

แนวทางการลดการสั่นสะเทือนและออกไซด์ของไนโตรเจน ในห้องเผาไหม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตอนที่ 1

Approaches to Reduce Oscillations and NOx in Model Square-sectional Combustor [Part 1]

รุ่งเรือง พิทยศิริ และ มติมา อริยะชัยพาณิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ศาลายา นครปฐม 73170

บทคัดย่อ (Abstract)

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการสั่นสะเทือนทางธรรมชาติในห้องเผาไหม้อุตสาหกรรมขนาดจำลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ส่วนผสมปริมาตรระหว่างก๊าซไพรเพนกับอากาศ ในห้องเผาไหม้พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในการศึกษาวิจัยได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือนโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ ณ อัตราส่วนของเชื้อเพลิง(Equivalent Ratio)ระหว่าง 0.7-1.1 และศึกษาอิทธิพลจากการป้อนการสั่นสะเทือนจากภายนอกต่อการสั่นสะเทือนทางธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วยังทำการศึกษาลักษณะของตำแหน่งการป้อนการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติ และผลต่อปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะเผาไหม้

จากการพิจารณาผลค่าความความดันผันแปรภายในห้องเผาไหม้ และค่าความเข้มข้นของการเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH ที่เกิดขึ้นขณะเผาไหม้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันและการปรับเปลี่ยนความยาวของท่อไอเสียมีผลต่อขนาดและความถี่ของการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติ และการป้อนการสั่นสะเทือนจากภายนอกที่มีความถี่ที่เหมาะสมสามารถทำให้การกระจายตัวของความร้อนสม่ำเสมอขึ้น ลดขนาดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติได้ถึงกว่า 60 % และยังสามารถลดปริมาณก๊าซพิษไนโตรเจนไดออกไซด์ได้สูงสุดถึง 43% ด้วย

1. บทนำ

พัฒนาการและเทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้ได้รับความสนใจมากขึ้นทุกขณะเนื่องจากปัจจุบันการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมก่อให้เกิดการตื่นตัวต่อการประหยัดเชื้อเพลิงและความต้องการผลิตห้องเผาไหม้ที่มีขนาดกระทัดรัดและเชื่อถือคุณภาพการเผาไหม้ที่สูง อีกทั้งกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมกำลังเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจและตระหนักเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงและพัฒนาการผลิตพลังงานจึงมุ่งเน้นที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยลดปัญหามลพิษจากก๊าซเรือนกระจกได้ไปในตัว แต่การเผาไหม้

ลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นพร้อมกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงจะมีความทนทานของอุปกรณ์รวมทั้งอาจกระตุ้นการสั่นสะเทือนภายในห้องเผาไหม้ตามธรรมชาติ (Natural-Occurring Oscillations หรือ Combustion Oscillations) ซึ่งสามารถทำให้ห้องเผาไหม้เสียหายได้ นอกจากนั้นการสั่นสะเทือนตามธรรมชาียังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในระหว่างการเผาไหม้ได้สูง การสั่นสะเทือนตามธรรมชาติจึงเป็นคุณสมบัติประการสำคัญที่นักวิจัยทั่วโลกพยายามกำจัดมิให้เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อุตสาหกรรม โดยเฉพาะห้องเผาไหม้แบบปิด เช่นห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ จากการศึกษาถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้ที่ผ่านมาพบว่า การสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้จริงมักจะเกิดขึ้นในภาวะที่มีส่วนผสมบางมาก (Ultra-lean mixture) อันเป็นภาวะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดเชื้อเพลิง แต่การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จำลองกลับมักมีความเด่นชัดกว่าในภาวะที่มีส่วนผสมหนา (Rich mixture) ความพยายามที่จะทำให้การจำลองการสั่นสะเทือนในห้องปฏิบัติการสอดคล้องกับภาวะที่เกิดขึ้นจริงจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยของจลศาสตร์ของไหลซึ่งทำให้ต้องมีการศึกษาและค้นคว้ามากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ข้อสรุปจากการศึกษาสะท้อนปัญหาจริงในทางปฏิบัติที่แม่นยำ

นอกจากนั้นภาวะที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและมีการสั่นสะเทือนระหว่างการเผาไหม้นี้ยังอาจส่งเสริมให้เกิดการผลิตก๊าซมลพิษบางชนิดที่เป็นอันตรายต่อระบบหายใจและโครงสร้างสิ่งก่อสร้างทั่วไปซึ่งปริมาณหนึ่งที่สูงและเด่นชัดและเป็นที่รู้จักคือ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้เกิดความตื่นตัวที่จะกำจัดหรือควบคุมปริมาณนี้โดยกำหนดให้เป็นเป้าหมายหลักสำคัญประการหนึ่งในอุตสาหกรรมและในที่สุดเป็นมาตรฐานที่มีแนวโน้มที่รัดกุมมากขึ้นเรื่อยๆ ในทางอุดมคติแล้วการควบคุมการเผาไหม้จึงควรทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงในขณะที่มีความดันทางความร้อนต่ำ ปราศจากการเหนียวหนืดให้เกิดการสั่นสะเทือน รวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนที่สูงและเกิดมลพิษโดยรวมทุกชนิดต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามหลายปัจจัยที่

