

การศึกษาขั้นพื้นฐานของเทคนิค Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)

Fundamental Study on Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)

อุษา มากมูล อภินันต์ นามเขต อรรณพ ประวีณวิสารณ์ ยศพงษ์ ลออ่อนวล และ สำเริง จักรใจ*

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-2470-9128 โทร

สาร 0-2470-9111 *อีเมลล์ sumreung.jug@kmutt.ac.th

Usa Makmool, Apinunt Namkhat, Unnop Praweenvisan, Yossapong Laoonual and Sumreung Jugjai*

Combustion and Engine Research Laboratory (CERL)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King's Mongkut University of Technology Thonburi, Bangkok

(KMUTT) 10140, Thailand, Tel: 0-2470-9128, Fax: 0-2470-9111, *E-mail: sumreung.jug@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

PLIF เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเลเซอร์ ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (CERL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้นำมาช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบการเผาไหม้ของห้องปฏิบัติการ ด้วยความสามารถในการตรวจวัดแบบระนาบสองมิติ คือ ทั้งตำแหน่งและปริมาณของ สปีชีส์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ โดยไม่เกิดการรบกวนธรรมชาติของการเผาไหม้นั้น ทำให้สามารถวินิจฉัยปัญหาด้านการเผาไหม้ของเตาต่างๆ ซึ่งอาจไม่สามารถทราบหรือค้นพบได้ด้วยเทคนิคที่ใช้อยู่โดยทั่วไป เมื่ออนุภาคถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์ เกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้ electronเกิดการเคลื่อนที่จาก ground state ไปยัง excited state ที่อยู่สูงกว่าเกิดการสะสมพลังงาน แต่เนื่องจากเป็นสภาวะที่ไม่เสถียรสำหรับโมเลกุลนั้น จึงพยายามกลับสู่สภาวะเดิม ด้วยการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมา เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ ผลการศึกษาเริ่มต้นกับเปลวไฟ Bunsen รายงานให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างภาพเปลวไฟที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และเปลวไฟที่ถ่ายโดยเทคนิค PLIF โครงสร้างของเปลวไฟในรูปของการกระจายสปีชีส์ของ OH (hydroxyl radical) ช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ดีขึ้นของพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเปลวไฟเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปกับการศึกษาวิจัยด้านการเผาไหม้ของห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างการกระจายตัวของสปีชีส์ เช่น OH, หรือ CH ของเตาแก๊สหัวต้ม ศึกษาการเกิดก๊าซมลพิษ (CO, CO₂, NO_x) และยังสามารถศึกษาคุณลักษณะการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Acetone_LIF) ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหา รวมทั้งการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเตาแก๊ส ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Abstract

PLIF is a spectroscopic method used for studying structure of molecules and detection of selective species. It was firstly applied to the study of the Combustion and Engine research

Laboratory (CERL). Because of a non-intrusive and a planar (2-D) measurement of selective specie in flame, these provide a most valuable in combustion diagnostics. The species to be examined is excited with help of a laser. The excited species will after some time de-excite and emit light at a wavelength larger than the excitation wavelength. This light, fluorescence, is measured. The objective of this study is to understand the fundamental of PLIF technique, in an application of the OH detection in Bunsen flame. OH species indicated the flame front structure. The signal obtained from this experimental would be used as the reference for the further application i.e. PLIF apply to the combustion of cooker-top burners. The measurement of OH/CH structures in flame, the pollutants emission (i.e. CO, CO₂, NO_x) and the mixing investigation (Acetone PLIF), these would help to solve low performance burners and to design for the high efficient burner.

1. บทนำ

ในอดีต การวัดค่าต่างๆทางด้านการเผาไหม้โดยทั่วไปของห้องปฏิบัติการต่างๆในสถานศึกษา เช่น อุณหภูมิการเผาไหม้ การปลดปล่อยมลพิษ รวมถึงประสิทธิภาพทางด้านความร้อน เทคนิคหรือเครื่องมือที่ช่วยในการศึกษาวิจัย จะเป็นเครื่องมือทางกายภาพ หรือวัสดุที่จับต้องได้ (Physical probing) เช่น gas sampling probes หรือ thermocouples ซึ่งวัสดุหรือเทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องยื่นหรือแทรกเข้าไปในระบบ ทำให้เกิดการรบกวนไม่มากนักน้อยกับกระบวนการเผาไหม้หรือระบบที่ทำการศึกษา อีกทั้ง ข้อมูลที่ได้และความแม่นยำยังข้อจำกัด จึงมีการนำเทคนิคใหม่ Planar laser induced fluorescence (PLIF) เข้ามาช่วยในการศึกษาวิจัย เนื่องจากมีความแม่นยำสูง และเป็นวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดการรบกวนระบบหรือกระบวนการที่ทำการ

