

## บทที่ 3

### ทฤษฎีเกี่ยวกับ Visualization

#### 3.1 แบบจำลองเชิงปรากฏการณ์สำหรับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI

การศึกษาภาพถ่ายการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลความดันในกระบอกสูบ จะทำให้ได้แบบจำลองของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI โดยแนวคิดในเรื่อง "อัตราการปล่อยความร้อน" (Heat Release Rate) ซึ่งนิยามว่า เป็นอัตราการปลดปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงโดยกระบวนการเผาไหม้ จะมีความสำคัญในการทำความเข้าใจแบบจำลองนี้ โดยสามารถคำนวณได้จากข้อมูลความดันกระบอกสูบที่สัมพันธ์กับมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

##### 3.1.1 การศึกษาภาพถ่ายการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI

ในปัจจุบันนี้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษากาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI ด้วยวิธีการถ่ายภาพความเร็วสูงเป็นจำนวนมาก โดยการถ่ายภาพออกมาเป็นลำดับตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ทำให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการศึกษาลักษณะของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI โดยภาพถ่ายการเผาไหม้ที่ถูกรับเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะมีลักษณะดังนี้

Fuel Spray - หยดเชื้อเพลิงจะสะท้อนแสงจากต้นกำเนิดแสงภายนอก และนิยามว่าเป็นส่วนของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว ก่อนการระเหยจะเสร็จสมบูรณ์

Premixed Flame - ในช่วงนี้มีความสว่างน้อยเกินไป สำหรับการบันทึกภาพด้วยระดับ Exposure ที่ใช้อยู่ ซึ่งการผสม Copper Additive เข้าไปในเชื้อเพลิงจะทำให้ได้เปลวไฟ (Flame) ที่มีสีเขียวสว่างมากพอที่จะทำให้มองเห็นได้

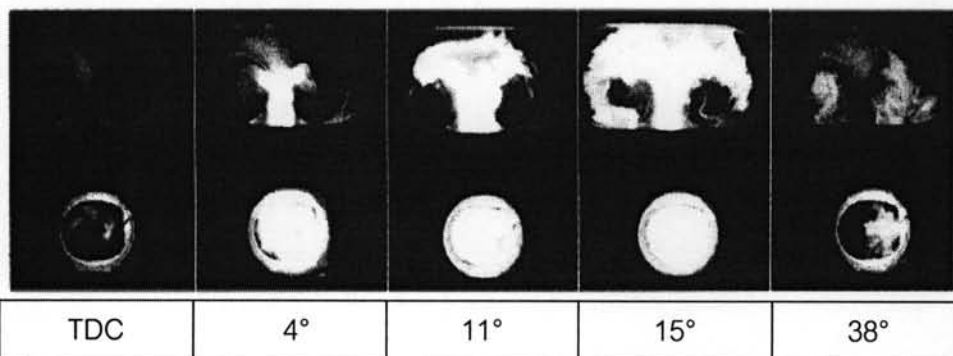
Diffusion Flame - การเผาไหม้ของอนุภาค Carbon ที่อุณหภูมิสูงในเปลวไฟแบบ Diffusion Flame จะมีความสว่างมากและปรากฏเป็นเปลวไฟสีเหลืองขาว เมื่อเปลวไฟเย็นลง การแผ่รังสีจากอนุภาคต่างๆจะเปลี่ยนสีเปลวไฟจากส้มเป็นแดง

Over-rich Mixture - ปรากฏเป็นบริเวณสีน้ำตาล ซึ่งมักถูกล้อมรอบโดยเปลวไฟแบบ Diffusion Flame สีขาว แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีส่วนผสมหนาเกินไป ซึ่งเป็นบริเวณที่มีกระบวนการเกิดอนุภาคเขม่า โดยส่วนขอบของบริเวณนี้ที่ได้สัมผัสกับอากาศที่ยังไม่ได้เผาไหม้จะเกิดเป็นเปลวไฟแบบ Hot White Diffusion Flame

ตารางที่ 3-1 แสดงการแปลความหมายรูปถ่ายสีจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI [1]

สี	การแปลความหมาย
เทา	พื้นหลัง เป็นแก๊สโปร่งแสงและไม่มีการเปล่งแสง (เป็นอากาศในช่วงเริ่มต้นก่อนการเผาไหม้และเป็นผลิตภัณฑ์หลังจากการเผาไหม้)
เขียว	ในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ – เป็นเปลวไฟแบบ premixed flame ซึ่งถูกทำให้มองเห็นได้โดยเพิ่ม Copper Additive ในเชื้อเพลิง หลังจากเริ่มต้นการเผาไหม้ – เป็นสีของแก๊สที่กำลังเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 1800 °C
ขาวและเหลือง-ขาว	เป็นการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอนในเปลวไฟแบบ diffusion flame ที่อุณหภูมิ 2000 – 2500 °C
เหลืองและส้มแดง	เป็นการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอนในเปลวไฟแบบ diffusion flame ที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยเห็นครั้งสุดท้ายในฟิล์มที่อุณหภูมิ 1000 °C
น้ำตาล	เป็นหมอกเขม่าจากบริเวณที่มีส่วนผสมหนามาก เมื่อเคลื่อนที่ไปเจอกับอากาศ (บริเวณที่เป็นสีเทา) มักจะเกิดเป็นขอบสีขาวของเปลวไฟที่มีความร้อนสูง

ในรูปที่ 3-1 จะแสดงภาพถ่ายเป็นลำดับจากห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ Ricardo ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ CI แบบ IDI ซึ่งมีห้องเผาไหม้ชนิด Ricardo Comet V swirl chamber โดยได้ปรับตั้งระบบฉีดเชื้อเพลิงให้ฉีดเชื้อเพลิงที่มุมข้อเหวี่ยง 11 องศาก่อนศูนย์ตายบน (Before Top-dead Center or BTDC) ส่วนหัวฉีดเป็นแบบ Pintuaux nozzle โดยสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจะมี 2 ส่วนคือ auxiliary spray ฉีดในแนวรัศมี และ main spray ฉีดในแนวสัมผัส ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้จากภาพถ่ายได้ดังนี้



รูปที่ 3-1 แสดงภาพถ่ายจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม [1]