อำนวยความสะดวกที่ติดตั้งต้นมักมีความเหลื่อมล้ำและหลายกรณีที่ขัดแย้งกัน ในทางปฏิบัติจึงมักได้คุณสมบัติบางอย่าง แต่ขาดคุณสมบัติบางอย่าง การศึกษาในเบื้องต้นจึงเป็นในลักษณะหาทางเลือกเพื่อผลที่ออกมาเฉลี่ยระหว่างผลดีกับผลเสียและในขั้นสูงขึ้นไปจะคิดค้นปัจจัยอิสระเพื่อลดผลเสียที่เกิดขึ้น

สำหรับในการศึกษานี้มุ่งเน้นที่จะกำจัดและควบคุมภาวะไม่คงตัวในห้องเผาไหม้หรือการสันเทือนตามธรรมชาติซึ่งกำเนิดมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันผันแปรกับอัตราการเผาไหม้หรือความเข้มข้นทางความร้อนโดยพบว่าเมื่อจังหวะของการเผาไหม้อยู่ในเฟสเดียวกันกับจังหวะของความดันของของไหล การสันเทือนตามธรรมชาติจะถูกเหนี่ยวนำและมีเสียงดังเกิดขึ้นในระบบ กลไกการเกิดการสันเทือนนี้อยู่บนหลักการของทฤษฎี Rayleigh Criteria ซึ่งใช้เป็นเหตุผลหลักในการประยุกต์เทคนิคต่างๆ เพื่อการควบคุมโดยที่ต้องยึดให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงเป็นประการแรกเนื่องจากเป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญที่สุด การควบคุมจึงแบ่งออกเป็นแนวทางกว้างๆ สองแนวทางคือ การควบคุมการเผาไหม้ทางกายภาพโดยการควบคุมผ่านการปรับปรุงส่วนผสมเชื้อเพลิงและลักษณะรูปทรงของห้องเผาไหม้ซึ่งมักเรียกกันว่า พาสซีฟคอนโทรล (Passive Control) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย เช่น การปรับลักษณะเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ การใช้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงพรีมิกซ์ (Pre-mixture) ก่อนที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ หรือการใช้อากาศหมุนวน (Swirl) ขณะเข้าห้องเผาไหม้เพื่อให้ส่วนผสมผสมกันได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มขอบเขตของตำแหน่งเสถียรภาพของเปลวไฟหรือบริเวณการลุกติดไฟ ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงหรือการพัฒนาการไหลของส่วนผสมเชื้อเพลิงให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยอาจใช้ตัวกั้น หรือการใช้ชั้นเสริม หรือการไหลผ่านนอสเซลล์บริเวณปลายทางออก

นอกจากนั้นการใช้เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่มีการศึกษาและนำมาใช้แล้วนั้นและถือเป็นปัจจัยอิสระที่เสริมเพื่อลดผลเสียจากการเผาไหม้เฉพาะอย่าง เช่น การนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ (Exhaust Gas Recirculation) หรือการเผาไหม้เป็นขั้นลำดับ (Staging combustion) และวิธีการที่เป็นที่สนใจรวมไปถึงการใช้การสันเทือนที่สร้างขึ้น (Imposed oscillation) และการปรับการเผาไหม้ให้เกิดสลับระหว่างส่วนผสมหนา กับบาง (Rich-Burn, Quick-Quench, Lean-Burn; RQL)

การควบคุมอีกแนวทางหนึ่งเป็นการใช้หลักของ Rayleigh criteria ที่จะลดผลเสียจากการเผาไหม้ซึ่งโดยมากจะอาศัยการป้อนพลังงานเข้าสู่การเผาไหม้ที่มีเฟสตรงกันข้ามกับพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือที่เราเรียกว่าแอคทีฟคอนโทรล (Active Control) ซึ่งจะต้องมีหน่วยควบคุมซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณที่ออกเพื่อส่งให้อุปกรณ์ป้อนพลังงานเข้าสู่ระบบตามต้องการและสำหรับการควบคุมการสัน

เทือนตามธรรมชาตินั้นจะใช้การสันเทือนที่สร้างขึ้นเป็นพลังงานที่ป้อนเข้าไป อย่างไรก็ตามการใช้แอคทีฟคอนโทรลมักจะประสบกับความยุ่งยากเนื่องจากประสิทธิภาพที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการมักจะลดลงเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับห้องเผาไหม้ขนาดจริงนั่นคือปัญหาที่พบในการขยายสเกลของเครื่องมือ ความยุ่งยากยังเกิดขึ้นจากเครื่องมือที่มีขีดจำกัดในการทำงานและไม่เหมาะสมกับภาคอุตสาหกรรมรวมทั้งความล่าช้าระหว่างเฟสของพลังงานที่ป้อนเข้าไปกับพลังงานที่ออกจากการเผาไหม้มักทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพต่ำ

