

แนวทางการลดการสั่นสะเทือนและออกไซด์ของไนโตรเจน ในห้องเผาไหม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตอนที่ 2

Approaches to Reduce Oscillations and NO_x in Model Square-sectional Combustor [Part 2]

รุ่งเรือง พิทยศิริ และ มติมา อริยะชัยพานิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

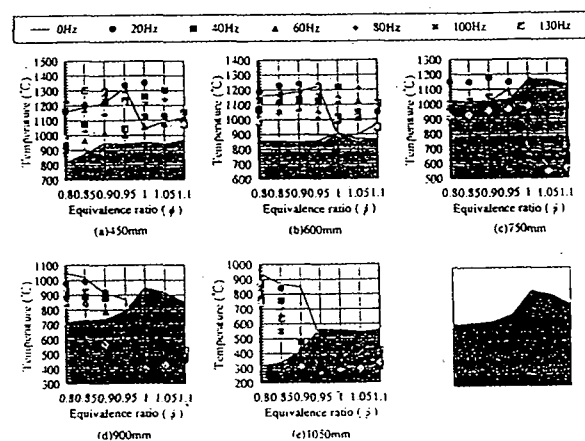
ศาลายา นครปฐม 73170

ผลจากการป้อนการสั่นสะเทือน

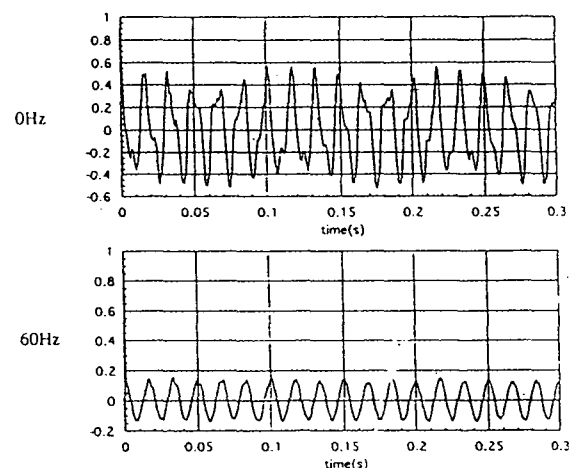
การทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการเผาไหม้ที่อัตราความเข้มข้นเชื้อเพลิง (ϕ) ตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.1 ระหว่างสภาวะที่ปราศจากการป้อนการสั่นสะเทือนและที่มีการป้อนการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 20, 40, 60, 80, 100, 130 Hz ที่ความยาวท่อไอเสียหลายขนาด

จากรูปที่ 6 แสดงผลของการป้อนการสั่นสะเทือนที่มีต่ออุณหภูมิของไอเสีย ที่บริเวณทางออกของท่อไอเสีย โดยเลือกทำการทดลองที่ความยาวท่อไอเสีย 450 มม. เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติต่ำที่สุดและใช้ขนาดสูง (36 มม.) จากรูปเราสามารถแบ่งช่วงของผลการทดลองเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่อัตราความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Equivalence Ratio) $\phi < 1.0$ หรือส่วนผสมบาง และที่ $\phi \geq 1.0$ ส่วนผสมหนา โดยในช่วงของส่วนผสมบาง เมื่อป้อนการสั่นสะเทือนเข้าไปในช่วง 40-80 Hz ทำให้อุณหภูมิของไอเสียลดลงเมื่อเทียบกับเผาไหม้ตามธรรมชาติที่ปราศจากการสั่นสะเทือน แต่ที่ความถี่ 20, 100 และ 130 Hz นั้นมีผลให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ $\phi \geq 1.0$ พบว่าที่ความถี่ 20, 40, 80, 100 และ 130 Hz ทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงขึ้น นอกจากนั้นผลการทดลองที่ความยาวของท่อไอเสียที่สูงขึ้นก็ยิ่งแสดงให้เห็นว่าการป้อนการสั่นสะเทือนที่บางความถี่ทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงขึ้นโดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิในบางภาวะได้ถึงอัตราส่วน 1.33 เท่า เหตุผลที่สนับสนุนให้การสั่นสะเทือนทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ลดลงในช่วงส่วนผสมบางอาจคือการสั่นสะเทือนเพิ่มความถี่ของผิวเปลวไฟ (Stretch rate) ทำให้ช่วงเวลาในการลุกติดไฟใหม่ (Relighting period) ยาวขึ้นในขณะที่ในช่วงส่วนผสมหนา การสั่นสะเทือนช่วยให้คุณภาพการผสมกันระหว่างไอเสียกับส่วนผสมดีขึ้นและทำให้ค่าส่วนผสมใกล้เคียงกันมากขึ้นอันจะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับ $\phi = 1.0$ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการป้อนการสั่นสะเทือนในความถี่ที่เหมาะสม

สมสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาความร้อน (Reaction rate) ได้



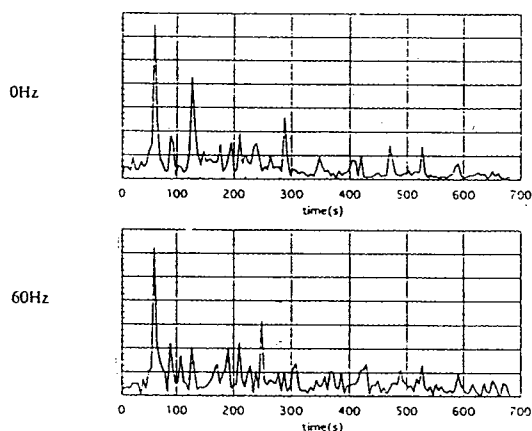
รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิของก๊าซไอเสียบริเวณทางออกของท่อไอเสียที่มีความยาว 450 มม. (ชั้นขนาด 36 มม.)



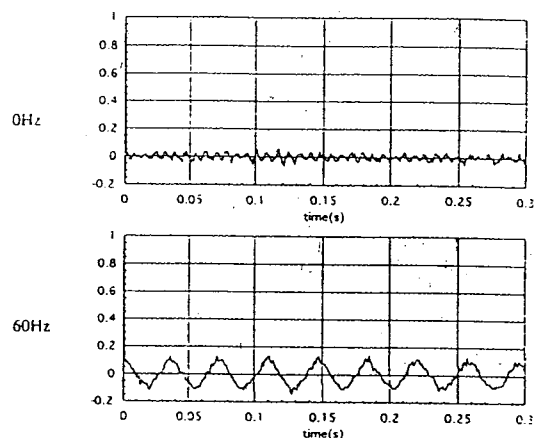
รูปที่ 7 แสดงค่าความผันแปรในห้องเผาไหม้ที่ใช้ชั้นแบบสูงและความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 450 มิลลิเมตร, $\phi = 1.0$

ดังที่ได้เกริ่นนำเกี่ยวกับคุณสมบัติของการเรืองแสงจากการเผาไหม้ว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถชี้เข้าถึงแนวโน้มการสันดาประหว่างการเผาไหม้และจากการทดลองซึ่งทำการวัดค่าการเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH และการถ่ายภาพเปลวไฟด้วยความเร็วสูง (High-speed CCD) ที่เวลาเดียวกันเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเฟสระหว่างการเรืองแสงกับค่าความดันผันแปร

จากรูปที่ 7 แสดงค่าความดันผันแปรในห้องเผาไหม้ที่ใช้ชั้นสูง (36 มม.) กับเวลา ความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 400 มม. และความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 450 มม. และ $\phi=1.0$ และรูปที่ 8 แสดงสเปกตรัมของภาวะดังกล่าว พบว่าการเผาไหม้(ปราศจากการป้อนการสันดาป)เกิดการสันดาปตามธรรมชาติที่ความถี่หลักเท่ากับ 60 Hz โดยมีระยะทางจากตำแหน่งปลายท่อเข้าไปถึงตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของความร้อนสูงสุดเท่ากับ 3 ใน 4 เท่าของความยาวคลื่นและจากการป้อนการสันดาปให้กับส่วนผสมที่ความถี่ 60 Hz ก็ทำให้เกิดความถี่ที่วัดได้เท่ากับ 60Hz เช่นเดียวกัน และจากรูปที่ 7 จะเห็นว่าการป้อนการสันดาปที่ความถี่ 60 Hz ทำให้ขนาดการสันดาปตามธรรมชาติลดลงจากค่าอ้างอิง 0.4 เป็น 0.15 mV ซึ่งเป็นขนาดที่ลดลง 62.5 % เนื่องจากสาเหตุที่ว่า การสันดาปที่ป้อนเข้าไปมีเฟสที่เอียงกันทำให้เกิดการหักล้างพลังงานจากความดันในห้องเผาไหม้ดังเช่นที่พบในการทดลองประเภทแอคทีฟคอนโทรลทั่วไป เช่นของ McManus et al. (1993) และ Bhidayasiri (1998)