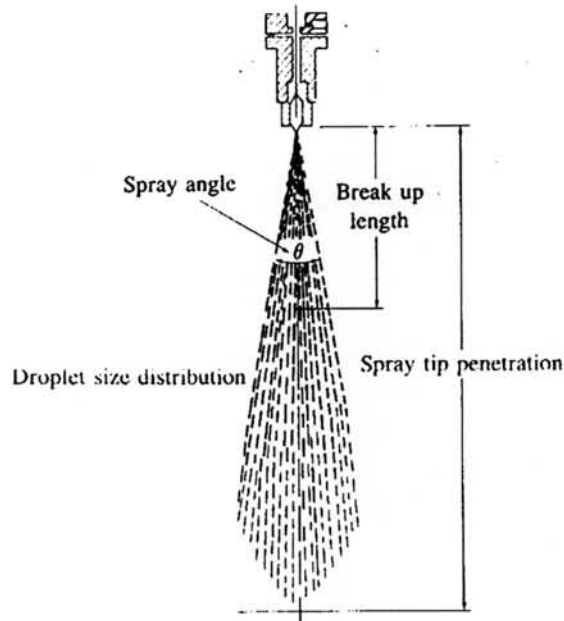
ที่ศูนย์ตายบน (Top-dead Center or TDC) รูปถ่ายแสดงให้เห็นว่าสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจะถูกทำให้แตกตัวโดยอากาศที่เกิดการหมุนวนด้วยความเร็วสูงในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดย main spray จะเคลื่อนที่ตามแนวสัมผัสของผนัง แต่ในรูปนี้จะไม่ปรากฏ auxiliary spray ให้สังเกตเห็นได้ เนื่องจากที่ TDC นั้น auxiliary spray ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าได้ระเหยไปก่อนแล้ว ส่วนการเกิดเปลวไฟที่มองเห็นได้ในครั้งแรกนั้น เกิดที่มุมข้อเหวี่ยง  $1^{\circ}$  BTDC ในเชื้อเพลิงที่ระเหยแล้วจาก auxiliary spray โดยปรากฏเป็นเปลวไฟแบบ premixed flame สีเขียว แล้วที่ TDC เปลวไฟจะขยายตัวไปที่ main spray และเริ่มเปลี่ยนเป็นเปลวไฟแบบที่กำลังเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอนเป็นสีเหลือง-ขาว โดยมีขอบเป็นสีเขียว ส่วนที่มุมข้อเหวี่ยง  $4^{\circ}$  BTDC ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าจะเต็มไปด้วยเปลวไฟที่กำลังเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอน และเปลวไฟส่วนหนึ่งจะเคลื่อนออกมาด้วยความดันจากห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ผ่าน throat เข้าไปที่ชอกบริเวณเหนือหัวลูกสูบ โดยลำของเปลวไฟจะไหลออกมาปะทะกับหัวลูกสูบและเข้ามาผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้หลัก เหลือเพียงจุดสีเขียว ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอน (ที่มุมข้อเหวี่ยง  $4^{\circ}$ ,  $11^{\circ}$  และ  $15^{\circ}$  ATDC) ส่วนกลุ่มเขม่าสีน้ำตาลซึ่งเกิดที่บริเวณ throat ที่มุมข้อเหวี่ยง  $15^{\circ}$  ATDC จะขยายตัวไปรอบๆกระบอกสูบ โดยมีขอบเป็นเปลวไฟสว่างสีเหลืองขาว โดยหลังจากนี้เขม่ากลุ่มนี้จะพบกับอากาศที่เหลืออยู่ในห้องเผาไหม้และเกิดการเผาไหม้ต่อไป เมื่อแก๊สในห้องเผาไหม้เย็นตัวลงในจังหวะขยายตัว จะเกิดเหตุการณ์ที่เปลวไฟสีเหลืองขาว เริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแก่ แล้วเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง ซึ่งจากรูปถ่ายที่มุมข้อเหวี่ยง  $38^{\circ}$  ATDC จะสังเกตเห็นได้ว่าเปลวไฟเริ่มดับตัวลง

### 3.1.2 การศึกษาโครงสร้างของดีเซลสเปรย์

#### 3.1.2.1 โครงสร้างสเปรย์ทั้งหมด

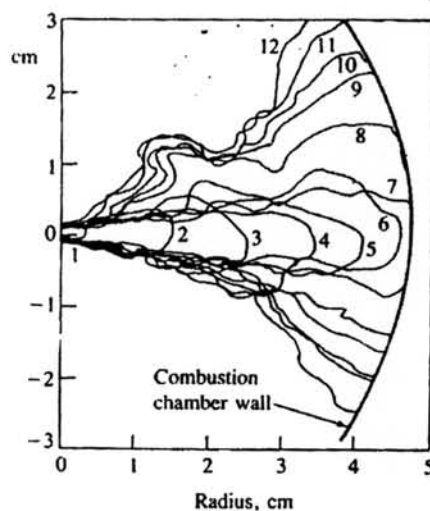
เชื้อเพลิงถูกนำเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลโดยผ่านหัวฉีด หรือ รูเล็ก 1 หรือมากกว่าสองรู โดยมีผลต่างความดันระหว่างท่อป้อนเชื้อเพลิงและกระบอกสูบมาก หัวฉีดดีเซลมาตรฐานมักทำงานด้วยความดันในการฉีดเชื้อเพลิงระหว่าง 200 และ 1700 atm ที่เวลาของการฉีด อากาศในกระบอกสูบจะมีความดัน 50 ถึง 100 atm, อุณหภูมิประมาณ 1000 K และความหนาแน่นระหว่าง 15 และ 25 kg/m<sup>3</sup> รูปที่ 3-2 แสดงโครงสร้างของสเปรย์เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ DI ทั่วไป เมื่อ jet ของเหลวออกจากหัวฉีด มันจะกลายเป็น turbulent และแพร่กระจายออกไป เมื่อมันปะทะและผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆ ความเร็วของ jet เริ่มต้นมีค่ามากกว่า  $10^2$  m/s ที่ผิวภายนอกของ jet จะแตกออกเป็นหยดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10  $\mu$ m ที่ใกล้กับทางออกของหัวฉีด ลำของเหลวที่ออกจากหัวฉีด จะรวมตัวกันภายในกระบอกสูบ ครอบคลุมความยาวค่าหนึ่งที่เรียกว่า "Breakup length" แล้วแตกตัวเป็นละอองหยดที่มีขนาดต่างๆกัน เมื่อละอองสเปรย์เคลื่อนออกจากหัวฉีด มวลของอากาศภายในสเปรย์จะเพิ่มขึ้น, สเปรย์ลู่ออก, ความกว้างสเปรย์เพิ่มขึ้น และความเร็วลดลง หยดเชื้อเพลิง

ระเหย เมื่อกระบวนการแตกตัวของอากาศดำเนินไป ปลายของสเปรย์พุ่งไกลออกไปในห้องเผาไหม้เมื่อการฉีดเชื้อเพลิงดำเนินไป แต่ด้วยอัตราที่ลดลง



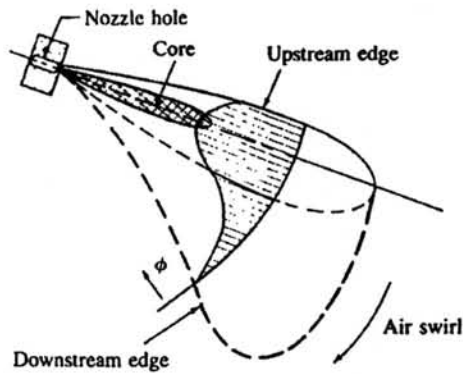
รูปที่ 3-2 แผนผังสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลที่ได้ नियามตัวแปรหลักๆ [1]

รูปที่ 3-3 แสดงสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลที่ทำปฏิกิริยากับผนังภายนอกรูปทรงกระบอกของห้องเผาไหม้รูป disc ในเครื่องอัดความเร็วสูง ภายใต้สภาวะการฉีดดีเซลทั่วไป ผนังกระบอกสูบทำให้สเปรย์แตกออกเป็นครึ่งหนึ่งซึ่งไหลตามเส้นรอบวงในทิศใดทิศหนึ่ง สเปรย์ที่อยู่ติดกันจะบังคับการไหลเข้าในแนวรัศมีไปตามแกนห้องเผาไหม้



รูปที่ 3-3 ภาพร่างขอบเขตไอโรบนอกของสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลจากภาพถ่ายแบบ Shadow graph ความเร็วสูง 12 รูปของเครื่องอัดความเร็วสูง ซึ่งแสดงถึงการกระทำต่อกันของสเปรย์ที่กำลังระเหยกับผนังทรงกระบอกของห้องเผาไหม้ ความดันในการฉีด 60 MPa เวลาระหว่างรูป 0.14 ms [1]

