท่อข้าง แต่โดยสรุปแล้วการที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 1 ส่วนใหญ่สูงกว่าตำแหน่งที่ 2 แสดงว่าไม่น่ามีการไหลกลับเกิดขึ้นจริง เพราะหากมีการไหลกลับการไหลที่อยู่ในท่อข้างก็ควรเป็นไอเสียอันเดียวกันและน่าจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน จนกว่าจะวิเคราะห์ร่วมกับค่า CO และ CO₂ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร



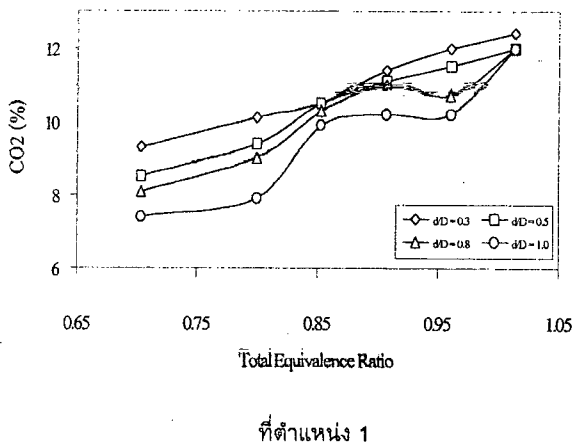
รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

รูปที่ 9 และ 10 แสดงค่า CO และ CO₂ ตามลำดับในภาวะเดียวกันกับในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่า CO ที่ตำแหน่ง 1 สูงกว่าที่ตำแหน่ง 2 ในภาวะ d/D มากกว่า 0.8 (คอคอดมีรูขนาดใหญ่และไม่มีคอคอด) และค่า CO ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 มีขนาดใกล้เคียงกันในกรณีที่ใช้คอคอดมีค่า d/D น้อยกว่า 0.5 (คอคอดมีรูขนาดเล็ก) และสำหรับค่า CO₂ จะเห็นได้ว่าที่ภาวะ d/D น้อยกว่า 0.5 ค่า CO₂ ที่ตำแหน่ง 1 มีขนาดสูงกว่าที่ตำแหน่ง 2 ส่วนที่ขนาดคอคอดอื่นๆนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อใช้คอคอดที่มีขนาดรูทางออกเล็กจะทำให้ทั้งอุณหภูมิ, CO และ CO₂ ที่ตำแหน่ง 1 สูงกว่าตำแหน่ง 2 ชัดเจน ซึ่งหากมีการไหลย้อนกลับไปยังบริเวณคอคอดที่สามควรมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากผลที่ได้ซึ่งสามารถขยายความจากข้อเท็จจริงที่ว่าอุณหภูมิ, CO และ CO₂ ในบริเวณ Primary zone มีขนาดมากกว่าในบริเวณทางออก จึงเป็นข้อสังเกตว่าการไหลในท่อข้างน่าจะมีทิศทางเดียวกับในท่อหลักคือไหลจากปลายทางเข้ามาปลายทางออก มิได้มีการไหลย้อนกลับเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้และหาแนวทางใหม่เพื่อให้สามารถนำไอเสียกลับย้อนกลับได้จริง

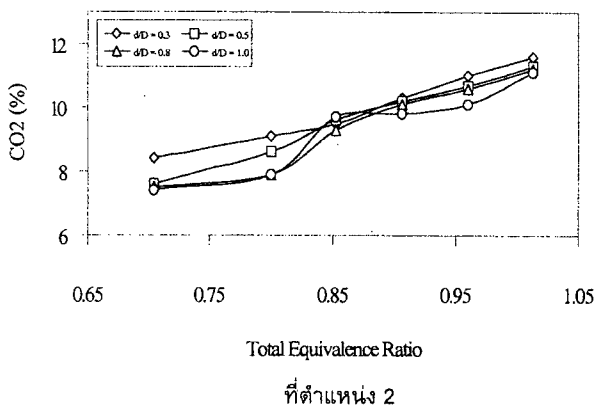




รูปที่ 9 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$



ที่ตำแหน่ง 1



ที่ตำแหน่ง 2

รูปที่ 10 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ในห้องเผาไหม้รูปที่ 2 $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

4.3 ผลการทดลองตอนที่ 3

จะเห็นได้ว่าการออกแบบห้องเผาไหม้ในรูปที่ 2 ไม่สามารถนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ในบริเวณ Primary Zone ได้ และวิธีอื่นๆที่จะนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่สำหรับห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นแกน

ยาวโดยมีความดันที่ต้นทางสูงที่สุดและมีความดันที่ปลายทางเป็นความดันบรรยากาศ อาจจำเป็นต้องมีระบบดูดไอเสียกลับมา ซึ่งจะต้องลงทุนสูงมากและจะทำให้บริเวณที่ถูกดูดไอเสียและเพิ่มความดันกลับเข้าใหม่ ซึ่งก็คือในบริเวณท่อข้างมีความดันผันผวนมากซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อลักษณะความดันในการสันตะเทียนของห้องเผาไหม้หลัก และทำให้ลักษณะการสันตะเทียนเปลี่ยนไป อันทำให้ธรรมชาติของปัญหาที่ศึกษาเปลี่ยนไปอีกที