โดยทั่วไปการควบคุมแบบพาสซีฟนี้มีความแน่นอนและแม่นยำมากกว่าการควบคุมแบบแอคทีฟ และลดความเสี่ยงและปัญหายุ่งยากของอุปกรณ์ชุดควบคุมถึงแม้ว่าบางทีการควบคุมแบบนี้ประสิทธิภาพจะด้อยกว่าในการทดสอบในห้องปฏิบัติการก็ตาม ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงยึดถือการควบคุมแบบพาสซีฟเป็นหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษามีวัตถุประสงค์ที่จะหาความเข้าใจโดยละเอียดของการสันเทือนตามธรรมชาติ การศึกษาจึงยึดถือผลจากโครงสร้างทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ ผลของการกระจายตัวของความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้โดยตรง และอิทธิพลของการสันเทือนที่ถูกจำลองขึ้นต่อการสันเทือนตามธรรมชาติ ซึ่งถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยปราศจากการอาศัยสัญญาณป้อนกลับ (Feedback signal) เหมือนในกรณีของการควบคุมแบบแอคทีฟที่ได้ดำเนินการแล้วในอดีตในห้องเผาไหม้จำลองอันเดียวกันโดยใช้ลำโพงเป็นอุปกรณ์ป้อนพลังงานเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Ochi et al., 1995)

ในการศึกษานี้ครั้งนี้ได้พิจารณาการเผาไหม้ภายใต้การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟโดยใช้ขั้นแบบขยายทันที (Suddenly Expansion) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ความถี่และเฟสของความดันผันแปร, ความเข้มข้นของการเรืองแสงของโมเลกุล OH รวมไปถึงปริมาณก๊าซในไครเจนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณของเชื้อเพลิง การปรับขนาดความยาวของห้องเผาไหม้ รวมทั้งการป้อนสัญญาณความถี่ที่ความถี่ต่างๆ ที่แหล่งจ่ายเชื้อเพลิง โดยนำเสนอเป็นตอนๆ ที่มีลำดับตั้งแต่โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิตและการออกแบบห้องเผาไหม้, อุปกรณ์และเทคนิคการวัด, ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา, ผลการทดลอง, สรุปและข้อเสนอแนะต่องานในอนาคต

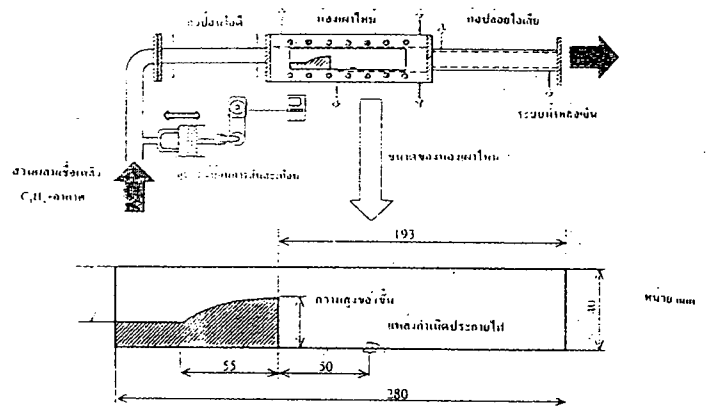
2. โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิต และการออกแบบห้องเผาไหม้

ลักษณะทางเรขาคณิตและโครงสร้างของห้องเผาไหม้ถือว่ามีความสำคัญต่อการเผาไหม้ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าปัจจัยอื่นๆ และเพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพและห้องเผาไหม้มีขนาดกระทัดรัด การออกแบบจึงยึดพื้นฐานของ

ปัจจัยที่ทำให้เกิดอัตราการเผาไหม้ที่สูงได้ จากรูปที่ 1 แสดงภาพโครงสร้างห้องเผาไหม้ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือส่วนป้อนไอดีซึ่งมีความยาว 400, 550, 800, 950 และ 1200 มม. ทำหน้าที่นำส่วนผสมเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยที่ภายในบรรจุแผงรังผึ้ง (Honey Comb) เพื่อจัดการหมุนวนของส่วนผสมและบังคับให้การไหลเป็นเส้นตรง ส่วนการเผาไหม้หลักซึ่งเป็นโครงเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่หน้าตัด 40 มม. X 40 มม. และมีความยาว 280 มม. โดยที่ด้านข้างจะมีหน้าต่างกระจกควอตซ์ (Quartz Windows) เพื่อใช้ในการสังเกตพฤติกรรมของการเผาไหม้และการวัดความเข้มแสงขณะเกิดการเผาไหม้ และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนปล่องไอเสียซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้ 5 ขนาดคือ 450, 600, 750, 900 และ 1050 มม. ตามสภาวะที่ต้องการศึกษา