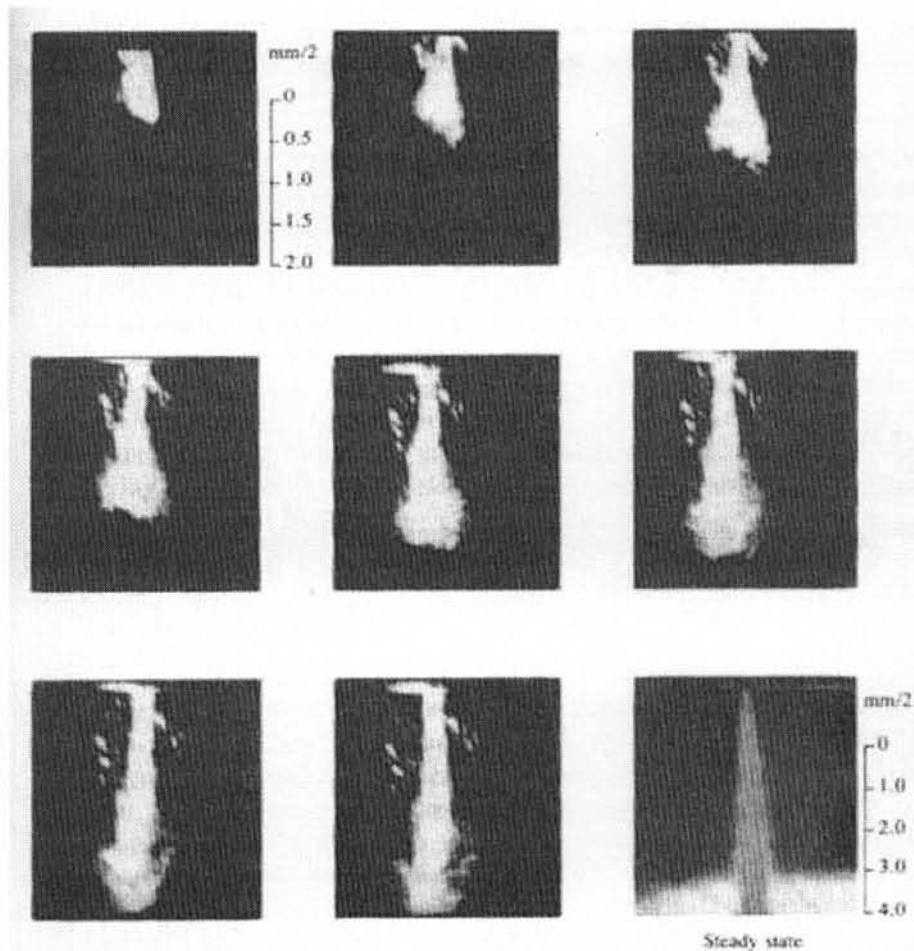
แผนผังของรูปแบบสเปรย์ซึ่งเกิดจากเมื่อ Jet เชื้อเพลิงถูกฉีดในแนวรัศมีออกไปสู่ การไหลแบบ swirl แสดงในรูปที่ 3-4 มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างทั้งทิศทางตามแนวรัศมีและ แนวเส้นสัมผัสระหว่าง jet เริ่มต้นกับอากาศ โครงสร้างของ jet จะซับซ้อนกว่า เมื่อสเปรย์ปะทะกับ อากาศและช้าลง สเปรย์จะโค้งงอมากขึ้นไปตามทิศทางของ swirl ลักษณะที่สำคัญของสเปรย์คือ บริเวณขนาดใหญ่ที่มีไอบรรจุอยู่ที่ปลายทางของแกนของเหลว



รูปที่ 3-4 แผนผังของสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดในแนวรัศมีออกจากแกนห้องเผาไหม้เข้าสู่อากาศหมุน ระบุรูปร่างของการกระจายอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง/อากาศ ( $\phi$ ) ภายใน jet [1]

3.1.2.2 การแตกตัวเป็นละออง ภายใต้สภาวะการฉีดดีเซล ถ้าเชื้อเพลิงมักจะ ก่อให้เกิดสเปรย์รูปกรวยที่ทางออกของหัวฉีด พฤติกรรมแบบนี้ เรียกว่า วิธีการแตกตัวเป็นละออง และเกิดเป็นหยดที่มีขนาดเล็กกว่าหัวฉีดมากที่ความเร็ว jet ค่าต่ำ การแตกตัวเกิดจากการขยาย ตัวอย่างไม่เสถียรของคลื่นพื้นผิวที่เกิดจากความตึงผิว และเกิดเป็นหยดที่ใหญ่กว่าเส้นผ่าน ศูนย์กลาง jet

ลำดับของรูปภาพที่มี Exposure time สั้นมากของการปรากฏของ jet ของเหลว จากหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.34 mm และ  $L_n/d_n = 4$  เข้าไปในไนโตรเจนความดันสูงที่ อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 3-5 รูปแสดงว่า ปลายสเปรย์พุ่งกระทบและสเปรย์แพร่กระจายใน ช่วงแรกของการเดินทางได้อย่างไร ข้อมูลเช่นนี้ถูกใช้เพื่อตรวจสอบผลของความหนาแน่นแก๊สและ ของเหลว, ความหนืดของเหลว และรูปร่างหัวฉีดที่มีต่อการพัฒนาสเปรย์



รูปที่ 3-5 ภาพถ่ายแสดงปรากฏการณ์เริ่มต้นและสภาวะคงตัว (ขวาล่าง) ของสเปรย์เหลวความดันสูง เวลาระหว่างรูป 2.1  $\mu\text{s}$  ของเหลว : น้ำ แก๊สไนโตรเจนที่ 1380 kPa โดยมี  $\Delta p$  คร่อมหัวฉีด 11 MPa เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 0.34 mm [1]

สำหรับการแตกตัวเป็นละอองของ Jet Spray angle  $\theta$  มีค่าตามความสัมพันธ์คือ

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{A} \cdot 4\pi \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{3}}{6} \quad (3-1)$$

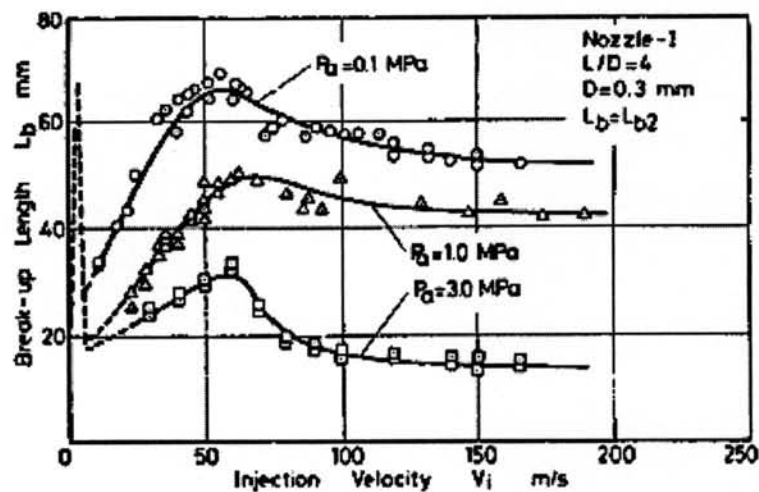
ที่ซึ่ง  $\rho_g$  และ  $\rho_l$  เป็นความหนาแน่นแก๊สและของเหลว และ A เป็นค่าคงที่สำหรับรูปร่างหัวฉีด (ค่าสมการทางตัวเลขของ A คือ  $A = 3.0 + 0.28(L_n/d_n)$  ที่ซึ่ง  $L_n/d_n$  เป็นอัตราส่วนความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด) [1]