ศึกษา นับเป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเปลวไฟที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน CERL ได้เห็นถึงความสำคัญของอุปกรณ์ PLIF ดังกล่าวจึงได้จัดหาช่วยในการศึกษา

จุดประสงค์ของบทความนี้ คือต้องการแนะนำให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงเทคนิคใหม่ด้านเลเซอร์ ของ PLIF เข้าใจหลักการพื้นฐานการทำงานของเทคนิคนี้ ตลอดจนความสามารถในการทำงาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจและแนวความคิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิจัยด้านการเผาไหม้ต่อไป

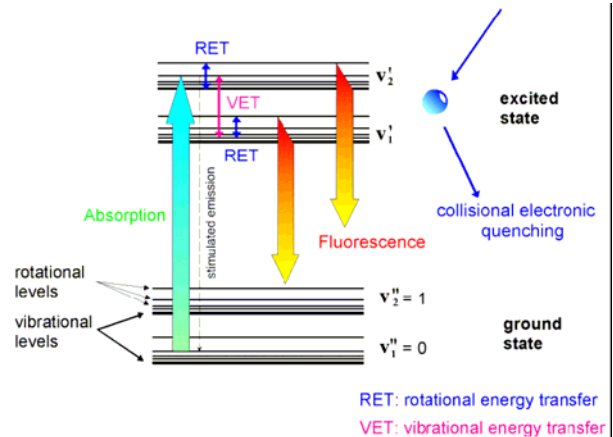
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

PLIF เป็นเทคนิคด้านเลเซอร์ที่มีความซับซ้อนและสมรรถนะการทำงานสูงมาก ในแง่การวิเคราะห์ด้านเผาไหม้ ซึ่งใช้กันทั่วไปในห้องปฏิบัติการที่มีความเป็นสากล จากความสามารถในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ ที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (instantaneous) อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง เช่น ปริมาณและตำแหน่งของ สปีชีต่างๆจากการเผาไหม้ เช่น OH, CH, ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ (nanosecond) ในระหว่างการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ก่อนจะเปลี่ยนรูปไปในที่สุด ได้แก่ CO, CO₂, NO_x H₂O ซึ่งเรียกว่าผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ซึ่งข้อมูลสำคัญเหล่านี้ จะช่วยให้การวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ต่างๆที่ทำการศึกษ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

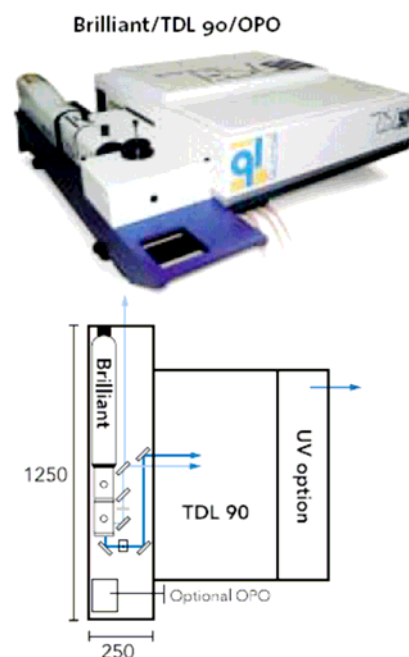
เพื่อให้อะตอมหรือโมเลกุลเกิดการปล่อยสัญญาณหรือแสงฟลูออเรสเซนซ์ ได้แก่การปล่อยสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต หรือ UV ได้นั้น โมเลกุลนั้นต้องถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic transition) ในสารเรียกว่าสเปโรสโกปีแบบอเล็กทรอนิกส์ (รูปที่ 1) ซึ่งเมื่อนักถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก ในที่นี้คือ สัญญาณจากแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นหรือความถี่หนึ่งๆ ด้วยพลังงานเท่ากับ $h\nu$ เมื่อ h คือ Planck's constant และ ν คือ ความถี่ของคลื่นเลเซอร์ อิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (ground state) จะเกิดการดูดกลืนพลังงานนั้น แล้วเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะที่สูงกว่า เรียกว่าสถานะถูกกระตุ้น (excited state) ที่มีผลต่างระหว่างระดับพลังงานเท่ากับพลังงานที่ใช้กระตุ้น เกิดการสะสมพลังงาน โดยธรรมชาติอิเล็กตรอนจะพยายามปรับตัวให้มีพลังงานต่ำที่สุด จึงเกิดการเปลี่ยนสถานะโดยปลดปล่อยพลังงานโฟตรอนออกมาในรูปของแสง (i.e. spontaneous emission) กลับลงสู่สถานะที่ต่ำกว่า โดยมีความยาวคลื่นสูงกว่าความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น