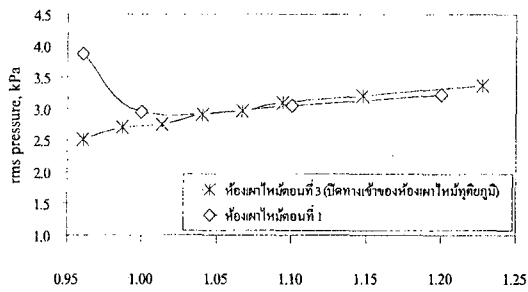
การศึกษาจึงมีแนวคิดว่าจะจำลองไอเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่จากไอเสียที่ได้จากห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่งโดยการสร้างห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่ง(ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ) และส่งไอเสียที่ได้จากห้องเผาไหม้นั้นกลับเข้าสู่ท่อข้างซึ่งนำเอาไอเสียไปยังบริเวณ Primary Zone ของห้องเผาไหม้หลัก ซึ่งแน่นอนว่าการไหลที่เกิดในท่อข้างจะต้องเป็นการไหลจากห้องเผาไหม้ทุติยภูมิไปยังห้องเผาไหม้หลักเพราะเป็นการไหลที่มีทางออกทางเดียวคือการออกที่ปลายของห้องเผาไหม้หลัก นั่นก็คือเป็นการไหลที่นำผลผลิตจากการเผาไหม้หรือไอเสียกลับเข้าเผาไหม้ใหม่ได้เพื่อบรรลุแนวคิดนี้ จึงได้ทำการออกแบบห้องเผาไหม้ดังรูปที่ 3

อย่างไรก็ดีการจำลองนำเอาไอเสียกลับมาเช่นนี้จึงทำให้ไม่เหมือนการนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่อย่างสมบูรณ์เพราะปริมาตรการไหลไม่ได้มีการวนเป็นวงรอบ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้พยายามจำลองให้มีรูปแบบที่คล้ายที่สุดโดยการแบ่งปริมาตรการไหลในห้องเผาไหม้ทั้งสองให้มีผลรวมเท่ากับปริมาตรการไหลในการทดลองกับห้องเผาไหม้หลักอย่างเดียว (รูปที่ 1) ทำให้ปริมาตรการไหลที่ถูกรวมกันก่อนออกจากห้องเผาไหม้มีค่าเท่ากับปริมาตรในกรณีที่มีห้องเผาไหม้หลักอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้ปริมาณเชื้อเพลิง (Total fuel) ในการทดลองกับห้องเผาไหม้รูปที่ 1 และ 3 มีขนาดเท่ากัน เพื่อให้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ทำได้บนพื้นฐานเดียวกัน

การทดลองในห้องเผาไหม้รูปที่ 3 ได้เริ่มขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะทั่วไปของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ก่อน ทั้งนี้เพราะรูปทรงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ได้ถูกต่อเติมโดยมีท่อข้างคู่ขนานกับแกนห้องเผาไหม้หลักและเชื่อมโยงไปห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่งทำให้การเสถียรตัวของคลื่นความดันอาจเปลี่ยนไปโดยบางส่วนของคลื่นอาจเสถียรตัวอยู่ในท่อข้างได้ จึงได้ทำการเผาไหม้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้รูปที่ 3 ในห้องเผาไหม้หลักเพียงอย่างเดียวและไม่มีการเผาไหม้ใดๆในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิโดยเส้นทางจากท่อข้างซึ่งนำไปสู่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิถูกทำให้เป็นระบบปิดไม่มีการไหลใดๆเข้าหรือออกในเส้นทางนั้น เว้นแต่ในห้องเผาไหม้หลักอย่างเดียว ทำให้การไหลมีเส้นทางจากทางเข้าห้องเผาไหม้หลักสู่บริเวณทางออกเท่านั้น

จากผลการทดลองในรูปที่ 11 พบว่าลักษณะของการสันตะเทียนซึ่งวัดที่ปลายทางเข้าของห้องเผาไหม้หลักยังคงมีความถี่ที่เด่นชัดค่าเดียวโดยมีความยาวคลื่นเป็นขนาดสี่เท่าของความยาวของห้องเผาไหม้ทั้งหมดซึ่งก็คือความถี่ที่ 163 Hz และลักษณะของสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่าการสันตะเทียนที่ความถี่อื่นมีขนาดไม่มากนักเมื่อเทียบกับที่ความถี่ที่เด่น แสดงให้ทราบว่า การสันตะเทียนยังคงเกิดขึ้นตามอิทธิพลของแกนห้องเผาไหม้หลัก ซึ่งถือว่าการปรับปรุงห้องเผาไหม้ให้

มีท่อที่นำเอาไอเสียมาเผาไหม้ใหม่นั้นมิได้ทำให้ลักษณะโดยรวมของการสันตะเทียนเปลี่ยนแปลงไปมาก ซึ่งจากการเปรียบเทียบในรูปที่ 11 จะเห็นว่าขนาดของการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้รูปที่ 1 และ 3 มีขนาดใกล้เคียงกัน

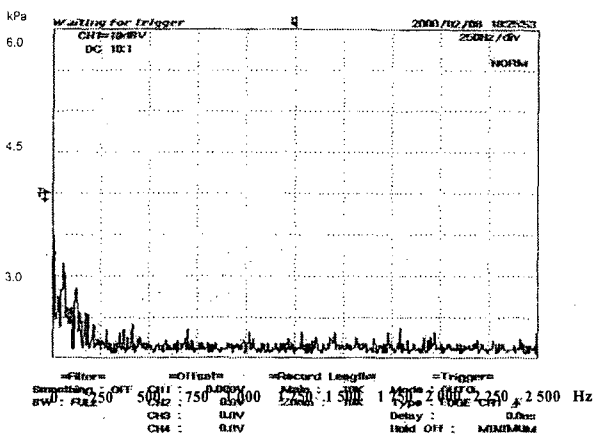


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการสันตะเทียนระหว่างห้องเผาไหม้รูปที่