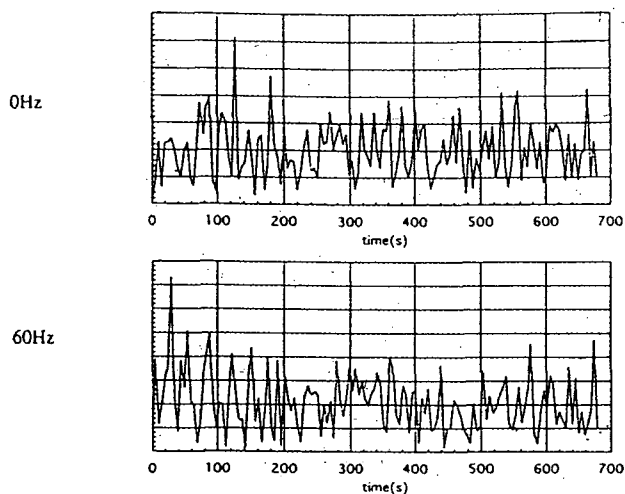
รูปที่ 8 Power Spectrum ของความดันผันแปรในห้องเผาไหม้ (ชั้นแบบสูง 36 มม., ท่อไอเสียยาว 450 มม. และ $\phi=1.0$)



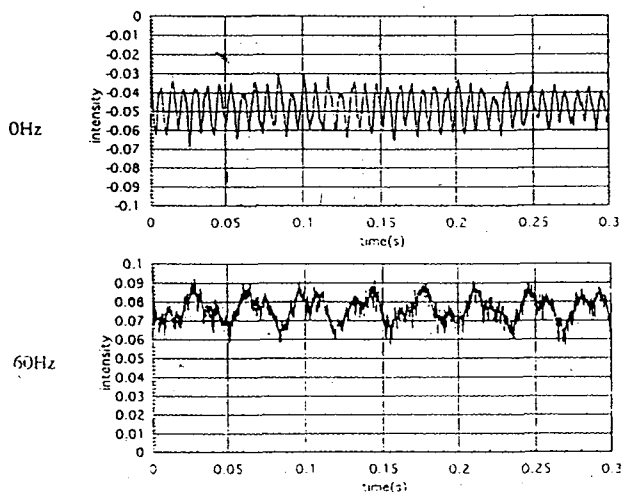
รูปที่ 9 กราฟ Auto-correlation ของการเรืองแสงของโมเลกุล OH (ชั้นแบบสูง 36 มม., ท่อไอเสียยาว 450 มม. และ $\phi=1.0$)

จากรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของการเรืองแสงของโมเลกุล OH กับเวลาในห้องเผาไหม้ที่ใช้ชั้นแบบสูง, ความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 450 มม. (ท่อไอเสียเท่ากับ 400 มม.) และ $\phi=1.0$ และรูปที่ 10 ซึ่งแสดงผลการทดลองเดียวกันแต่เป็นการแสดงการเรืองแสงเป็น Power Spectrum เพื่อสะดวกในการชี้การกระจายตัวของพลังงาน ณ ความถี่ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าการเผาไหม้ตามธรรมชาติ (ปราศจากการป้อนการสันดาป) ความสัมพันธ์ของการเกิดการเรืองแสงโดยโมเลกุล OH ไม่เป็นแบบฮาร์โมนิกหรือไม่สัมพันธ์กันเป็นคาบเวลาโดยมีความถี่ที่ 124 Hz ซึ่งประมาณเป็นฮาร์โมนิกของความถี่ตามธรรมชาติที่ 60 Hz และเมื่อป้อนการสันดาปให้กับส่วนผสมที่ความถี่ 60 Hz นั้นพบว่าจังหวะของการเรืองแสงสัมพันธ์กันเป็นคาบเวลาอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามก็ตีความถี่ของการเรืองแสงในกรณีที่มีการป้อนการสันดาปนี้กลับเป็นที่ 30 Hz ซึ่งเป็นเพียงครึ่งเดียวของความถี่ของความดันผันแปร (60 Hz) ในสภาวะเดียวกัน และสามารถสันนิษฐานได้ว่าการสันดาปที่เกิดขึ้นในความดันเป็นฮาร์โมนิกของการสันดาปที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