แนวโน้มการแตกตัวของ jet สามารถสรุปได้ดังนี้ มุมลู่ออกของ jet เริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นแก๊ส การลู่ออกเริ่มอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ใกล้กับหัวฉีดเมื่อความหนาแน่นก๊าซเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงทางออกหัวฉีด มุมการลู่ออกของ jet เพิ่มขึ้นเมื่อลดความหนืดเชื้อเพลิง โดยที่การลู่ออกเริ่มขึ้นที่ทางออกหัวฉีดเมื่อความหนืดของของเหลวต่ำกว่าค่าหนึ่ง การ

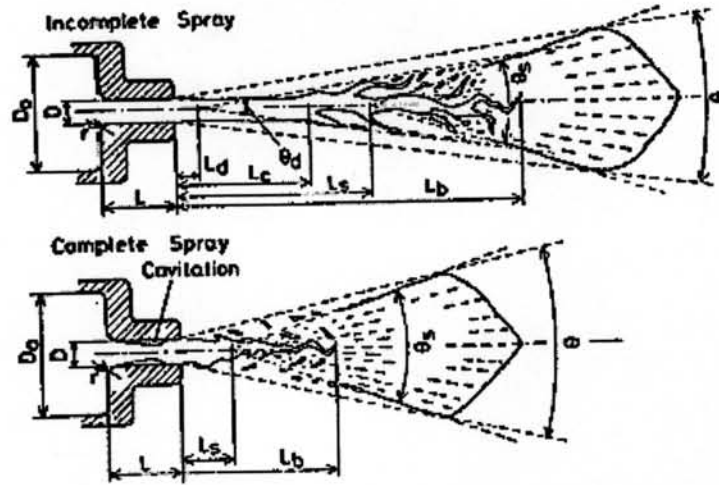


ออกแบบหัวฉีดมีผลต่อการเริ่มต้นของการแตกตัวเป็นละออง มุมลู่ออกของ jet ลดลงเมื่อเพิ่มความยาวหัวฉีด สำหรับที่ความยาวเดียวกัน ทางเข้าหัวฉีดที่มนจะให้ jet ที่ลู่ออกน้อยกว่าทางเข้าหัวฉีดที่คม สังเกตว่าขณะที่ผลทั้งหมดเหล่านี้ ได้มาภายใต้สภาวะที่ไม่เกิดการระเหย กระบวนการพัฒนาสเปรย์เริ่มต้นจะไม่ได้รับผลกระทบจากการระเหย

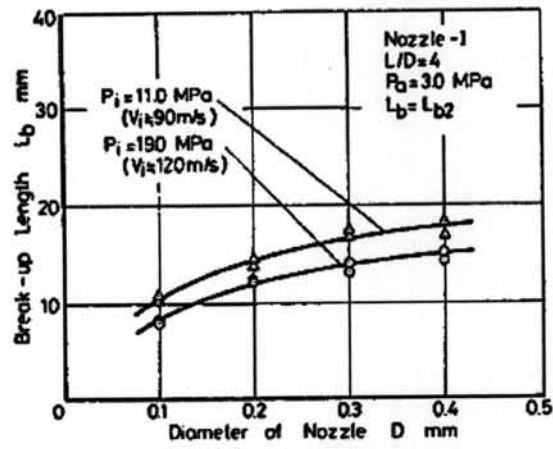
ความยาวที่แตกเป็นละอองฝอย (break-up length) มีผลต่อการกระจายตัวของสเปรย์ จึงมีผลมากต่อการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง รูปที่ 3-6 แสดงผลจากความเร็วของการฉีดเชื้อเพลิง ที่มีต่อ break-up length ที่สภาวะความดันแวดล้อมหลายค่า จะสังเกตได้ว่าช่วงความเร็วการฉีด 20 m/s ถึง 60 m/s ค่า break-up length จะแปรผันตรงตามความเร็วการฉีด โดยในช่วงนี้แกนของเหลวจะถูกทำให้แตกตัวโดย micro turbulence ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าสเปรย์เป็น wavy flow เมื่อเพิ่มช่วงความเร็วการฉีดจาก 60 m/s ถึง 100 m/s ปรากฏว่า break-up length แปรผกผันกับความเร็วการฉีด ในช่วงนี้เรียกว่า incomplete spray เมื่อเพิ่มความเร็วในการฉีดไปเรื่อยๆ พบว่า break-up length จะเข้าสู่ค่าคงที่ ช่วงนี้ถือว่าเป็น complete spray ซึ่งสามารถสังเกตพฤติกรรมของการแตกตัวที่ต่างกันของ incomplete spray และ complete spray ได้จากรูปที่ 3-7 นอกจากนี้ลักษณะของรูหัวฉีดจะมีผลต่อ break-up length เช่นกัน ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3-8 และ 3-9



รูปที่ 3-6 แสดงผลของความเร็วการฉีดที่มีต่อ break-up length [9]

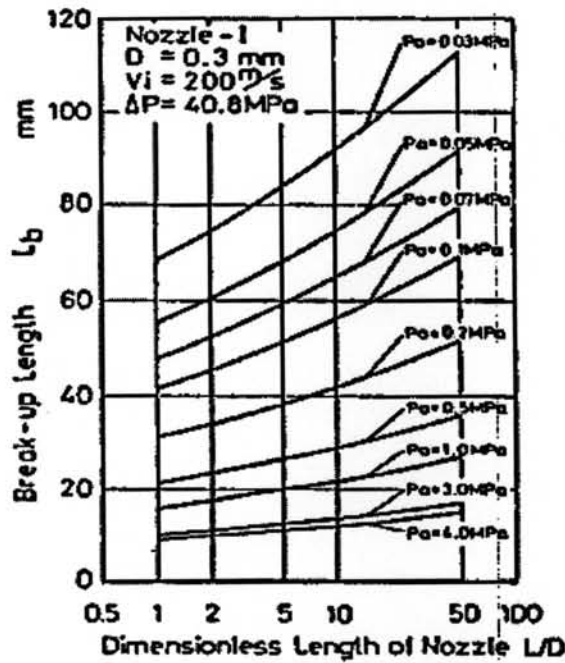


รูปที่ 3-7 แสดงโครงสร้างภายในของสเปรย์แบบ incomplete และ complete [9]



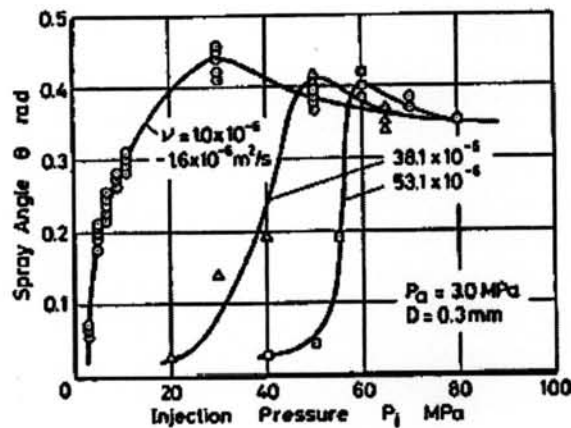
รูปที่ 3-8 แสดงผลของขนาดรูหัวฉีดที่มีต่อ break-up length [9]



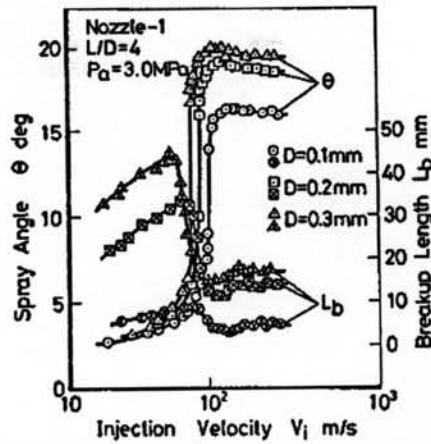


รูปที่ 3-9 แสดงผลของ length/diameter ของหัวฉีดที่มีต่อ break-up length [9]