1 และ 3 (กรณีปิดทางเข้าของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ)

ปราศจากคอคอดทางออก, $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

อย่างไรก็ตามการที่ลักษณะทั่วไปของการสันตะเทียนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีท่อข้างและชุดห้องเผาไหม้ทุติยภูมิดังในรูปที่ 3 นั้นอาจเกิดจากเหตุผลที่ไม่ได้มีการไหลเกิดขึ้นในท่อข้างและชุดห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ แต่ลักษณะการสันตะเทียนอาจเปลี่ยนแปลงได้หากมีการไหลเกิดขึ้นในท่อชุดดังกล่าว ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยเผาไหม้เชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้หลักและส่งอากาศอย่างเดียวกันผ่านห้องเผาไหม้ทุติยภูมิและเปรียบเทียบลักษณะการสันตะเทียนในกรณีที่ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากัน และจากผลการทดลองในรูปที่ 12 พบว่าการสันตะเทียนมีลักษณะคล้ายกับการสันตะเทียนที่มีห้องเผาไหม้หลักอย่างเดียว (รูปที่ 1) และกรณีที่มีชุดห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ (รูปที่ 3) แต่ปิดห้องเผาไหม้ไว้คือมีความถี่ที่เด่นค่าเดียวซึ่งเป็นความถี่ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับสี่เท่าของความยาวรวมของห้องเผาไหม้หลัก แสดงว่ารูปทรงเรขาคณิตที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3 มิได้ทำให้ลักษณะการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้หลักเปลี่ยนไป



รูปที่ 12 สเปกตรัมทางความดันในห้องเผาไหม้หลักของชุดห้องเผาไหม้

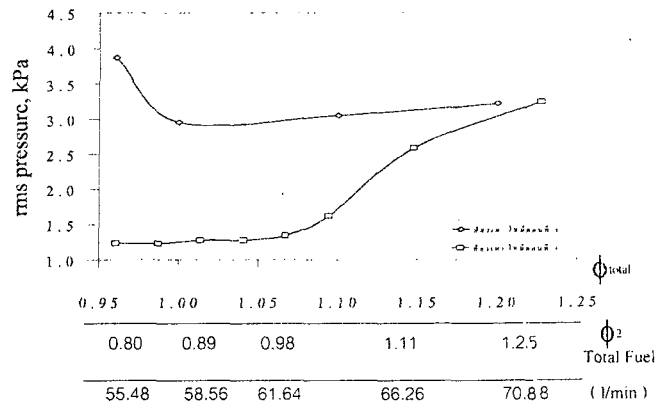
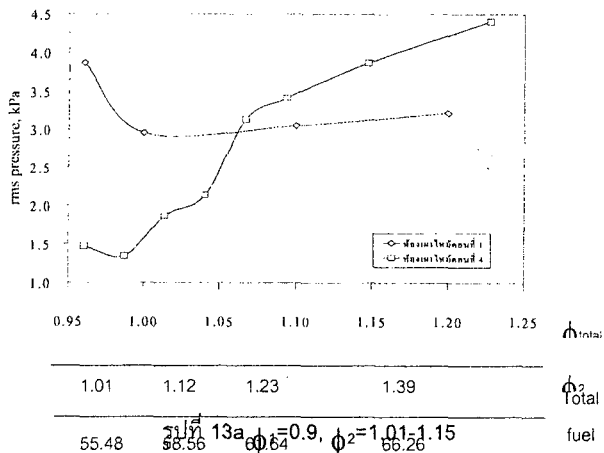
รูปที่ 3 ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$, $Sw=1.0$,

$$\eta=1, \phi=1$$

4.4 ผลการทดลองตอนที่ 4

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองโดยให้มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทั้งสองตัวโดยสร้างไอเสียจากห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ย่อมจะต้องมีการสันตะเทียนเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิและท่อข้างด้วยการแสดงค่าการสันตะเทียนในระบบที่มีการเผาไหม้ในทั้งสองห้องเผาไหม้จึงต้องแสดงค่ารวมของการสันตะเทียนทั้งระบบด้วยโดยการอินทิเกรตขนาดการสันตะเทียนที่เกิดขึ้นที่ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิและที่ท่อข้าง โดยจะต้องพิจารณาว่าการสันตะเทียนที่เกิดขึ้นที่ท่อข้างเป็นส่วนเดียวกันกับของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิหรือไม่ และการสันตะเทียนในห้องเผาไหม้ทุติยภูมีย่อมมีลักษณะเช่นเดียวกันในห้องเผาไหม้หลักเนื่องจากเป็นห้องเผาไหม้ที่ปลายหนึ่งเปิดอีกปลายหนึ่งปิด และจากการวัดความดันในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิและท่อข้างพบว่าการสันตะเทียนยังคงมีลักษณะเด่นที่ความถี่เดียว และมีความถี่ที่ 110 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่สอดคล้องกับห้องเผาไหม้หลัก ดังนั้นผลการทดลองต่อไปจะนำเสนอขนาดการสันตะเทียนที่เป็นของห้องเผาไหม้หลักและของทั้งระบบเทียบกับการสันตะเทียนในกรณีที่มีห้องเผาไหม้หลักอย่างเดียวซึ่งไม่มีการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่และที่ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากัน

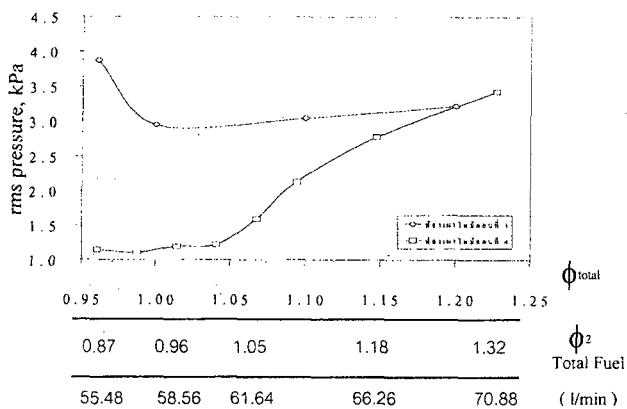
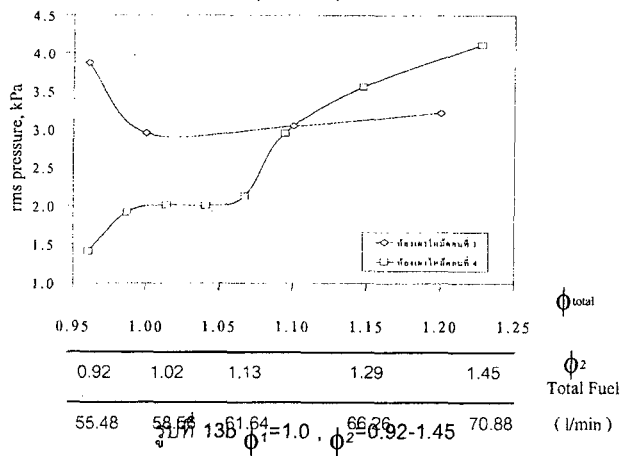
จากการทดลองเมื่อทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทั้งสองโดยแปรค่า ϕ ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิระหว่าง 0.8 และ 1.5 และ ϕ ในห้องเผาไหม้หลักระหว่าง 0.9 และ 1.2 ที่ต้องแปรค่า ϕ ในช่วงดังกล่าวก็เพราะค่าขอบเขตบางของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิอยู่ที่ ϕ ประมาณ 0.8 และของห้องเผาไหม้หลักอยู่ที่ ϕ ประมาณ 0.9 การแปรค่าดังกล่าวเป็นค่าในช่วงส่วนผสมบางที่สุดเท่าที่ทำได้และเป็นเจตนาของผู้วิจัยเนื่องจากการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางกว่าน่าจะทำให้ไอเสียมีส่วนประกอบของคาร์บอนหลงเหลือน้อยที่สุดซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเผาไหม้และลดการสันตะเทียน และจากรูปที่ 13 ได้แสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบการสันตะเทียนในรูปที่ 3 กับรูปที่ 1 กับปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ โดยมีค่าปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้หลักคงที่ที่ค่าต่างๆคือ 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 และเห็นได้ว่าขนาดการสันตะเทียนสามารถลดลงได้เมื่อมีการนำไอเสียมาเผาไหม้ในห้องเผาไหม้หลักโดยที่ทุกค่า ϕ ในห้องเผาไหม้หลัก การสันตะเทียนจะลดลงมากที่สุดในช่วงปริมาณเชื้อเพลิงรวมที่ต่ำหรือที่ส่วนผสมในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิที่บาง โดยที่เมื่อห้องเผาไหม้หลักมีส่วนผสมที่ Stoichiometry ช่วงของการลดลงของการสันตะเทียนอยู่ที่ค่า ϕ เฉลี่ยของทั้งระบบระหว่าง 0.96 ถึง 1.06 (รูปที่ 13b) และช่วงนี้จะกว้างมากขึ้นเมื่อส่วนผสมในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิลดลงซึ่งจะทำให้ส่วนผสมในห้องเผาไหม้หลักหนาขึ้นเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ใช้ในระบบมีค่าคงที่



รูปที่ 13d $\phi_1 = 1.2$, $\phi_2 = 0.8-1.25$

รูปที่ 13 การเปรียบเทียบการสันตะเทียนระหว่างห้องเผาไหม้
รูปที่ 1 และ 3 ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$.