จากการพิจารณาผลการสันดาปโดยดูที่ละวิธี กล่าวคือ ใช้ความดันผันแปร กับ ใช้การเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH จะเห็นว่าความถี่ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กันกับฐานความถี่ 60 Hz และเมื่อ



รูปที่ 10 กราฟ Power-spectrum ของการเรืองแสงของโมเลกุลOH
(โดยใช้เซ็นเซอร์แบบสูง และท่อไอเสียยาว 450mm ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของเชื้อเพลิง $\phi=1$)



รูปที่ 11 กราฟ Cross-correlation ระหว่างการเรืองแสงของโมเลกุลOH
และความผันแปรในในห้องเผาไหม้

นำผลการทดลองทั้งสองมาประสานกันโดยการทำ Cross Correlation เนื่องจากผลการวัดในแต่ละวิธีได้เกิดขึ้นพร้อมกัน และจากผลการทำ Cross Correlation ซึ่งแสดงในรูปที่ 11 พบว่าในภาวะที่มีการป้อนการสันสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz การนำคลื่นมารวมกันทำให้ขยายเวลาเวลาที่เกิดการเสริมกันของเฟสขึ้นจาก 7.1 เป็น 40 มิลลิวินาทีหรือลดความถี่ของการเสริมกันของเฟสจาก 142 เป็น 25 Hz ได้ และเป็นที่น่าสังเกตด้วยว่าคลื่นการสันสะเทือนของความดันและการเรืองแสงของโมเลกุลอิสระ OH ไม่ปรากฏว่ามีเฟสเยื้องกันทั้งนี้อาจด้วยจากสาเหตุที่การวัดความดันและความเข้มแสงถูกกระทำที่ตำแหน่งที่ใกล้กันมากจนทำให้เวลาที่ใช้สำหรับเคลื่อนตัวจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งน้อยมาก

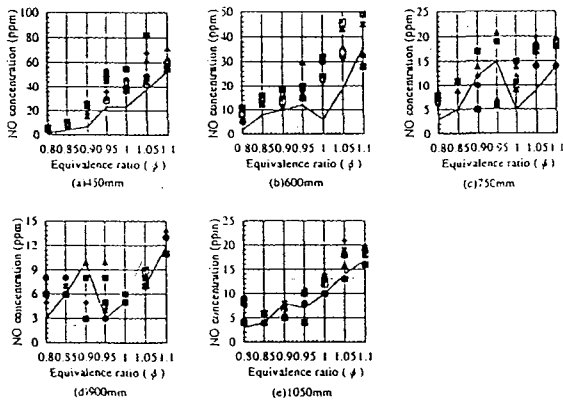
ผลต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

จากรูปที่ 12 และ 13 แสดงปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ที่ความยาวท่อไอเสียเท่ากับ 400 มม. โดยทำการวัดที่การเผาไหม้ที่มีการป้อนการสันสะเทือนและไม่มี โดยใช้เซ็นเซอร์แบบสูงและต่ำตามลำดับ และจากรูปที่ 12 ซึ่งทำการทดลองในห้องเผาไหม้แบบใช้เซ็นเซอร์พบว่าปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) แปรผันตามค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเชื้อเพลิงซึ่งตามทฤษฎีค่า NO จะมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและมีค่าสูงสุดที่ $\phi=1.0$ แต่การที่ NO เพิ่มขึ้นต่อเนื่องในขณะ $\phi>1.0$ อาจเป็นเพราะส่วนผสมในห้องเผาไหม้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์และ ϕ ก็มีค่าห่างจาก 1.0 เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการป้อนการสันสะเทือนกลับพบว่าปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าที่ความยาวของท่อไอเสียเท่ากับ 600 มม. และ $\phi=1.0$ ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 6.6 ppm มาเป็นที่ 30 ppm ด้วยการสันสะเทือนที่ 20 Hz, ที่ 32 ppm ที่ 60 Hz, และ 34 ppm ที่ 130 Hz เนื่องจากที่ภาวะดังกล่าวการสันสะเทือนทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงขึ้น (รูปที่ 6) จึงทำให้การผลิต NO สูงขึ้นตามตามทฤษฎีการผลิต NO_x ของ Zeldovich