องค์ประกอบของเทคนิค PLIF ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือ **The excitation system** ประกอบด้วย ระบบเลเซอร์สำหรับส่องสว่าง (รูปที่ 2) เพื่อกระตุ้นให้อุณหภูมิหรือ สปีชีในเปลวไฟ เกิดการปลดปล่อยแสง ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งประกอบด้วยเลเซอร์ 2 ชนิดทำงานร่วมกัน คือ Nd:YAG laser ซึ่งเป็นเลเซอร์แบบ solid state ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณเลเซอร์เริ่มต้น ที่ความยาวคลื่น 1064 nm เมื่อผ่าน harmonic generator ความถี่สัญญาณเพิ่มเป็น 2 เท่า ทำให้ได้ความยาวคลื่นที่ 532 nm หรือ แสงสีเขียว เพื่อใช้เสมือนเป็นพลังงานกระตุ้น (pumping) สำหรับ Dye laser ที่มีสารละลายของสีย้อม หรือ dye ที่เหมาะสม ระบบ optical ต่างๆ ใน dye laser (รูปที่ 3) จะทำหน้าที่ปรับจูนแบบละเอียดเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ สร้างสัญญาณ

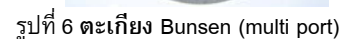
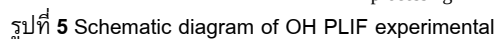
เลเซอร์ (dye beam) ในช่วงแสงที่มองเห็น (400-700 nm) และส่วนของ UV option จะทำหน้าที่แปลงความถี่สัญญาณที่ได้จาก dye laser เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ ในช่วงของรังสี ยูวี (รูปที่ 4) โดย หนึ่งความยาวคลื่นสามารถกระตุ้นเพื่อให้ได้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์จากเพียงสปีชีเดียวเท่านั้น (species selective) เมื่อต้องการศึกษาหรือตรวจวัดสปีชีอื่น ๆทำได้โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นที่สอดคล้องกัน (resonance) โดยตัวอย่างค่าความยาวคลื่นที่ใช้กันทั่วไปในการตรวจวัดสปีชีในการเผาไหม้แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนที่ 2 คือ **The detection system** ประกอบด้วย กล้อง Intensifier-CCD (ICCD) เนื่องจากสัญญาณของแสง ฟลูออเรสเซนซ์ ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องเพิ่มส่วนที่เรียกว่า intensifier เข้าไปในกล้อง CCD ทำหน้าที่เสมือนตัวขยายสัญญาณ (amplifier) และมีเลนส์สำหรับกรองสัญญาณ (spectral filters) ประกอบไว้ที่หน้าเลนส์กล้อง ICCD เพื่อกรองสัญญาณให้เฉพาะความยาวคลื่นที่สนใจเท่านั้นผ่านเข้าไปในกล้องได้ ก่อนที่จะส่งต่อส่วนที่ 3 คือ **The Processing subsystem** โดยมี synchronizer ทำหน้าที่ควบคุมให้ทุกระบบทำงานที่เวลาสอดคล้องกัน



รูปที่ 1 Scheme of molecule levels and radiative/radiationless transitions. [1]