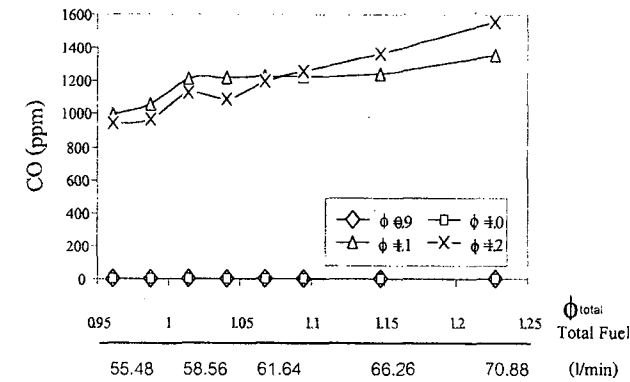
$$Sw=1.0, \eta=1$$



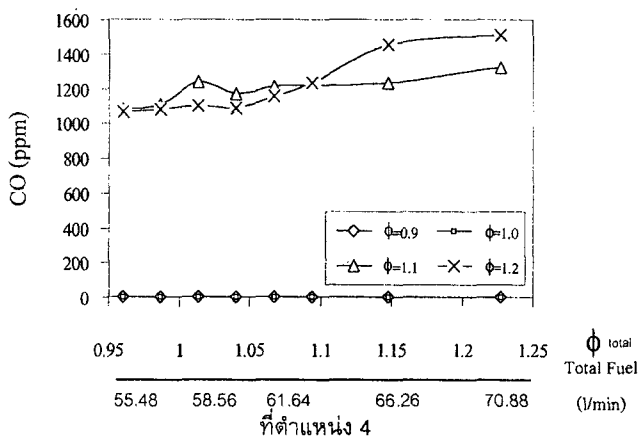
รูปที่ 13c $\phi_1 = 1.1$, $\phi_2 = 0.87-1.32$

ผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่สามารถทำให้การสันตะเทียนลดลงได้ถึงแม้ว่าการสันตะเทียนในกรณีที่มีการใช้ไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่จะได้อัตราความดันในห้องเผาไหม้ทุกตัวภูมิมาตรวัดด้วยก็ตาม ซึ่งการลดลงของการสันตะเทียนน่าจะเกิดจากเหตุผลที่ว่าอุณหภูมิใกล้กับตำแหน่งแอนดิมิตของความดันในห้องเผาไหม้หลักลดลง อันเป็นผลสืบเนื่องจากการเข้มข้นของอะตอมของคาร์บอนในบริเวณใกล้ Primary zone ลดลง ดังนั้นการจะยืนยันสาเหตุของการลดลงของการสันตะเทียนจึงควรทำการวัดองค์ประกอบของอะตอมของคาร์บอนเช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งอุณหภูมิในบริเวณต่างๆ แต่ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่อุณหภูมิได้เพียงประมาณ 1,200 K การวัดจึงกระทำในบริเวณ 2 จุดบนท่อข้างที่นำไอเสียจากห้องเผาไหม้ทุกตัวภูมิซึ่งก็คือตำแหน่งที่ใกล้กับทางเข้าห้องเผาไหม้หลักดังเช่นตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 2 และตำแหน่งที่ห่างออกไปดังเช่นตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 9 เช่นกัน

ในการวัดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังผลการทดลองในรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงโดยรวมต่ำกว่า ϕ_{total} ที่ Stoichiometry (0.9 และ 1.0) การเผาไหม้จากห้องเผาไหม้ทุกตัวภูมิเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (ไม่มีการเกิดก๊าซทั้งสอง) และเมื่อความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซทั้งสอง ณ ตำแหน่งทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันแต่ความเข้มข้นของก๊าซในตำแหน่งที่ใกล้กับทางเข้าของห้องเผาไหม้หลัก (ตำแหน่งที่ 1) มีขนาดต่ำกว่ามากถึง 10 % โดยเฉลี่ย ซึ่งคาดว่าเพราะปริมาณของคาร์บอนต่อมวลอากาศรวมทั้งที่เกิดจากห้องเผาไหม้ทั้งสองมีขนาดลดลงทำให้ผลผลิตของก๊าซทั้งสองลดลงในบริเวณ Primary zone และส่งอิทธิพลในปริมาณก๊าซทั้งสองที่ตำแหน่งที่ 1 ลดลง ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอุณหภูมิในบริเวณ Primary zone ถูกทำให้ลดลงด้วย



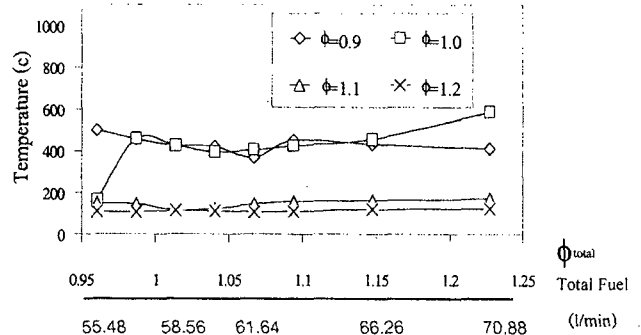
ที่ตำแหน่ง 2



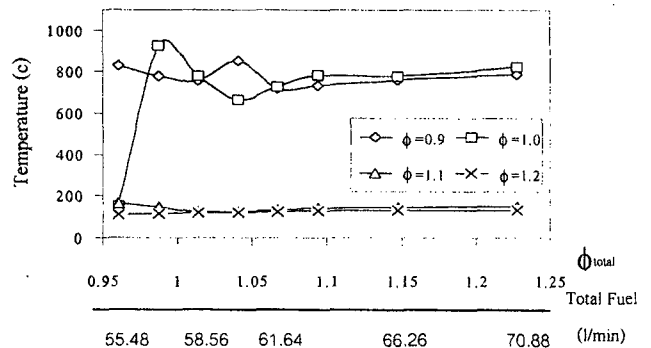
ที่ตำแหน่ง 4

รูปที่ 14 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในชุดห้องเผาไหม้รูปที่ 3
ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