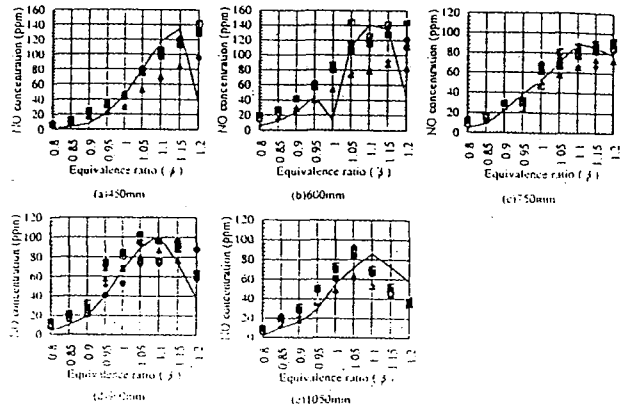
ผลจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่ใช้เซ็นเซอร์ต่ำพบว่าสามารถลดปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้เมื่อป้อนการสันสะเทือนที่ความถี่ที่เหมาะสมในช่วงอัตราความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน เช่น ที่ความยาวท่อไอเสีย 450 มม. การป้อนการสันสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz สามารถลด NO ในภาวะใกล้ Stoichiometry ($1.0 \leq \phi \leq 1.15$) ได้มากถึงประมาณ 35 % และที่ความยาวท่อไอเสีย 600 มม. การป้อนการสันสะเทือน ณ ภาวะเดียวกันสามารถลด NO ได้ถึงกว่า 40 % ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นไปได้ที่ว่าการสันสะเทือนเพิ่มความเร็วผันแปรซึ่งจะมีผลทำให้เวลาการเผาไหม้ที่ Stoichiometry (มีอุณหภูมิสูงสุด) ลดลงซึ่งจะทำให้

NO ลดลงดังเช่นผลการทดลองในอดีตของ Sivasegaram และ Whitelaw (1996)

จากผลการทดลองในช่วงก่อนที่แสดงว่าการแปรค่าขนาดความยาวท่อไอเสียมีผลต่ออุณหภูมิของไอเสียและขนาดของการสันสะท้อนของการเผาไหม้ ดังนั้นจึงนำมีผลต่อปริมาณ NO เช่นกันและจากการวัด NO กับขนาดความยาวท่อไอเสียพบว่า การเผาไหม้ด้วยความยาวท่อไอเสียที่สูงขึ้นทำให้เกิดปริมาณ NO สูงขึ้นโดยที่ภาวะ $\phi=1.0$ ท่อไอเสียที่ยาวขึ้นจาก 450 เป็น 900 มม. ทำให้การเผาไหม้มี NO เพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 70 ppm อย่างไรก็ตามผลของความยาวของท่อไอเสียมิได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อ NO ในทางตรงและในทิศทางเดียวกันเท่านั้น แต่ขนาดห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปยังเอื้อให้อิทธิพลทางอ้อมอื่น ๆ มีผลต่อ NO เช่นขนาดการสันสะท้อนที่สูงขึ้นตามความยาวของท่อไอเสียทำให้คุณภาพส่วนผสมดีขึ้นและอาจลดปริมาณ NO, อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่างกันมากระหว่างท่อไอเสียที่สั้นมากและการเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์กับท่อไอเสียที่มีขนาดที่สามารถทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์ได้ เช่นระหว่าง 450 กับ 900 มม. ทำให้การวัดอุณหภูมิหรือ NO มิได้เทียบจากตำแหน่งของเปลวไฟที่มีระดับคุณภาพเดียวกัน ความแตกต่างของ NO ที่ได้จึงมีอาจสรุปถึงปัจจัยความยาวของท่อไอเสียได้ชัดเจน และการปกคลุมเปลวไฟซึ่งถ้าท่อไอเสียที่สั้น เปลวไฟจะมีลักษณะเปิดมากขึ้นและจะสะท้อนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่ง NO มักจะต่ำ

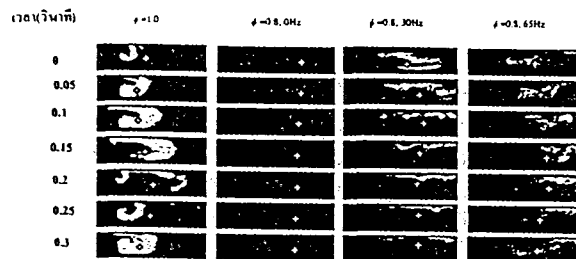
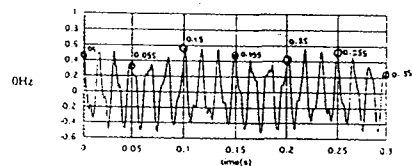