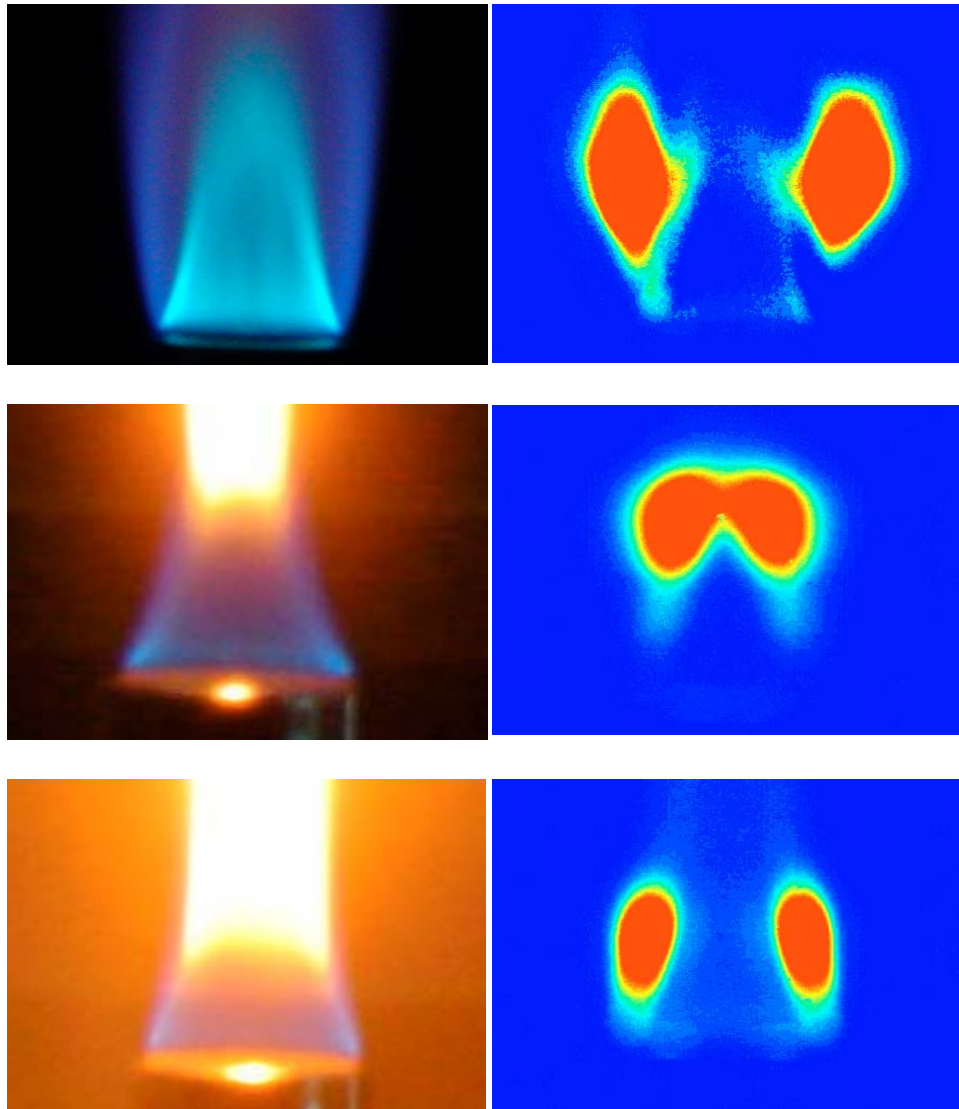
รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบเลเซอร์ Nd:YAG laser และ Dye laser [2]