จากผลการทดสอบพบว่า spray angle จะแปรผันตรงกับความดันการฉีด(ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วจการฉีด)ในช่วง incomplete spray และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อความดันการฉีดอยู่ในช่วง complete spray รวมทั้งความหนืดของเชื้อเพลิงเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงค่าความดันการฉีดที่ทำให้ incomplete spray เปลี่ยนเป็น complete spray มีค่าสูงขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3-10 ส่วนในรูปที่ 3-11 แสดงผลของความเร็วจการฉีดที่มีต่อ spray angle และ break-up length ที่ขนาดหัวฉีดต่างกัน เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่า ช่วงความเร็วจการฉีดจาก 70 m/s ถึง 100 m/s เป็น incomplete spray ส่วนช่วงความเร็วจการฉีดสูงกว่านี้เป็น complete spray ซึ่งขนาดหัวฉีดที่ต่างกันไม่ทำให้ค่าความเร็วจการฉีดขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก incomplete spray เป็น complete spray เปลี่ยนไป



รูปที่ 3-10 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ spray angle [9]



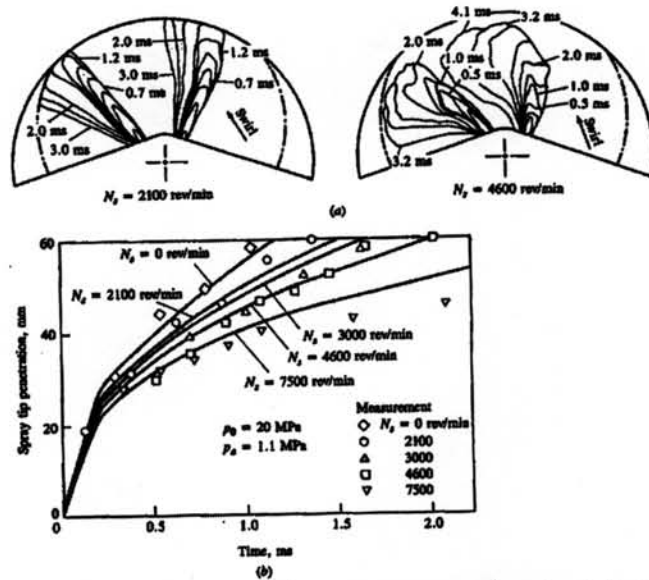
รูปที่ 3-11 แสดงผลของความเร็วจุดที่มีต่อ spray angle และ break-up length [9]

3.1.2.3 Spray Penetration ความเร็วและระยะที่สเปรย์พุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้มีส่วนสำคัญที่มีผลต่ออัตราการใช้อากาศ และการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ในเครื่องยนต์บางแบบที่ผนังห้องเผาไหม้ร้อนและมี swirl สูง ต้องการให้น้ำมันฉีดไปกระทบผนัง แต่ในระบบดีเซล DI หลายสเปรย์ ถ้าพุ่งมากไปจะกระทบผนังที่เย็น ทำให้อัตราการผสมต่ำและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ถ้าพุ่งน้อยเกินไป ทำให้การใช้อากาศไม่ดี เนื่องจากอากาศที่รอบนอกของห้องเผาไหม้ไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิง ดังนั้นการพุ่งกระทบของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวภายใต้สภาวะปกติดังที่พบในเครื่องยนต์ดีเซลจะได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง

มีหลายความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับข้อมูลทางการทดลอง และทฤษฎี turbulent jet ของแก๊ส ได้ถูกเสนอสำหรับการพุ่งกระทบของสเปรย์เชื้อเพลิง ซึ่งทำนาย penetration  $S$  ของปลายสเปรย์เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้สำหรับการฉีดไปในอากาศนี้ ดังที่เกิดในเครื่องยนต์ DI ขนาดใหญ่กว่าโดยเป็นฟังก์ชันของเวลา [1]

$$S = 3.07 \left[ \frac{\Delta P}{\rho_g} \right]^{1/4} (td_n)^{1/2} \left( \frac{294}{T_g} \right)^{1/4} \quad (3-2)$$

โดย  $\Delta P$  เป็นความดันตกคร่อมที่หัวฉีด,  $t$  เป็นเวลาหลังจากเริ่มการฉีด และ  $d_n$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ทุกปริมาณแสดงในหน่วย SI นั่นคือ  $t$  เป็นวินาที,  $S$  และ  $d_n$  เป็นเมตร,  $\Delta P$  เป็น pascal,  $\rho_g$  เป็นกิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ  $T_g$  เป็นเคลวิน



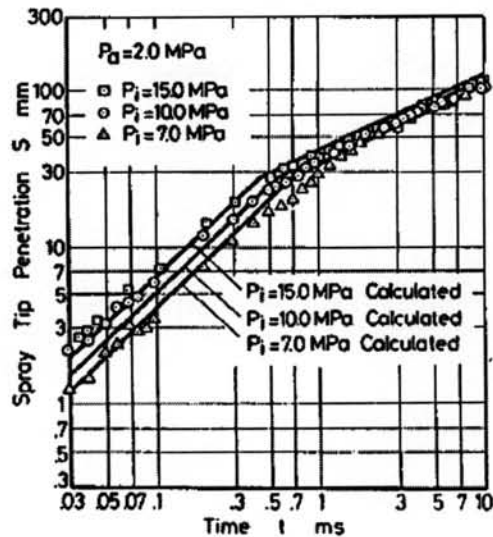
รูปที่ 3-12 (a) ขอบเขตภายนอกที่วัดได้ของสเปรย์ที่ถูกฉีดเข้าไปในอากาศหมุน

(b) tip penetration ของสเปรย์เป็นฟังก์ชันของเวลาสำหรับอัตราของอากาศหมุนต่างๆ เส้นทึบแสดงสมการ (3-2) [2]

ผลของการเผาไหม้ที่มี swirl ที่มีต่อการพุ่งของสเปรย์ถูกแสดงใน รูปที่ 3-12 ซึ่งแสดงว่ารูปร่างสเปรย์และตำแหน่งจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อ swirl เพิ่มขึ้น การพุ่งของสเปรย์ที่สัมพันธ์กับ swirl  $S_s$  เทียบกับการพุ่งเทียบเท่าที่ไม่มี swirl  $S$  คือ

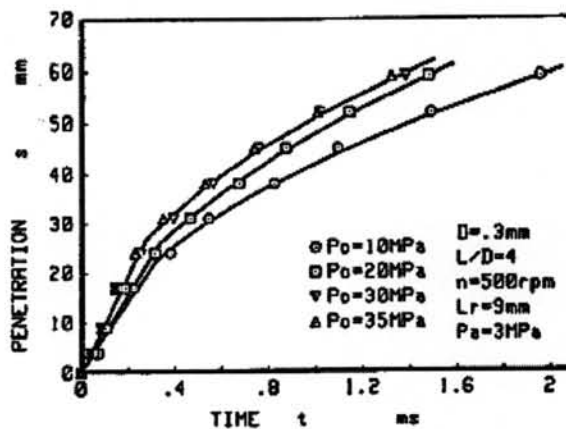
$$\frac{S_s}{S} = \left( 1 + \frac{\pi R_s N S}{30 v_j} \right)^{-1} \quad (3-3)$$