รูปที่ 12 ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้จากบริเวณปลายท่อไอเสีย



รูปที่ 13 ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้จากบริเวณปลายท่อไอเสีย (โดยใช้ชั้นแบบต่ำ)

จากรูปที่ 14 แสดงภาพของเปลวไฟที่ถ่ายจากกล้องความเร็วสูง (High-speed CCD) ในเวลาเดียวกับการวัดความดันแปรผันและการวัดความเข้มของการเรืองแสงของโมเลกุล OH ที่ $\phi=1.0$ ซึ่งปราศจากการป้อนการสันสะท้อนและที่ $\phi=0.8$ ที่มีการป้อนการสันสะท้อนที่ 30 และ 60 Hz โดยถ่ายภาพด้วยช่วงเวลา 0.05 วินาทีในระยะเวลาทั้งหมด 0.3 วินาที จากผลของภาพถ่ายจะเห็นว่าความเข้มแสงในภาวะปราศจากการป้อนการสันสะท้อนที่ $\phi=0.8$ น้อยกว่าที่ $\phi=1.0$ มาก แต่เมื่อป้อนการสันสะท้อนทั้งที่ 30 และ 60 Hz ทำให้ความเข้มแสงสูงมากขึ้นซึ่งจะเห็นด้วยว่าโครงสร้างของเปลวไฟ (Flow scale) มีขนาดใหญ่และหนาแน่นมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับภาวะที่มีการสันสะท้อนสูงขึ้นและมีการเรืองแสงมากขึ้นดังที่ได้ระบุในการศึกษาของ Gutmark et al. (1992) จึงแสดงให้เห็นว่าการป้อนการสันสะท้อนสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสันสะท้อนตามธรรมชาติได้



รูปที่ 14 แสดงวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเปลวไฟ (โดยใช้ชั้นแบบสูง 0.36 มม. ท่อไอเสียยาว 400 และท่อไอเสียยาว 450 มม.)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และ 9 พบว่าที่เวลา 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 วินาที นั้นค่า Auto Correlation ของความดันแปรผันในห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุด (รูปที่ 7) แต่สำหรับการเรียงแสงเฟสมีการเคลื่อนตัวจากความดันผันแปรทำให้ที่เวลา 0.05, 0.1 และ 0.25 วินาที การเรียงแสงมีความเข้มต่ำสุดในขณะที่ที่ 0.15 และ 0.2 วินาที การเรียงแสงมีความเข้มสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของความดันผันแปรที่มากกว่าความถี่ของการเรียงแสงถึงสองเท่า และจากภาพถ่ายของเปลวไฟเห็นว่าการสั่นสะเทือนของเปลวไฟได้เคลื่อนตัวไปในแนวยาวนานกับทิศทางการไหล โดยที่เวลา 0.15 วินาทีสอดคล้องกับภาวะที่มีความเข้มแสงสูงสุด โครงสร้างของเปลวไฟมีการขยายตัวสูงสุดและหยาบ ในขณะที่ที่ 0.25 วินาทีสอดคล้องกับภาวะที่มีความเข้มแสงต่ำสุด โครงสร้างของเปลวไฟมีขนาดเล็กและละเอียดมากขึ้น จึงทำให้สรุปได้ว่าการสั่นสะเทือนซึ่งนอกจากจะสะท้อนกับความเข้มแสงจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นผลจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาความร้อนแล้ว ยังสะท้อนกับโครงสร้างของการไหลที่มีกัมมันตภาพใหญ่เมื่อการสั่นสะเทือนสูงขึ้นดังเช่นในผลการทดลองของ Gutmark et al. (1992)

6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องด้วยการศึกษาที่มุ่งเน้นเพื่อที่จะประมวลความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดสั่นสะเทือนในห้องเผาไหม้และศึกษาถึงประสิทธิภาพในทางปฏิบัติที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เป็นประโยชน์ต่อคุณสมบัติการเผาไหม้เช่น ส่วนผสมดีขึ้น มลพิษลดลงและอีกทางหนึ่งเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่มีขนาดรุนแรงเกินไปและโดยมักเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์ในการหาจุดสมดุลว่าควรให้มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นจากปัจจัยตามธรรมชาติหรือปัจจัยที่สร้างขึ้นหรือทั้งสองอย่างอย่างไรเพื่อให้คุณสมบัติเฉลี่ยที่ดีที่สุดตามความต้องการของอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าห้องเผาไหม้นี้จะเป็นห้องเผาไหม้จำลองและมีได้เหมือนกับห้องเผาไหม้ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหนักชัดเจนแต่เป็นการออกแบบที่เอื้อให้เกิดการศึกษาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนจากการเผาไหม้ได้โดยสะดวก ดังเช่น การปรับเปลี่ยนความยาวของห้องเผาไหม้ การวัดความดันผันแปร การวัดอุณหภูมิ การวัดความเข้มแสง และศักยภาพในการติดตั้งเครื่องกระตุ้นการสั่นสะเทือนเทียม