สำหรับผนังของห้องเผาไหม้หลักและส่วนปล่องไอเสียได้ถูกออกแบบให้เป็นสองชั้นที่มีระยะห่างเท่ากับ 10 มม. เพื่อเป็นระบบหล่อเย็นโดยใช้น้ำหมุนเวียนจากภายนอก ส่วนการสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟใช้ขั้นหรือ Step แบบขยายทันทีด้านเดียว (One-side sudden expansion) ที่มีความสูงสองขนาดคือ 24 และ 36 มม. ทำให้มีอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio) เท่ากับ 0.6 และ 0.9 เพื่อให้เกิดโซนความเร็วต่ำและมีการหมุนวนของส่วนผสม (Recirculation) เป็นจุดกำเนิดเสถียรภาพของเปลวไฟดังรายละเอียดในรูปที่ 1 นอกจากนั้น ภายในห้องเผาไหม้มีระบบจุดไฟด้วยหัวเทียน (Spark plug) เพื่อช่วยติดไฟในระยะแรกของการเผาไหม้หลังจากนั้นระบบจะสามารถติดไฟได้ด้วยตัวมันเองโดยอาศัยหลักสมดุลระหว่างความร้อนและส่วนผสม

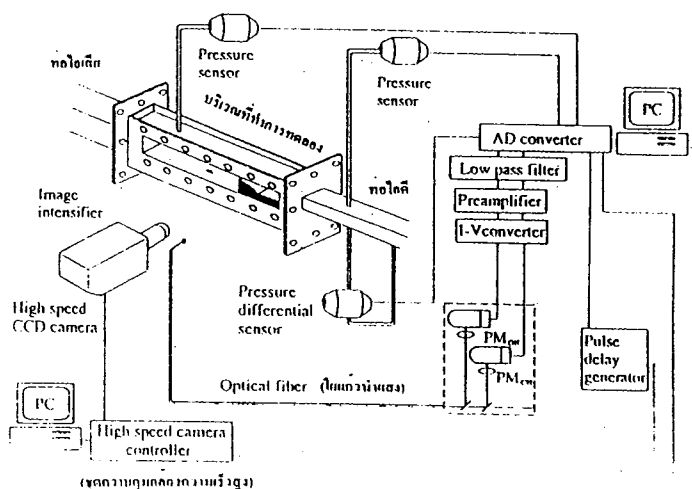
อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดลองยังรวมไปถึงเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนของส่วนผสมเชื้อเพลิงโปรเพนกับอากาศ (HITACHI, HFC-VWS) ซึ่งอาศัยการทำงานของลูกสูบหนึ่งลูกที่ถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ทำให้เกิดกำลังอัดสูงสุดที่ 5 kgf/cm^2 และมีความสามารถในการอัดอากาศได้ในปริมาณ 25 ลิตรต่อนาทีระหว่างที่การสั่นสะเทือนถูกกำหนดให้มีขนาดจากการเคลื่อนตัวของลูกสูบ (Stroke) คงที่ ส่วนความถี่ที่ป้อนนั้นสามารถกำหนดได้โดยเลือกความถี่จากปุ่มปรับความถี่บนเครื่องโดยมีช่วงความถี่ที่สามารถปรับได้จาก 0 ถึง 130 Hz การสั่นสะเทือนที่กำเนิดด้วยเครื่องมีนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาถึงอิทธิพลของการป้อนการสั่นสะเทือนต่อการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติที่ระบุไว้ในรายงานฉบับนี้



รูปที่ 1 รายละเอียดของห้องเผาไหม้

3. เทคนิคการวัด และอุปกรณ์ตรวจวัด

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไหลด้วยเทคนิคหลายชนิดเพื่อที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของการเผาไหม้และผลสืบเนื่องโดยมีรายละเอียดของเทคนิคการวัดและอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ตรวจวัด

ค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าแปรปรวนภายในห้องเผาไหม้ได้ถูกวัดในสภาวะที่ไม่มีการเผาไหม้ (Isothermal flow) ทั้งที่ปราศจากการป้อนการสันตะเหือนและที่มีการป้อนการสันตะเหือนต่อส่วนผสมเชื้อเพลิง ณ ตำแหน่ง 50 มม. ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งค่าองค์ประกอบของความเร็วถูกวัดโดยใช้ชุดขดลวดร้อน (Hot-wire Anemometer) โดยอาศัยหลักความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ว้าของไหลที่ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนจากขดลวดร้อนที่สูงย่อมมีความเร็วสูงและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกัน องค์ประกอบของความเร็วที่ได้ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของของไหลในระหว่างเกิดการเผาไหม้ได้

ความดันผันแปร (Pressure Fluctuation) ถูกวัดโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Transducer) ของบริษัท NAGANO KEIKI SEISAKUSHO รุ่น KH15 ที่มีช่วงของการรับสัญญาณ (Range) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 กิโลปาสกาล โดยระบบเซ็นเซอร์จะรับไฟฟ้ากระแสตรงเข้า (DC Power input) ที่มีศักย์ 24 โวลต์และส่งสัญญาณออกกระแสตรง (DC Output signal) ด้วยศักย์ระหว่าง 1 ถึง 5 โวลต์ซึ่งถูกแปลงสภาพสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (High Speed A/D Converter Model EC-2392B DMA) และนำไปวิเคราะห์หสเปกตรัมต่อไป สำหรับตำแหน่งที่วัดความดันมีสองบริเวณคือ บริเวณห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง 225 มม.จากปลายด้านต้น (Upstream end) ของห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่ง 50 มม.ก่อนเข้าห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่คาดว่าจะมีความดันที่แปรผันสูงที่สุดหรือเกิดแอนติโนดความดันขึ้น