โดย  $R_s$  คือ อัตราส่วนอากาศหมุน (swirl ratio) ซึ่งเท่ากับอัตราอากาศหมุนเป็นรอบต่อนาทีหารด้วยความเร็วเครื่องยนต์  $N$  (รอบต่อนาที) และ  $v_j$  เป็นความเร็ว jet เชื้อเพลิงเริ่มต้น (เมตรต่อวินาที) อากาศหมุนจะลดทั้งการพุ่งของสเปรย์และแพร่กระจายสเปรย์ออกไปได้เร็วกว่า



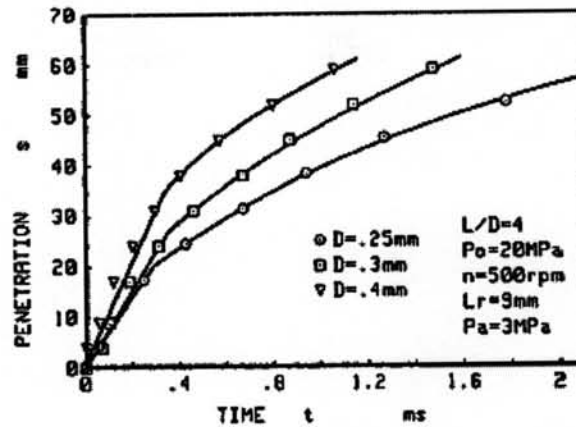
รูปที่ 3-13 แสดง spray tip penetration ที่ความดันการฉีดต่างกัน [9]

ในรูปที่ 3-13 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ spray tip penetration ที่ความดันการฉีดต่างกัน โดยเป็นความสัมพันธ์แบบ logarithmic ทั้งแกน X และแกน Y ซึ่งจะเห็นว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยช่วงเวลาการฉีดจาก 0.03 ms ถึงประมาณ 0.5 ms เส้นความสัมพันธ์มีค่าความชันเป็น 1 เมื่อเลยช่วงเวลานี้ เส้นความสัมพันธ์จะมีความชันเป็น 0.5 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 0.03 ms ถึง 0.5 ms spray จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้าลงจนเป็น steady spray ที่มี penetration คงที่



รูปที่ 3-14 แสดงผลของ valve opening pressure ที่มีต่อ spray tip penetration [9]

ในรูปที่ 3-14 แสดงผลของ valve opening pressure ที่มีต่อ spray tip penetration ซึ่งจะเห็นได้ว่า spray penetration แปรผันตรงตามค่า valve opening pressure จึงสามารถกล่าวได้ว่า spray tip penetration จะถูกควบคุมโดย injection momentum ที่จุดเริ่มต้นของการฉีด



รูปที่ 3-15 แสดงผลของขนาดหัวฉีดที่มีต่อ spray tip penetration [9]

รูปที่ 3-15 แสดงผลของขนาดหัวฉีดที่มีต่อ spray tip penetration สังเกตได้ว่าเมื่อลดขนาดหัวฉีดจะทำให้ spray tip penetration ล้นลงที่เวลาเดียวกัน

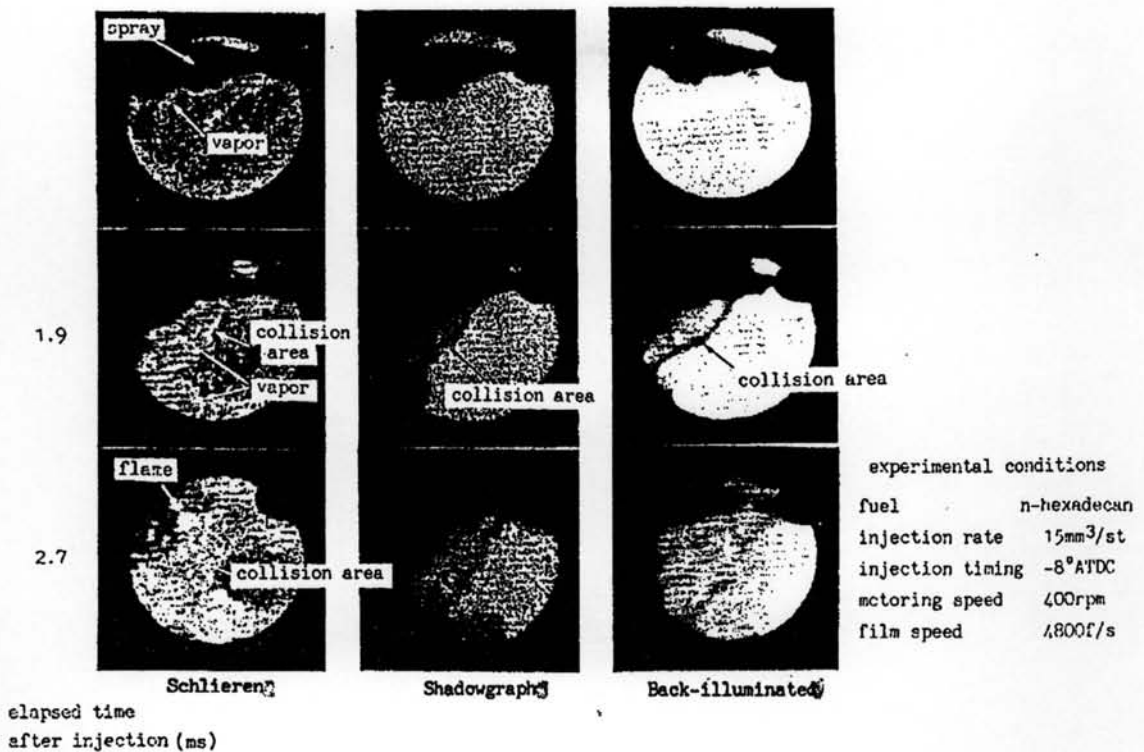
3.1.2.4 การระเหยของสเปรย์ Yasuhide TANI, Akinori SAITO และ Masatoshi YAMADA [10] ได้ศึกษาการระเหยของสเปรย์เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ที่มีหัวฉีดเดี่ยวและหัวฉีดแบบ swirl ในเครื่องยนต์ DI ขนาดเล็ก โดยการเปรียบเทียบภาพถ่ายที่ถ่ายโดย high-speed Schlieren, Shadowgraph และ Back-illuminated film เพื่อเตรียมโครงสร้างอย่างละเอียดของบริเวณที่เป็นไอ

เชื้อเพลิงเหลวที่ถูกฉีด ซึ่งแตกตัวออกเป็นหยดเล็กๆ ใกล้เคียงกับทางออกของหัวฉีดเพื่อก่อตัวเป็นสเปรย์จะต้องระเหยก่อนที่จะผสมกับอากาศและเผาไหม้ไป การสังเกตกระบวนการระเหยของสเปรย์เชื้อเพลิงในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ จะช่วยในการทำนายสภาวะการเผาไหม้ที่ตามมาได้ High-speed Schlieren, Shadowgraph และ Back-illuminated films ให้ผลดังนี้

Schlieren film: ลำแสงโปร่งใสที่ไม่ไวต่อ density gradients ของส่วนทดสอบ จะถูกปิดที่ Schlieren stop จะสังเกตเฉพาะบริเวณไอที่มี density gradients เท่านั้นในลักษณะของภาพที่สว่าง

Shadowgraph film : ทั้งส่วนของสเปรย์ที่ไม่ผ่านลำแสง และบริเวณไอที่มีการเปลี่ยนแปลงใน density gradients จะถูกสังเกตในลักษณะของภาพที่มีมืด