จากการทดลองจะเห็นว่า การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของส่วนผสม (ϕ) มากกว่า 0.9 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 kPa ที่ $\phi = 1.1$ และมีลักษณะการสั่นสะเทือนแบบความถี่หลักเดี่ยวหรือ Single-frequency domination ซึ่งเท่ากับ 60 Hz และเป็นการกำกวมกับห้องเผาไหม้โดยมีระยะทางจากปลายท่อเข้าข้าง

ตำแหน่งที่เปลวไฟมีความเข้มของความร้อนสูงสุดเท่ากับ 3 ใน 4 เท่าของความยาวคลื่น (Three quarter-wave length) และตำแหน่งที่ความเข้มความร้อนสูงสุดเป็นแอนติโนด โครงสร้างทางเรขาคณิตมีผลชัดเจนกับการสั่นสะเทือนเนื่องจากผลเชิงกระทบเชิงพื้นฐานต่อการเผาไหม้โดยที่ความยาวของท่อไอเสียที่ยาวขึ้นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติที่สูงขึ้นจาก 0.6 เป็น 1.7 kPa เนื่องจากโอกาสในการเกิดกำทอนระหว่างเฟสของความร้อนกับความดันผันแปรมากขึ้นแต่การเพิ่มความยาวของท่อไอเสียมากกว่า 20 เท่าของความสูงหน้าตัดจะไม่เอื้อให้การสั่นสะเทือนมีขนาดมากขึ้นเนื่องจากความยาวจะเกินกว่าความยาวที่ต้องการให้การเผาไหม้เกิดสมบูรณ์หรือการเผาไหม้เป็นแบบปิด ส่วนขนาดของความยาวท่อไอดีนั้นมิได้มีผลชัดเจนต่อการสั่นสะเทือนเนื่องจากความถี่ของการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับทั้งความยาวท่อไอดีและไอเสียโดยความยาวท่อไอดีเป็นหลัก

การป้องกันการสั่นสะเทือนกับส่วนผสมก่อนเข้าห้องเผาไหม้นั้น ถึงแม้มีความกังวลว่าขนาดของการสั่นสะเทือนที่ป้อนอาจจะถูกหน่วงด้วยระยะทางก่อนถึงห้องเผาไหม้ที่ค่อนข้างมาก แต่เนื่องจากการสั่นสะเทือนต่อสภาวะความดันจึงทำให้การหน่วงเกิดขึ้นน้อยไม่เหมือนการสั่นสะเทือนต่อความเข้มข้นของส่วนผสมดังที่คณะผู้วิจัยได้เคยประสบในอดีต ในการทดลองนี้ยังสามารถใช้การป้องกันการสั่นสะเทือนให้ลดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติได้และทำให้การสั่นสะเทือนลดลงได้ถึง 62.5 % และจะเห็นได้ชัดว่าการป้องกันการสั่นสะเทือนสามารถเปลี่ยนแปลงคุณภาพของการเผาไหม้ได้โดยที่ทำการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงของ ϕ ระหว่าง 0.8-1.1 มีความสม่ำเสมอมากขึ้นอันทำให้สามารถเลือกใช้ส่วนผสมที่บางกว่าในขณะที่ยังสามารถรักษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้และมีการสั่นสะเทือนลดลง