สำหรับการพิจารณาคุณภาพของการเผาไหม้ ได้ทำการวัดอุณหภูมิของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้บริเวณปลายสุดของส่วนปล่อยไอเสียเนื่องจากการเผาไหม้ในบริเวณนี้น่าจะสมบูรณ์โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่เป็นโลหะแพลทินัม (Pt) และโลหะผสมระหว่างแพลทินัมกับโรเดียม (Pt/Rh, 13%) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 ไมโครเมตร และ 25 ไมโครเมตร โดยทำการเลือกขนาดลวดให้เหมาะสมกับสภาวะการไหลเพื่อให้สามารถวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและลวดไม่ขาดในระหว่างทำการวัดและใช้อุณหภูมิจากตารางค่าอ้างอิงของบริษัท Yamari Industries Ltd. ที่ได้ทำการชดเชยการสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนจากลวด (Loss compensation) แล้ว

การสังเกตลักษณะกายภาพของการเผาไหม้ ที่ในความเป็นจริงแล้วมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและเคลื่อนที่เป็นจังหวะหรือเป็นความถี่ การสังเกตจึงมีความจำเป็นต้องทำในระยะเวลาที่สั้นและนอกเหนือขีดความสามารถของสายตาและเป็นฟังก์ชันของเวลา การวิจัยจึงทำการสังเกตโดยใช้ภาพถ่ายเปลวไฟ (Flame Image) เพื่อศึกษาวัฏจักรของการเคลื่อนตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเปลวไฟขณะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างเป็นระบบโดยเฉพาะในระหว่างเกิดการสันตะเหือนตามธรรมชาติ โดยใช้อุปกรณ์กล้องถ่าย

ภาพที่มีความเร็วสูงที่เรียกว่า High Speed CCD Camera (KODAK EKTAPRO HS Motion Analyzer Model 4540) โดยมีความเร็วของการถ่ายภาพ 1/512 และ 1/1024 รูปต่อวินาทีและภาพที่ถูกถ่ายถูกบันทึกลงในระบบความจำของคอมพิวเตอร์และถูกนำมาฉายอีกครั้งที่อัตราความเร็วช้าลงประมาณ 30 ภาพต่อหนึ่งวินาที อุปกรณ์ดังกล่าวจึงทำให้สามารถเห็นภาพเคลื่อนไหวของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ได้ในสภาวะต่างๆพร้อมกับสามารถวัดคุณสมบัติอื่นๆได้ในเวลาเดียวกันโดยอาศัยตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ Pulse Generator (Stanford Research Systems, Inc Model DG535) ส่งสัญญาณการทำงานไปยังอุปกรณ์อื่นๆในขณะที่กล้องถ่ายภาพได้บันทึกภาพไว้

เป็นที่ทราบกันดีว่านอกจากการสันตะเหือนของห้องเผาไหม้สามารถวัดได้ด้วยความดันผันแปรซึ่งเป็นที่ยอมรับแล้ว ยังสามารถวัดได้จากความเข้มข้นของการเรืองแสงโมเลกุลอิสระที่ได้จากการเผาไหม้เพราะได้พิสูจน์แล้วว่า การเผาไหม้ที่มีการสันตะเหือนสูงขึ้นจะมีโครงสร้างของของไหลที่ใหญ่และหนาขึ้นและมีการเรืองแสงที่เข้มข้นมากขึ้นด้วย ซึ่งความเข้มจากการเรืองแสงนี้จะขึ้นอยู่กับกลุ่มโมเลกุลอิสระที่มักเกิดขึ้นเด่นชัดในระหว่างที่มีการเผาไหม้ ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มโมเลกุล OH, C_2 และ CH สำหรับการศึกษานี้ก็ได้นำการวัดการเรืองแสงของกลุ่มโมเลกุลอิสระ นอกจากที่จะใช้เป็นเกณฑ์ชี้ขนาดของการสันตะเหือนแล้ว ยังใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของของไหลกับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้อีกด้วยเพราะในความเป็นจริงการเผาไหม้ที่มีความเข้มสูงสุดไม่จำเป็นต้องอยู่ในเฟสเดียวกับความดันที่มีค่าสูงสุด สำหรับเชื้อเพลิงและสภาวะการไหลที่ศึกษานี้พบว่าความเข้มของการเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH มีความเด่นชัดเจนและสะดวกต่อการวัดจึงเป็นปริมาณที่ถูกนำมาศึกษาโดยใช้อุปกรณ์ออปติคอลไฟเบอร์ (Optical fiber) รับแสงจากการเผาไหม้และใช้เลเซอร์จากธาตุฮีเลียม (He) เป็นตัวรับสัญญาณการเรืองแสงและนำสัญญาณที่ได้ผ่านโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photo multiplier) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์เพื่อแยกเฉพาะการเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH และ CH ในห้องเผาไหม้และสัญญาณที่ได้ผ่านโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photo Multiplier) ถูกนำไปแปลงจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D Converter) และถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงสเปกตรัมของความถี่

การวัดปริมาณความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากการเผาไหม้ โดยวัดในบริเวณปลายสุดของส่วนปล่อยไอเสียเนื่องจากการออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดจากปฏิกิริยาความร้อนเป็นหลักโดยมักก่อตัวขึ้นในบริเวณที่มีความร้อนสูงสุดคือบริเวณที่เปลวไฟเสถียรและความเข้มข้นจะถูกสะสมเรื่อยมาจึงทำให้ความเข้มข้นมีค่าสูงสุดที่ปลายสุด สำหรับในการศึกษานี้ได้ใช้ปริมาณ

ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) แทนปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) เนื่องจากในภาวะการไหลที่มีส่วนผสมบางและเป็นการเผาไหม้แบบปิดเช่นในการศึกษานี้ NO₂ จะมีปริมาณน้อยทำให้ NO มีสัดส่วนมาก การวัดจึงใช้อุปกรณ์ตรวจวัด NO มิเตอร์แบบพกพา (NO/O₂ Gas Analyser BCL-611A.511) โดยดูดเก็บก๊าซร้อนผ่านท่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มม. ยาว 1 ฟุตและต่อท่ออย่างขนาดเดียวกันยาวประมาณ 2 ฟุตโดยมีการอุ่นความร้อนมิให้ NO แปลงสภาพ และก่อนทำการวัดทุกครั้งจะทำการปรับตั้ง (Calibration) โดยใช้ก๊าซ NO มาตรฐาน (Span gas) ที่มีความเที่ยงตรงในส่วนผสมไม่น้อยกว่า 0.5 % เป็นค่าอ้างอิง

4. ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาค้างนี้ได้กำหนดตัวแปรต่างๆตามจุดประสงค์หลักของการทดลอง โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ตัวแปรทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ ตัวแปรสภาวะการไหลและตัวแปรความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ป้อนเข้ากับท่อไอเสียโดยที่มีขนาด(Amplitude)คงที่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตัวแปรทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้

โดยลักษณะของห้องเผาไหม้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดท่อไอเสีย(Inlet Pipe)ได้ 5 ขนาดความยาว คือ ความยาว 450, 550, 800, 950 และ 1200 มม. และเช่นเดียวกันกับท่อไอเสีย(Exhaust pipe) มี 5 ขนาดความยาวที่ปรับเปลี่ยนได้คือ 450, 600, 750, 900, 1050 มม. ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นโดยทางทฤษฎีแล้วจะมีผลต่อการสั่นสะเทือนทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น เนื่องจากความยาวห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปนั้นทำให้ความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปโดยจะส่งผลให้ตำแหน่งแอนติโนดเปลี่ยนไปหรือพลังงานของคลื่นลดลงได้นอกจากนั้นความสูงของชั้น (Step) ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟก็เป็นตัวแปรในการศึกษาด้วย ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้ชั้นอยู่สองระดับความสูงคือ ชั้นต่ำ (24 มม.) และชั้นสูง (36 มม.) โดยความสูงของชั้นที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดของโซนการหมุนวน (Recirculation Zone) ซึ่งมีผลต่อปริมาตรที่มีความเร็วเป็นศูนย์ที่จำเป็นต่อการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของชั้นอาจทำให้รูปแบบของคลื่น(Wave Form) ของการสั่นสะเทือนเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio) ทำให้ตำแหน่งแอนติโนดและโนดของคลื่นเปลี่ยนไป และขนาดของการสั่นสะเทือนลดลงได้

ตัวแปรความเข้มข้นของส่วนผสมเชื้อเพลิง

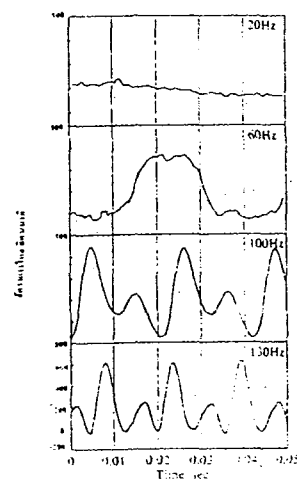
ความเข้มข้นของส่วนผสมของเชื้อเพลิง (Equivalence Ratio; ϕ) ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง

0.7-1.1 การที่เลือกช่วงนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่เปลวไฟมีเสถียรภาพและสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ต้องการศึกษาได้ การเพิ่มความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในช่วงส่วนผสมบาง ($\phi < 1.0$) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เร็วขึ้นและมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นและโอกาสที่เฟสของความร้อนเสริมกับเฟสของความดันแปรปรวนจะสูงขึ้นและนำไปสู่การสั่นสะเทือนสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของเชื้อเพลิงทำนั้นได้โดยเพิ่มอัตราการไหลของไพรเพนในขณะที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 200 ลิตร/นาที่หรือเมื่อคำนวณเป็นค่า Reynolds number (Re) ในพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็น 55,000 ที่แสดงให้เห็นว่าการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) สอดคล้องกับภาคปฏิบัติ