Back-illuminated film : จะสังเกตเฉพาะส่วนของสเปรย์ที่ไม่ผ่านลำแสงเท่านั้น



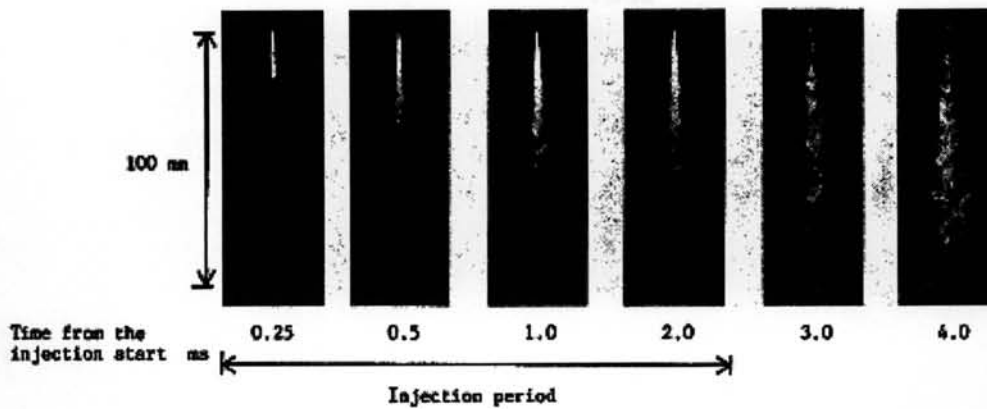
รูปที่ 3-16 การเปรียบเทียบฟิล์ม 3 ชนิดระหว่างการระเหยของสเปรย์ (หัวฉีดเดี่ยว) [10]

รูปที่ 3-16 แสดงแต่ละภาพถ่ายของกระบวนการระเหยของสเปรย์จากอุปกรณ์หัวฉีดเดี่ยวที่ถ่ายโดยระบบทั้งสาม กระบวนการระเหยจากหัวฉีดเดี่ยวเกิดขึ้นได้ดังนี้ เมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนนอกของสเปรย์จะแตกตัวเป็นละอองโดยแรงเฉือนของอากาศรอบๆ ทำให้เกิดการระเหย จากนั้นปลายสเปรย์จะไปถึงผนังซึ่งจะกระทบอย่างแรง เพราะว่าการพุ่งกระทบสูง ทำให้เกิดบริเวณที่มีการชนของผนัง การระเหยจะเกิดต่อไปพร้อมกับการขยายตัวของบริเวณที่มีการชนกับผนัง

A. Azetsu และคณะ [11] ได้ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของสเปรย์ดีเซล โดยการตรวจดูแบบ 2 มิติของสเปรย์ที่ไม่ระเหย, ขอบเขตไม่แน่นอนและไม่สม่ำเสมอ ด้วยเทคนิค laser sheet illumination โดยศึกษากลไกของ jet break-up ซึ่งถูกศึกษาในเชิงของภาพถ่าย และมีการบันทึกความสำคัญของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง liquid surface-air, liquid turbulence และ cavitation ที่มีต่อกลไกการเกิดสเปรย์ วัด break-up length โดยใช้ probe สอดเข้าไป จากนั้นอภิปรายผลของความดันรอบๆ และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ขนาด droplet เฉลี่ยและการแจกจ่ายของความหนาแน่นของ droplets จะถูกศึกษาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์โดยเลเซอร์

ในการทดลอง เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้สเปรย์ที่ถูกเติมด้วยไนโตรเจนที่อัดความดันที่อุณหภูมิห้อง ความดันจะถูกเปลี่ยนจาก 0.1 MPa เป็น 1.53 MPa และจะศึกษาผลของความดันรอบๆ ที่มีต่อรูปร่างและโครงสร้างของสเปรย์ที่ไม่สม่ำเสมอ, รูปร่างไม่แน่นอนและไม่ระเหย



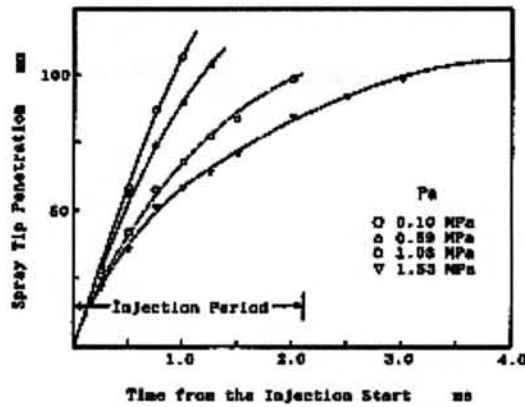


รูปที่ 3-17 ภาพถ่ายแสดงการพัฒนาของสเปรย์ที่ความดันแวดล้อม  $P_g = 1.53$  MPa [11]

ภาพถ่ายในรูปที่ 3-17 แสดงภาพถ่ายของสเปรย์ภายใต้ความดันแวดล้อมที่ 1.53 MPa ที่จังหวะ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 ms หลังจากเริ่มต้นการฉีด เมื่อปลายสเปรย์ไปถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับสภาวะของการฉีด รูปร่างของปลายสเปรย์จะเปลี่ยนไปทันที หลังจากการเปลี่ยนรูปร่างนี้จะสามารถเห็นโครงสร้าง branch-like ซึ่งจะแผ่ขยายย้อนกลับจากแกนกลางของสเปรย์

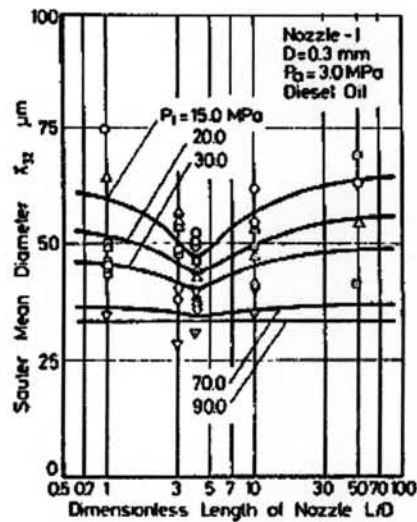
ระหว่างช่วงเวลากการฉีด (0.25 ms – 2 ms) โครงสร้าง branch-like นี้จะไม่สามารถเห็นได้ชัด โครงสร้าง branch-like นี้สามารถมองเห็นได้ชัดเจนขึ้นหลังจากสิ้นสุดการฉีด (3.0 ms, 4.0 ms) โครงสร้าง branch-like นี้จะชัดเป็นพิเศษในบริเวณใกล้ๆหัวฉีด ข้อเท็จจริงนี้บ่งชี้ว่าจะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity) อย่างมากในการกระจายของ droplets ของเชื้อเพลิงในสเปรย์ในระยะยาว และจะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นระหว่างช่วงการฉีด

นอกเหนือจากโครงสร้าง Branch-like นี้ ยังมีแกนที่หนาแน่นมากที่ศูนย์กลางของสเปรย์ระหว่างช่วงการฉีด จากการตรวจสอบภาพถ่ายอย่างใกล้ชิด จะสังเกตเห็นได้ว่าแกน (core) นี้จะยืดขยายเกือบเป็นแนวตรงไปสู่บางจุดที่ใกล้ปลายหัวฉีดมาก และหลังจากจุดนี้จะคดเคี้ยวเล็กน้อย ซึ่งทำให้แกนของสเปรย์มีรูปร่างหยัก ความยาวการหยักและขนาดของมันจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย เมื่อมันเคลื่อนที่ไกลออกไปจากปลายหัวฉีดในช่วงการฉีด penetrating length จะยืดออกไปโดยตัวมันเอง โดยจะลดอัตราการเติบโตตามเวลาและจะสั้นลงเมื่อเพิ่มความดันแวดล้อม ดังรูปที่ 3-18