นอกจากนั้นแล้วอุณหภูมิในบริเวณตำแหน่งดังกล่าวซึ่งแสดงในรูปที่ 15 ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเข้าใกล้และประมาณ Stoichiometry มีค่าสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของการเผาไหม้และการเพิ่มของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อยทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 800 K เป็นค่าที่ต่ำกว่า 200 K แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิต่ำกว่าค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมาก และการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญต่อการลดขนาดการสันดาปที่แสดงในผลการทดลองข้างต้น และผลการวัดอุณหภูมิยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 1 มีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึงประมาณ 30-40 % โดยน่าจะมาจากการเผาไหม้ที่บริเวณ Primary zone ที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนลดลงและมีอุณหภูมิลดลงซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญมากต่อผลที่แตกต่างระหว่างตำแหน่งทั้งสอง โดยหากไม่มีผลเช่นนี้ก๊าซในท่อข้างซึ่งเป็นก๊าซปริมาณเดียวกันมาจากแหล่งกำเนิดห้องเผาไหม้เดียวกันย่อมต้องมีคุณสมบัติและอุณหภูมิใกล้เคียงกัน



ที่ตำแหน่ง 2



ที่ตำแหน่ง 4

รูปที่ 15 อุณหภูมิในชุดห้องเผาไหม้รูปที่ 3

ปราศจากคอคอดที่ทางออก $d/D=1$, $Re=20,000$, $Sw=1.0$, $\eta=1$

5. บทสรุปและวิจารณ์

ห้องเผาไหม้ก๊าซเทอร์โบไบน์โดยปกติมักมีรูปร่างยาวโดยมีบริเวณที่กำเนิดปฏิกิริยาความร้อนและ/หรือบริเวณที่เปลวไฟเสถียรตัวอยู่ในบริเวณทางต้นทำให้การกระจายความร้อนในห้องเผาไหม้จึงมีลักษณะของอุณหภูมิลดลงตามแกนของห้องเผาไหม้ อุณหภูมิจึงมักมีค่าสูงที่สุดในบริเวณใกล้กับแอนติโหนดของความดัน การสันดาปที่เห็นถูกเหนี่ยวนำจากการกำหนดระหว่างความดันกับความร้อนจึงมักมีขนาดรุนแรง (Bhidayasiri, 1998) และการลดลงของการสันดาปที่เห็นสามารถทำได้ยาก ไม่ว่าจะเป็นการปรับเปลี่ยนลักษณะของห้องเผาไหม้กำลังก้าวไปสู่ทางต้นของเทคโนโลยีที่ถูกจำกัดเพื่อให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง การควบคุมแบบแอคทีฟที่สามารถทำได้ยากเนื่องจากพลังงานที่ป้อนเข้าไปลดพลังงานจากการสันดาปที่เห็นนั้นจะถูกหน่วงและด้านด้วยระดับความดันที่สูงใกล้ตำแหน่งแอนติโหนดบริเวณที่เปลวไฟเสถียรตัว (McManus et al., 1990) ถึงแม้ว่าจะแสดงให้เห็นได้ในห้องปฏิบัติการว่าการสันดาปสามารถลดลงได้ในระดับถึง 2-3 เท่าตัวแต่เมื่อขยายห้องเผาไหม้ให้มีขนาดเท่าของจริงในภาคอุตสาหกรรม ขนาดของการลดลงก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังเช่นแสดงในผลการศึกษาของ Bhidayasiri et al. (1998), Candel (1992) การลดการสันดาปในห้องเผาไหม้รูปแบบดังกล่าวนี้ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้มากในขณะนี้จึงประสบกับอุปสรรคและข้อจำกัดหลายด้าน

อย่างไรก็ดี จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิในบริเวณ Primary zone เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการสันตะเทือนในห้องเผาไหม้รูปแบบนี้จะเห็นได้ว่าการอุ่นอากาศ (Air preheating) สามารถทำให้การสันตะเทือนลดลงได้ถึงเกือบ 2 เท่าถึงแม้ว่าจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิในระดับเพียงแค่ 200 K (Bhidayasiri, 2001) และการใช้อุณหภูมิอุ่นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1000 K สามารถลดขนาดของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้มากเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอุ่นอากาศสูงมากจะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นด้วยปริมาณออกซิเจนที่ต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยากับไนโตรเจนน้อยลง (Katsuki และ Hasegawa, 1998) และจากหลักการที่ว่า การนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่สามารถทำให้เกิดการลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้ ซึ่งในการทดลองในอดีตนานมาแล้วของ Breen (1972) และการทดลองต่อมาทั้งในเครื่องยนต์อุตสาหกรรมและเครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่มีใช้ในก๊าซเทอร์ไบน์ที่มีการสันตะเทือน ก็พบว่าวิธีการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่สามารถลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์หลายเป็นเท่าตัว ซึ่งหากนำเหตุผลของการใช้อุณหภูมิอุ่นอากาศจะคาดการณ์ได้ว่าการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่ที่เรียกกันว่า Exhaust Gas Recirculation (EGR) หรือ Flue Gas Recirculation มีโอกาสที่จะลดการสันตะเทือนในห้องเผาไหม้ได้ ด้วยเหตุผลที่ว่า การนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่ก็จะคล้ายกับการอุ่นอากาศและยังไปกว้านนั้นยังอาจทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยในบริเวณ Primary zone ลดลงหรือมีการกระจายตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การวิจัยโดยใช้เทคนิค EGR จึงเป็นความพยายามที่จะลดได้ทั้งการสันตะเทือนและก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