ตัวแปรความถี่ของการป้อนการสั่นสะเทือน

สภาวะต่างๆของการไหลเมื่อบังคับด้วยการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้น(Imposed Oscillations) จากความดันของลูกสูบที่แปรค่าระหว่างการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือน โดยมีความถี่ที่ป้อน 6 ค่าคือ 20, 40, 60, 80, 100, 130 Hz ส่วนการสั่นสะเทือนที่ป้อนจะมีค่าขนาด (Amplitude) คงที่เนื่องจากช่วงชัก (Stroke) คงที่ การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการแปรค่าความดันและความเร็วซึ่งได้ถูกวัดและแสดงอยู่ในรูปที่ 3 ที่แสดงกราฟความเร็วแปรผันขณะปราศจากการเผาไหม้ ณ ความถี่ต่างๆ

ในการศึกษาและวิเคราะห์การเผาไหม้ได้แบ่งการวัดผลการทดลองเป็นการวัดศึกษาพฤติกรรมของการไหลของเชื้อเพลิงขณะที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Non-reacting Flow) เช่น อัตราการไหลหรือความเร็วแปรปรวน(Velocity fluctuation) ขณะบังคับด้วยการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ศึกษาของการแปรค่าโมเมนต์ของของไหลต่อคุณภาพของส่วนผสมโดยรวม



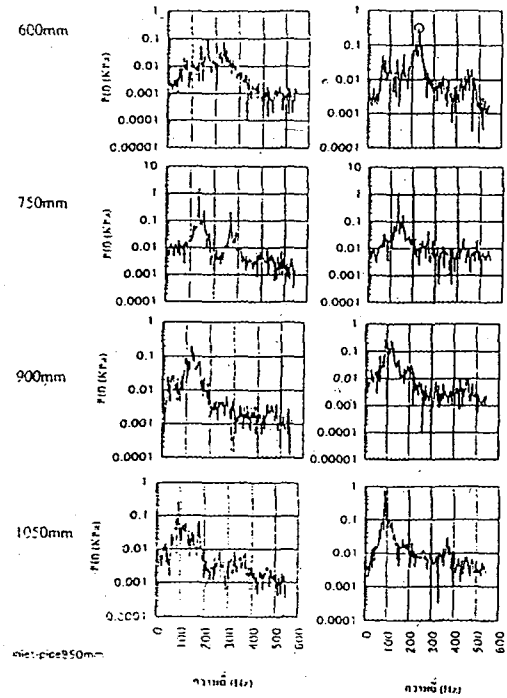
รูปที่ 3 แสดงอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนการสั่นสะเทือน ณ ความถี่ต่างๆ

5. ผลการทดลอง

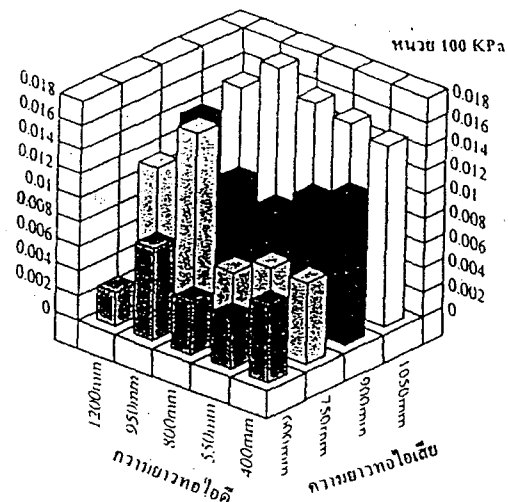
พฤติกรรมการเผาไหม้ตามธรรมชาติ (ปราศจากการป้อนการสั่นสะเทือน)

ผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของห้องเผาไหม้ที่ใช้ขนาด 36 มม. โดยทำการศึกษาที่ $\Phi=1.0$ คงที่ในสภาวะที่ปราศจากการป้อนการสั่นสะเทือนนั้น พบว่าลักษณะการสั่นสะเทือนมีลักษณะเด่น(มีพลังงานสูงสุด)ที่ความถี่เฉพาะ (Single frequency domination) และจากการเปลี่ยนความยาวของท่อไอเสียทำให้ลักษณะการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติเปลี่ยนไป จากผลการทดลองในรูปที่ 4 แสดงผลการทดลองที่เป็นสเปกตรัมของคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้ความยาวของท่อป้อนไอติดังที่เท่ากับ 950 มม. โดยที่ความยาวของท่อไอเสียที่สูงขึ้น ทำให้ความถี่หลัก (Dominant frequency) ลดลงและความถี่นั้นสอดคล้องกับความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นโดยที่มีการประมาณว่าระยะทางจากตำแหน่งปลายท่อเข้าถึงตำแหน่งที่เปลวไฟมีความเข้มของความถี่สูงสุดเท่ากับ 3 ใน 4 ของความยาวคลื่น (Three quarter-wave length) ซึ่งจะทำได้ตำแหน่งที่เปลวไฟมีความเข้มแสงสูงสุดจะเป็นแอนติโนดของความดันในทุกกรณี ดังเช่นที่ความยาว 600 มม. ความถี่ของการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้เท่ากับ 240 Hz และเมื่อความยาวเพิ่มเป็น 1050 มม. ทำให้ความถี่หลักลดลงต่อเนื่องจนเท่ากับ 95Hz ความถี่ที่อ่านได้นี้เป็นค่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นในการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติซึ่งมีกำลังของการสั่นสะเทือนสูงสุดและใกล้เคียงกับขนาดของการสั่นสะเทือนที่รวมจากทุกค่าความถี่ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเลือกสนใจที่พลังงาน ณ ค่าความถี่หลัก และจากการเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนที่วัด ณ ท่อไอเสีย และ ณ ห้องเผาไหม้ ความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันมากและตามหลักที่ว่าตำแหน่ง ณ ห้องเผาไหม้จะสะท้อนภาพคลื่นที่เกิดจุดแอนติโนดอย่างชัดเจนและสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าเป้นจุดที่มีความเข้มแสงจากการเผาไหม้สูงสุด ในการวิเคราะห์จึงจะใช้ค่าจากการวัด ณ ห้องเผาไหม้เป็นหลัก