จากการวัดค่าความเข้มแสงของโมเลกุลอิสระ OH ร่วมกับค่าความดันผันแปรในเวลาเดียวกันทำให้เราจะได้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจหลายประการ เช่น การสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นมักเกิดขึ้นพร้อมกับโครงสร้างของการไหลที่มีขนาดใหญ่และหยาบขึ้นและการเรียงแสงของการเผาไหม้ที่มากขึ้น และที่สำคัญอีกประการคือความถี่หลักที่เกิดขึ้นในความดันผันแปรไม่จำเป็นต้องเป็นความถี่เดียวกับเฟสความร้อนจากการเผาไหม้ซึ่งในกรณีนี้พบว่าความถี่จากเฟสของความร้อนเป็นสองเท่าของความถี่ของความดันผันแปรในกรณีนี้ปราศจากการป้องกันการสั่นสะเทือนแต่ในกรณีที่มีการป้องกันการสั่นสะเทือนความถี่นี้เป็นเพียงครึ่งเดียวของความถี่ของความดันผันแปร โดยทั้งสองกรณีน่าจะเป็นอาร์โมนิกของฐานความถี่ของความดันผันแปรที่ 60 Hz และยังแสดงให้เห็นอีกว่าเนื่องจากตำแหน่งที่วัดความดันกับตำแหน่งที่วัดความเข้มแสงแตกต่างกันน้อยมากทำให้ไม่ปรากฏเฟสเยื้องกันระหว่างคลื่นของการสั่นสะเทือนกับการเรียงแสงของโมเลกุลอิสระ OH ซึ่งหากนำสัญญาณความดันที่ได้ไปเป็นสัญญาณป้อนกลับใน

วงจรควบคุมการสันตะเทียนแบบแอคทีฟคอนโทรลน่าจะทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดี

นอกจากนั้นแล้วการสันตะเทียนยังมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งทำให้มีการเพิ่มและลดของปริมาณ NO โดยขนาด NO ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะสัมพันธ์กับภาวะที่การสันตะเทียนทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงขึ้นซึ่งจะทำให้การผลิต NO เพิ่มขึ้นตามหลักของ Zeldovich ซึ่งในการทดลองนี้การสันตะเทียนที่ 40 Hz สามารถทำให้ NO เพิ่มขึ้นในบางสภาวะได้ถึงกว่าสองเท่าในกรณีที่ใช้ชั้นแบบสูงซึ่งน่าจะเกิดจากผลที่การสันตะเทียนทำให้เสถียรภาพของเปลวไฟเลวลงและทำให้การเผาไหม้ใช้เวลาที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น แต่เมื่อใช้ชั้นแบบต่ำการป้อนการสันตะเทียนกลับทำให้การเพิ่ม NO เกิดขึ้นด้วยขนาดลดลงและในหลายสภาวะยังสามารถทำให้ NO ลดลงได้มากถึง 43 % อีกด้วยซึ่งถ้ากลับเป็นภาวะที่ใช้ชั้นแบบสูงการสันตะเทียนนี้จะทำให้ NO เพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้จึงมีความน่าสนใจและในเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าขนาดของตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟเช่น ชั้น (Step) มีอิทธิพลต่อผลของการสันตะเทียนซึ่งต้องการคำอธิบายที่มีหลักการมากขึ้นในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะต่อการศึกษาในอนาคต

เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการใช้ห้องเผาไหม้ขนาดจำลอง ในอนาคตจึงควรมีการทำทดลองในห้องเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเนื่องจากปัญหาที่มักพบจากความคลาดเคลื่อนระหว่างผลของห้องเผาไหม้ขนาดจริงกับขนาดจำลองทำให้ผลสรุปจากงานวิจัยยังไม่สามารถเป็นข้อสรุปที่สมบูรณ์ รวมทั้งควรมีการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของตัวรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟต่อออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้นโดยเลือกรูปร่างที่มักใช้กันในอุตสาหกรรมเช่นชั้นสมมาตรที่มีการขยายตัวทันที (Sudden Expansion) หรือใช้วงแหวน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วการทดลองเปลี่ยนชนิดของเครื่องกำเนิดการสันตะเทียนให้มทั้งการสันตะเทียนความเข้มข้นของส่วนผสมในห้องเผาไหม้หรือการฉีดน้ำเป็นจังหวะดังเช่นการทดลองของ Sivasegaram et al. (1995b) เพื่อจะหาแนวทางในการลดออกไซด์ของไนโตรเจนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยไอซาก้าโดย Professor M. Katsuki และบริษัทการบินไทย จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยครั้งนี้ และงานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยการสาน

ต่อโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยมหิดลกับมหาวิทยาลัยไอซาก้า ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมหาวิทยาลัยไอซาก้า ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ทำการทดลอง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าความร่วมมือนี้จะขยายผลเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง (References)

1. ดร.รุ่งเรือง พิชยศิริ (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 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
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., Poinso, 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