จากผลการศึกษาที่ถือเป็นความพอใจในระดับหนึ่งก็ถึงแม้การนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่มิได้เป็นการหมุนวนของไอเสียอย่างเป็นวงจรโดยสมบูรณ์แต่เป็นการเลียนแบบนำเอาไอเสียจากห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่ง ก็ยังสามารถนำไปสู่การลดลงของการสันตะเทือนได้กว่า 2 เท่าตัวในช่วงส่วนผสมที่ Total Equivalence Ratio ตั้งแต่ 0.96 ถึง 1.094 ซึ่งการที่การสันตะเทือนลดลงน่าจะเกิดจากอุณหภูมิใกล้เคียงตำแหน่งแอนติโหนดของความดันลดลงและเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งยังต้องการการทดลองเพิ่มเติมเพื่อวัดอุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวอีกเพื่อหาผลลัพธ์ที่แน่นอน หรือแม้กระทั่งการลดลงอาจเกิดจากผลโดยอ้อมของปริมาณอะตอมของคาร์บอนที่ลดลงในบริเวณนั้นก็เป็นได้

สำหรับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์นั้นโดยปกติแล้วปริมาณก๊าซนี้ในห้องเผาไหม้รูปแบบในการศึกษานี้จะลดลงเมื่อการสันตะเทือนเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าการสันตะเทือนที่เพิ่มขึ้นช่วยทำให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงสุดลดลง อุณหภูมิจะแปรค่ามากขึ้น หรือเป็นการลด Residence time (Sivasegaram และ Whitelaw, 1996) ดังนั้นเมื่อมีการทำให้การสันตะเทือนลดลงด้วยเทคนิคใดก็แล้วแต่ ก็ต้องขึ้นอยู่กับว่าเทคนิคนี้จะทำให้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิใหม่ในบริเวณ Primary zone ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่แปรปรวนระหว่างเกิดการสันตะเทือนสูงหรือไม่ หากเป็นเช่นนั้นเทคนิค EGR จะถือว่ามีความคุ้มค่าด้วยการทำให้การสันตะเทือนและไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้พร้อมกัน ซึ่งที่ผ่านมายังถือเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันได้ยาก และในการศึกษานี้ได้แสดงแนวคิดใหม่ให้เห็นว่าเทคนิค EGR เป็นเทคนิคที่สามารถทำให้เกิดขึ้นมีโอกาสเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ปัญหาที่ต้องมีการพิจารณาต่อไปในอนาคตก็คือจะอย่างไรเพื่อให้ EGR สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ในห้องเผาไหม้รูปแบบนี้โดยมีต้องเลียนแบบการนำไอเสียโดยใช้ห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่ง การทดลองต่อไปจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเติมทั้งรายละเอียดของอุณหภูมิในบริเวณ Primary zone ซึ่งแน่นอนว่าจำเป็นต้องใช้เครื่องมือประเภท Non-intrusive เช่น Laser Doppler Velocimetry (LDV) และการทดลองปรับระดับความดันของระบบโดยใช้ปัจจัยภายนอกเพื่อให้ไอเสียสามารถกลับมายังบริเวณต้นทางได้โดยมิต้องใช้ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมาเสริม

สำหรับการศึกษานี้ในครั้งนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็นข้อๆดังนี้

1. การสันตะเทือนในห้องเผาไหม้ที่ใช้การหมุนวนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟมักมีขนาดรุนแรงและการลดโดยใช้วิธีการควบคุมแบบแอคทีฟสามารถทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดของลักษณะความดันภายในทำให้มีแรงหนุนต่อพลังงานที่จะใส่เข้าไปได้สูง การลดการสันตะเทือนควรใช้แบบพาสซีฟโดยปรับปรุงสภาพการไหลให้มีอุณหภูมิในบริเวณ Primary Zone ต่ำลง และวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้คือการนำเอาไอเสียกลับมาใช้ใหม่
2. วิธีปฏิบัติต่อการนำเอาไอเสียมาใช้ใหม่ในการศึกษานี้มิได้เป็นการวนกลับมาของไอเสียอย่างสมบูรณ์เหมือนในทางทฤษฎีแต่เป็นการเลียนแบบไอเสียที่สร้างขึ้นมาโดยห้องเผาไหม้อีกตัวหนึ่ง อย่างไรก็ตามการทำให้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงด้วยรูปแบบที่มีห้องเผาไหม้สองห้องมีพื้นฐานของการใช้เชื้อเพลิงและปริมาตรการไหลที่เท่ากันกับสภาวะดั้งเดิมที่ต้องทำการเปรียบเทียบ และการใช้รูปร่างเรขาคณิตเพื่อการนำไอเสียไปยังห้องเผาไหม้มิได้ทำให้ลักษณะของการสันตะเทือนหลักเปลี่ยนแปลง โดยการสันตะเทือนยังคงขึ้นอยู่กับแกนหลักของห้องเผาไหม้อยู่
3. การใช้การหมุนวนของส่วนผสมทำให้การสันตะเทือนมีขนาดรุนแรงมากขึ้นเนื่องจากทำให้อุณหภูมิในบริเวณที่เปลวไฟเสถียรตัวสูงขึ้นและทำให้เปลวไฟเสถียรตัวใกล้กับคอคอดหรือต้นทางของห้องเผาไหม้มากขึ้น นอกจากนั้นการใช้เทคนิคการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ทำให้การสันตะเทือนลดลงดังในการศึกษาที่ผ่านมาทั้งนี้เนื่องจากทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่บริเวณ Primary zone มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและปฏิกิริยาในการจับตัวระหว่างอะตอมคาร์บอนกับออกซิเจนเกิดโดยรวดเร็วขึ้น เป็นเหตุผลที่สำคัญที่ชี้ให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับอะตอมของคาร์บอนเป็นตัวแปรที่สำคัญของการสันตะเทือน และการใช้เทคนิค EGR ย่อมจะทำให้เกิดผลที่แตกต่างต่อการสันตะเทือน
4. การใช้ EGR สามารถลดการสันตะเทือนในห้องเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการลดการสันตะเทือนจะสูงขึ้นหากใช้ไอเสียที่ผลิตจากส่วนผสมที่บางลง ซึ่งภาวะที่ผลิตไอเสียจาก ϕ ประมาณ 0.8 และการใช้สัดส่วนปริมาตรไอเสียต่อปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 0.5 สามารถลดการสันตะเทือนได้ถึง 3 เท่าตัว โดยผลการวัดองค์ประกอบของก๊าซที่มีคาร์บอนแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนที่หลงเหลือใน Primary zone ลดลงและน่าจะทำให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวลดลงด้วยซึ่งต้องการการวัดผลเชิงอุณหภูมิเพิ่มเติมในอนาคต