จากรูปที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยรากกำลังสองของความดันแปรผันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ความยาวท่อไอเสียและท่อไอเสียต่างๆขณะทำการเผาไหม้ที่สภาวะเดียวกันคือ $\Phi=1.0$ และปราศจากการป้อนการสั่นสะเทือน พบว่าการสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้ที่มีความยาวท่อไอเสียมากจะมีค่าเฉลี่ยความดันมาก ในการทดลองนี้ค่าสูงสุดเกิดที่ความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 1050 มม. เท่ากับ 1.7 kPa และในกรณีค่าความดันแปรผันเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนของการเผาไหม้ที่ความยาวท่อไอเสียสั้นมีค่าน้อยนั้น ก็เนื่องจากการเผาไหม้มีลักษณะเป็น



รูปที่ 4 แสดงความถี่ของการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติที่วัด ณ ท่อไอเสียซึ่งมีความยาว 950 มม. และ ณ ห้องเผาไหม้ ณ ขนาดความยาวท่อไอเสียต่างๆ



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (rms) ของความดันผันแปรที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

แบบเปิดมากขึ้นและโอกาสที่การเผาไหม้จะเกิดกำทอนกับความดันของของไหลลดลง จึงทำให้การสั่นสะเทือนลดลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อไอดี มิได้แสดงผลที่ชัดเจนในทางใดทางหนึ่งเนื่องจากผลของความยาวของท่อไอดีจะเด่นชัดเมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนถูกกำหนดด้วยความยาวท่อไอเสียเป็นหลักและในกรณีที่มีความยาวท่อไอดีสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของท่อไอเสียซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ตรงกันระหว่างความถี่ในส่วนท่อไอดีกับความถี่ในส่วนท่อไอเสียดังเช่นเคยพบในการทดลองของ Bhidayasiri et al. (1998) และ De Zilwa et al. (1998) แต่ในการทดลองนี้พบว่าความถี่ของการสั่นสะเทือนถูกกำหนดด้วยความยาวของทั้งสองท่อโดยมีท่อไอดีเป็นหลัก

นอกจากนี้แล้วยังพบว่าขนาดการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของส่วนผสมเชื้อเพลิง (ϕ) โดยผลการทดลองที่ความยาวท่อไอดีและไอเสียเท่ากับ 950 และ 1050 มม. แสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 2.0 kPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลง ϕ จาก 0.7 เป็น 1.1 ซึ่งเป็นไปตามกลไกที่ว่าความเข้มข้นของความร้อนที่สูงสุดย่อมทำให้การกำทอนกับความดันมีความเด่นและรุนแรงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง (References)

1. ดร.รุ่งเรือง พิทยศิริ (2541), "การควบคุมการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยประจำปี 2541 จัดโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1997a), "The Effect of Flow Boundary Conditions on the Stability of Quasi-Stabilised Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 123, pp. 185-205
3. Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1997b), "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
4. Bhidayasiri, R., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1997c), "Control of Combustion Oscillations in a Gas Turbine Combustor", *Proceedings of the Seventh Asian Congress of Fluid Mechanics*, pp. 107-109
5. 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
6. Bhidayasiri, R. (1998), "Control of Combustion", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London
7. Brancewell, R.N. (1965), "The Fourier Transform and its Application", McGraw-Hill
8. De Zilwa, S.R., Khezzar, L. and Whitelaw, J.H. (1998), "Plane Sudden-Expansion Flows", *Thermofluids Section, Dept. of Mech. Eng., Imperial College, Internal Report*
9. 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
10. Fernandes, E.C. and Heitor, M.V. (1990), "On the Noise Characteristics of Confined Swirl Combustor", *ASME Winter Annual Meeting, Texas*
11. 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
12. 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
13. Ochi, T., Katsuki, M., Mizutani, Y and Morinishi, Y (1995), "An Active Control of Acoustic Noise Generated by Combustion Oscillation", *Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Conference, ASME, Vol. 3, No. H0933C-1995*
14. 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
15. Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H. (1996), "Control of Flame and Emissions by Oscillation", *Proceedings of the 9th ONR Propulsion Meeting*, pp. 272-285