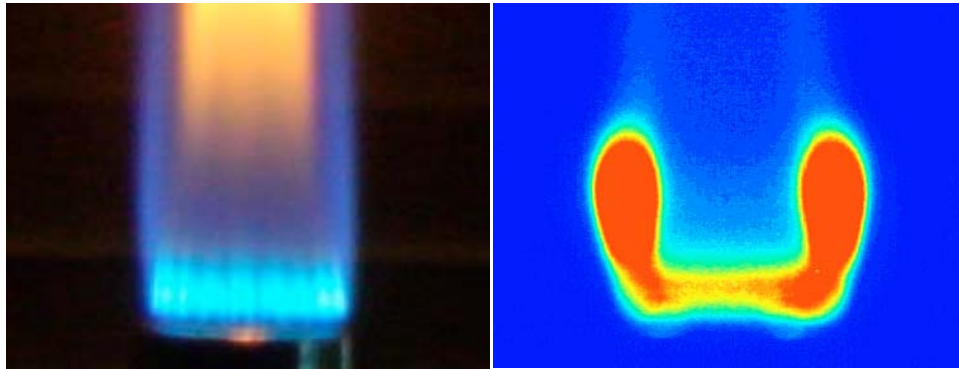
เข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดเปลวไฟแบบต่างๆได้ ระบบเลเซอร์ประกอบด้วย เลเซอร์ Nd:YAG (Brilliant quantel) ที่มีอัตราถี่ 10 Hz ให้สัญญาณเลเซอร์ 10 pulses ใน 1 วินาที) โดยมีพลังงานสูงสุด เท่ากับ 200 mJ ที่ความยาวคลื่นเริ่มต้น 1064 nm เมื่อถูกแปลงสัญญาณ มาที่ความยาวคลื่น 532 nm จะทำหน้าที่เป็นสัญญาณเริ่มต้นที่จะใช้ปั๊ม หรือ กระตุ้น (beam pump, ลำแสงสีเขียวยหมายเลขที่ 4 ในรูปที่ 3) dye laser (TDL90 quantel) โดยมีสารละลาย Rhodamine 590 ทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานกระตุ้นจาก 532 nm สร้างสัญญาณแสงเลเซอร์ในช่วงการมองเห็น ที่ประมาณ 563 nm (แสงสีเหลืองหมายเลข 5 ในรูปที่ 3 และหมายเลข 1 ในรูปที่ 4) สัญญาณ ที่ 563 nm เข้าสู่ส่วนสร้างสัญญาณ ยูวี ด้วยกระบวนการ เพิ่มความถี่สัญญาณ (i.e. doubling frequency) ได้สัญญาณเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 281.5 nm (ความยาว pulse 10 ns และพลังงานต่อ pulse ประมาณ 8 mJ) ซึ่งเหมาะสมในการกระตุ้นให้สปีชี OH เกิดการแปลงสัญญาณ ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 313 nm จะถูกตรวจจับด้วยกล้อง ICCD (Dantec HiSense MkII). โดย intensifier gate เปิดเป็นเวลา 100 ns เพื่อตัดแสงรบกวน

จากภายนอกทั้งจากเปลวไฟและจากห้องทดลอง นอกจากนั้นแล้วยังเพิ่ม UV lens (313 nm , Niker60 mm, f #2.8) เพื่อเพิ่มความแน่นอนให้เฉพาะฟลูออเรสเซนซ์ของสปีชี OH เท่านั้นที่ถูกตรวจวัด โดยทั่วไป UV laser มีความเสถียรในช่วง 8-12% ซึ่งลดคุณภาพของข้อมูล PLIF ที่เวลาใดๆ จึงต้องมีการวัดพลังงานของเลเซอร์แต่ละ pulse เพื่อให้สัญญาณภาพที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดย Energy pulse

monitor (EPM) จะถูกติดตั้งระหว่างลำแสงเลเซอร์ที่ออกมาก่อนเข้าสู่ชุดสร้างเลเซอร์ให้เป็นแผ่นระนาบ (รูปที่ 5) ที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร สูง 40 มิลลิเมตร ยิ่งไปยังบริเวณเปลวไฟตัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตะเกียง โดยขอบล่างของระนาบเลเซอร์ชนปากท่อตะเกียงพอดี คือตรวจวัดสัญญาณ OH ในช่วงความสูงเปลวไฟ 40 มิลลิเมตรแรกเท่านั้น



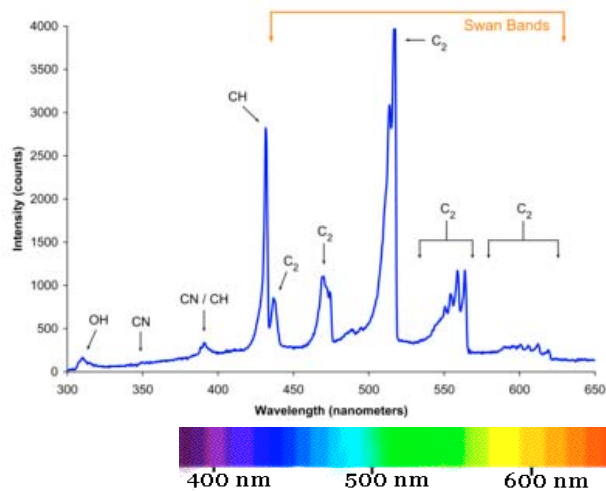
รูปที่ 6 เปรียบเทียบภาพถ่ายเปลวไฟ Bunsen, ถ่ายด้วยกล้องทั่วไป (ซ้าย) ถ่ายโดยเทคนิค PLIF (ขวา) โดยภาพ a เป็นเปลวไฟที่ ปริมาณอากาศส่วนแรกเปิดสุด b เปิดปานกลาง และ c เกือบปิดสนิท หัวตะเกียงเป็นแบบ single port



รูปที่ 7 ภาพถ่ายเปลวไฟ Bunsen, ถ่ายด้วยกล้องทั่วไป (ซ้าย) ถ่ายโดยเทคนิค PLIF (ขวา) หัวตะเกียง เป็นแบบ multi-port

ตารางที่ 1 Typical wavelengths for species LIF imaging.