5. โดยปกติก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ผลิตจากการเผาไหม้ในก๊าซเทอร์ไบน์จะแปรผกผันกับขนาดของการสันสะท้อนเนื่องจากการสันสะท้อนจะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นการสันสะท้อนที่มีขนาดลดลงโดยการใช้เทคนิค EGR จะทำให้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงโดย EGR จะต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิจากการสันสะท้อนที่รุนแรงที่สุดก่อนมีการใช้ EGR เพราะเทคนิค EGR ที่ใช้ลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้ในกรณีที่ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยการสันสะท้อนจากความดันที่เด่นชัด หรือมักใช้ในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งมีการสันสะท้อนต่ำ
6. การศึกษานี้ได้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่อเทคนิคที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์รูปแบบที่ใช้การหมุนวนส่วนผสม(Swirl) ซึ่งเป็นรูปแบบของห้องเผาไหม้ที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันและทันสมัย และสามารถลดการสันสะท้อนได้จริงทั้งๆที่มีข้อจำกัดจากการกระจายความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงตลอดในห้องเผาไหม้และความหน่วงจากระดับความดันที่สูงด้วย อย่างไรก็ตามก็ตีเหตุผลของการลดลงของการสันสะท้อนสันนิษฐานว่าเป็นผลที่ต่อเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำลงกับปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ปริมาณคาร์บอนลดลง ข้อสรุปที่ชัดเจนอย่างสมบูรณ์ยังต้องการการใช้เทคนิคการวัดขั้นสูงเช่น LDV ซึ่งให้รายละเอียดของค่า rms ของอุณหภูมิและปริมาณโมเลกุลอิสระที่เป็นองค์ประกอบของคาร์บอนอาทิ CH ในฟังก์ชันของเวลา

6. เอกสารอ้างอิง

1. รุ่งเรือง พิทยศิริ (2541), "การควบคุมการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์", เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12, จัดโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. รุ่งเรือง พิทยศิริและมติมา อริยะชัยพาณิชย์ (2542), "แนวทางการลดการสันสะท้อนและออกไซด์ของไนโตรเจนในห้องเผาไหม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตอนที่ I และ II", เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, จัดโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. 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
4. Bhidayasiri, R. (2001), "Oscillations in Ducted Swirl-Stabilised Flames", Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, May 29 - June 1, New Orleans, Louisiana

5. Bhidayasiri, R. (1998), "Control of Combustion", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London
6. 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
7. Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1997), "Control of Combustion and NOx 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
8. 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
9. Brancewell, R.N. (1965), "The Fourier Transform and its Application", McGraw-Hill
10. Breen, B.P. (1972), "Emissions from Continuous Combustion Systems", Plenum Press, pp. 325
11. 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
12. 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
13. 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
14. Fernandes, E.C. and Heitor, M.V. (1990), "On the Noise Characteristics of Confined Swirl Combustor", ASME Winter Annual Meeting, Texas
15. Gupta, A.K., Ramavajjala, M.S. and Chomiak, J. (1991), "Burner Geometry Effects on Combustion and NOx Emission Characteristics Using a Variable Geometry Swirl Combustor", Journal of Propulsion and Power, Vol. 7, No. 4
16. 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

17. 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
18. 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.
19. 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
20. McManus, K.R., Vandsbygger, U. and Bowman, C.T. (1990), **"Combustor Performance Enhancement Through Direct Shear layer Excitation"**, *Combustion and Flame*, Vol. 82, pp. 75-92
21. 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
22. 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
23. Putnam, A.A. (1971), **"Combustion-Driven Oscillations in Industry"**, American Elsevier Publisher
24. Sivasegaram, S., Thompson, B.E. and Whitelaw, J.H. (1989), **"Acoustic Characterization Relevant to Gas Turbine Augmentors"**, *Journal of Propulsion*, Vol. 5, No. 1
25. 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
26. 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
27. Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1996), **"Control of Flame and Emissions by Oscillation"**, *Proceedings of the 9th ONR Propulsion Meeting*, pp. 272-285