Wavelength	species
281.6 nm	OH
339.3 nm	HCHO
387.2 nm	CH
230.0 nm	CO
239.34 nm	CO ₂
224.7 nm	NO



รูปที่ 8 Spectrum of blue flame [8]

3. ผลการทดลอง

รูปที่ 6 a b และ c เปรียบเทียบผลการถ่ายภาพเปลวไฟตะเกียง Bunsen แบบ single port ระหว่างถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพทั่วไปกับที่ถ่ายโดยเทคนิค PLIF (เป็นภาพเฉลี่ยของภาพขณะเวลาใดๆ i.e. instantaneous images จำนวน 100 ภาพ) เพื่อศึกษาตำแหน่งการเกิด OH หรือบริเวณเกิดปฏิกิริยา (reaction zone) ที่ปริมาณอากาศส่วนแรก (primary air) เปิดสุด เปิดปานกลางและปิดสนิท ตามลำดับ สีแดงแสดงถึงบริเวณที่มีความเข้มข้นของ OH สูงที่สุด และน้อยลง แสดงด้วยสี เหลือง เขียว ฟ้า และ น้ำเงิน เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของ OH เป็นศูนย์ ตามลำดับ

รูปที่ 6a แสดงถึงตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาหนาแน่นอยู่บริเวณรอบนอกของ inner cone เพราะเกิด OH ในปริมาณสูง และไม่ปรากฏว่าเกิด OH ในบริเวณใกล้ปากท่อตะเกียงแต่เกิดขึ้นหนาแน่นที่บริเวณรอยต่อระหว่าง inner cone และ outer cone เปลวไฟมีขนาดกว้าง เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ดีในช่วงความสูงเปลวไฟที่ตรงจวัด ส่งผลให้เปลวไฟสั้น การที่มองเห็นเปลวไฟสีเขียวอมฟ้าบริเวณ inner cone และปากท่อตะเกียงแต่ไม่ปรากฏสปีชี OH สีที่มองเห็นนั้นเกิดจากการแปลงแสงของสปีชีอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ (i.e. intermediate species) ซึ่งแต่ละสปีชีจะแปลงแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน กรณีของการเผาไหม้สมบูรณ์จะได้เปลวไฟสีฟ้า แสดงถึงการแปลงแสงของโมเลกุล เช่น C₂ ดังรูปที่ 8 ส่วนการแปลงแสงของ OH อยู่ในช่วงรังสี UV (ที่ความยาวคลื่นประมาณ 310-320 nm) ซึ่งอยู่นอกช่วงการมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (400-700 nm) ดังนั้นจึงพบว่านอกขอบเขตของเปลวไฟที่มองเห็นก็มีสปีชี OH ปรากฏอยู่ด้วย

เมื่อปริมาณอากาศส่วนแรกเปิดปานกลางดังรูปที่ 6b การเผาไหม้เกิดขึ้น ได้ช้า บริเวณเกิดปฏิกิริยาแคบลงและถูกยกขึ้นไปเกิดในตำแหน่งสูงขึ้น เมื่ออากาศส่วนแรกปิดสนิท (รูปที่ 6c) บริเวณเกิดปฏิกิริยาจะแคบลงและลอยต่ำลงเมื่อเทียบกับรูป 6b เพราะการหายไปของ inner cone นั้นเอง จากภาพทั้ง 3 พบว่าการระบุตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยตาเปล่าจะเป็นไปไม่ได้เลยเพราะให้ผลแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับภาพถ่ายจาก PLIF

รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเปลี่ยนตะเกียง Bunsen เป็นหัวเผาแบบ multi-port ที่ปริมาณอากาศส่วนแรกเปิดสุด หัวเผาแบบ multi-port ช่วยให้การไหลของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกมีความสม่ำเสมอและเปลวไฟมีความเถียรมากขึ้น ส่งผลให้มีสปีชี OH ปรากฏให้เห็นที่บริเวณเหนือปากท่อตะเกียงดีขึ้น เมื่อเทียบกับรูป 6a เพราะอากาศส่วนที่สองสามารถแพร่ลึกเข้าไปในบริเวณใจกลางของหัวเผาได้ดีขึ้นนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม การระบุตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาหรือเปลวไฟด้วยการตรวจวัดการกระจายตัวของสปีชีหนึ่งๆนั้น อาจไม่สามารถบ่งบอกถึงขอบเขตเปลวไฟที่แท้จริงได้ เนื่องจากแต่ละสปีชีเกิดหนาแน่นในตำแหน่งที่แตกต่างกัน กล่าวคือ OH เกิดมากในบริเวณ post-flame หรือ outer cone แสดงถึงการเข้าทำปฏิกิริยากันระหว่าง CH กับออกซิเจนในอากาศ ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำการตรวจวัดสปีชี CH ซึ่ง

แสดงถึงการสลายตัวของเชื้อเพลิง (fuel decomposition) ก็จะพบการกระจายตัวอย่างหนาแน่นของ CH ใกล้บริเวณ inner cone ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในเปลวไฟแบบแพร่ของ Donbar และ คณะ [9] ที่พบว่า OH เกิดขึ้นหนาแน่นในบริเวณ Fuel-lean side ในขณะที่ CH เกิดขึ้นหนาแน่นที่บริเวณ Fuel-rich side

4. สรุปผล

ผลการศึกษารายงานให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างภาพเปลวไฟ Bunsen ที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และเปลวไฟที่ถ่ายโดยเทคนิค PLIF โครงสร้างของเปลวไฟในรูปการกระจายของสปีชี OH สามารถทราบได้จากเทคนิค PLIF ช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นของพฤติกรรมเผาไหม้ของเปลวไฟ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์หัว

เผาอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลวไฟแบบพุ่งชน (impinging jet) เช่น เตาแก๊สหุงต้ม ซึ่งมีอิทธิพลของการเย็นตัว (quenching effect) สูงมากเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลลัพธ์จากการศึกษาเปลวไฟชนิดนี้โดยเทคนิค PLIF ในอนาคตจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการปรับปรุงพัฒนาหัวเผาชนิดดังกล่าวให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ประหยัดพลังงาน แต่ลดมลพิษน้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จัดทำโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (CERL) โดยได้รับความสนับสนุนเครื่องมือจากสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul Scherrer institue, 2004. Combustion diagnostics. <http://cdg.web.psi.ch/Summerschool/> (accessed on May 2007).
- [2] Quantel- France, 2007. Tunable laser. www.lambdaphoto.co.uk/pdfs/TDL90.pdf (accessed on May 2007).
- [3] Bambach R., and Kappeli B., 1999. Simultaneous visualization species in flames by planar-laser-induced fluorescence using a single laser system, Applied Physics B-Laser and Optics, vol. 68, pp. 251-255.
- [4] Kristen A. P. and Daniel B. O., 1999. High-sensitivity detection of CH radicals in flames by use of a diode-laser-based near-ultraviolet light source, Optics Letters, vol. 24, pp. 667-669.
- [5] Tanahashi M., Murakamia S., Choi G. M., Fukuchi Y., Miyauchi T., 2005. Simultaneous CH-OH PLIF and

- stereoscopic PIV measurements of turbulent premixed flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1665-1672.
- [6] Berg P. A., Hill D. A., Noble A. R., Smith G. P., Jeffries J. B., and Crosley D. R., 2000, Absolute CH Concentration Measurements in Low Pressure Methane Flames, Combustion and Flame, vol. 121, pp. 223.
- [7] Najm, H. N., Paul, P. H., Mueller, C. J., and Wyckoff, P. S. (1998), On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate, Combustion and Flame, Vol. 113, 312-332.
- [8] Wikimedia Foundation, Inc., 2001. Flame, <http://en.wikipedia.org/wiki/Flame> (accessed on June 2007).
- [9] Donbar J.M., Driscoll J.F., Carter C.D., 2000. Reaction zone structure in turbulent nonpremixed jet flames-from CH-OH PLIF images, Combustion and Flame, Vol. 122, pp. 1-19