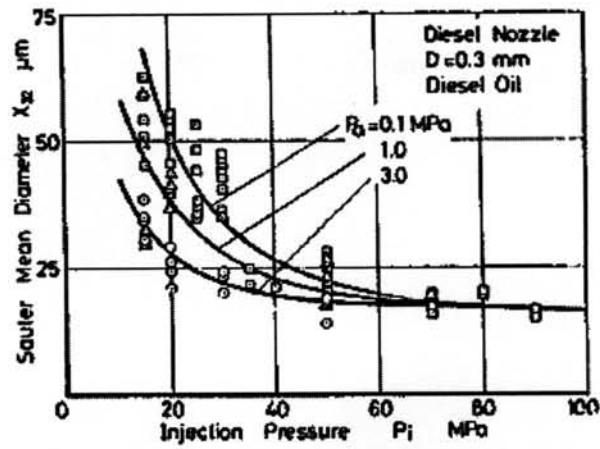
รูปที่ 3-18 การพัฒนาของ tip penetration ของสเปรย์ตามเวลา [11]

### 3.1.2.5 การกระจายของขนาดหยดเชื้อเพลิง (Droplet size distribution)

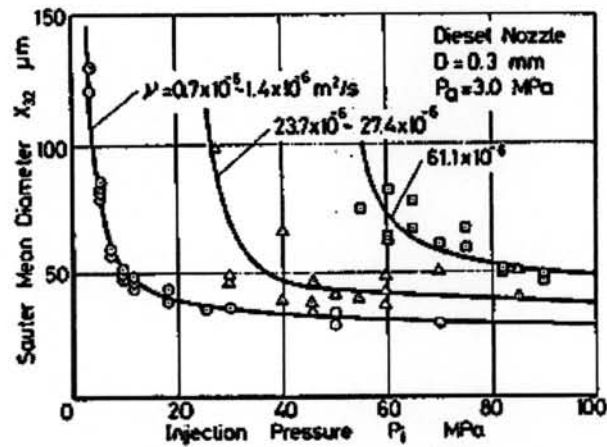


รูปที่ 3-19 แสดงผลของ length/diameter ของรูหัวฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter [9]

ในรูปที่ 3-19 แสดงผลของลักษณะรูหัวฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter ที่ความดันการฉีดต่างกัน โดยที่ความดันการฉีดต่ำ จะเห็นว่า Sauter mean diameter มีค่าต่ำที่สุดที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (length/diameter, L/D) ของรูหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งเมื่อเพิ่มความดันการฉีดให้สูงขึ้นจะเห็นว่า ลักษณะเด่นดังกล่าวเริ่มปรากฏน้อยลง จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ที่ช่วงความดันการฉีดสูง

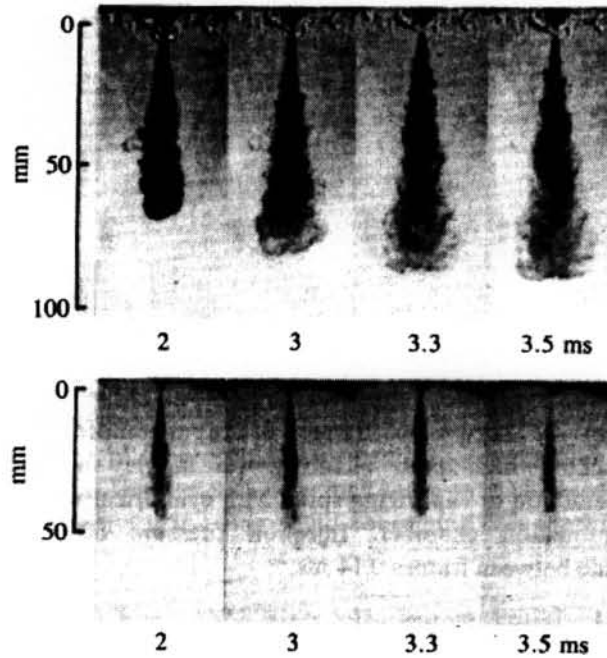


รูปที่ 3-20 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter [9]



รูปที่ 3-21 แสดงผลของความหนืดและความดันการฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter [9]

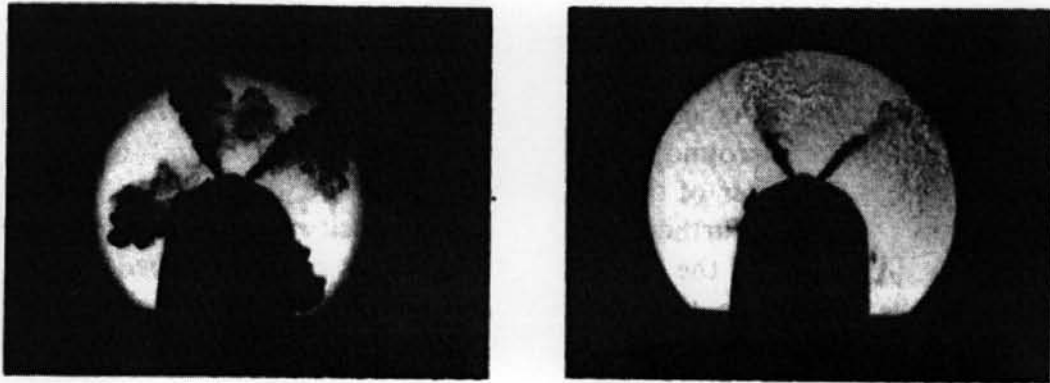
รูปที่ 3-20 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter ที่ความดันแวดล้อมต่างกัน ส่วนรูปที่ 3-21 แสดงผลของความหนืดที่มีต่อ Sauter mean diameter ที่ความดันการฉีดต่างกัน พบว่าเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ Sauter mean diameter มีขนาดใหญ่ขึ้น แม้จะเพิ่มความดันการฉีดให้สูงมากแล้วก็ตาม



รูปที่ 3-22 แสดงภาพถ่ายแบบ shadowgraph และแบบ back-illuminated ของสเปรย์ที่กำลังระเหย ซึ่งถูกฉีดเข้าสู่แก๊สไนโตรเจนที่ความดัน 3.4 MPa อุณหภูมิ 670 K ใน rapid compression machine โดยรูปบนแสดงทั้งส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นไอ ส่วนรูปล่างแสดงเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลว [1]

ในรูปที่ 3-22 แสดงภาพถ่ายของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดพ่นเข้าไปในแก๊สไนโตรเจนที่นิ่ง โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพที่แตกต่างกัน 2 แบบ ทำให้ได้ภาพแบบรวมทั้งบริเวณไอและของเหลว และภาพบริเวณแกนของเหลวเท่านั้น หยอดของเชื้อเพลิงที่อยู่ขอบนอกของสเปรย์จะระเหยก่อน ทำให้เกิดสารผสมระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศที่ห่อหุ้มรอบแกนของเหลว จึงเป็นผลให้อัตราส่วนผสมมีค่าสูงสุดที่แนวกึ่งกลาง และลดลงเป็นศูนย์ (อากาศที่ยังไม่ได้ผสมกับเชื้อเพลิง) ที่ขอบของสเปรย์

เนื่องจากในระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ IDI แบบ swirl chamber จะใช้การไหลวนของอากาศเพื่อเพิ่มอัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ การไหลวนของอากาศจะทำให้โครงสร้างของสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดพ่นเข้าไปในห้องเผาไหม้เปลี่ยนแปลงไป ในรูปที่ 3-23 แสดงภาพถ่ายแบบ schlieren ของสเปรย์เชื้อเพลิง ซึ่งถูกฉีดที่แกนกลางของห้องเผาไหม้ล่วงหน้าในเครื่องยนต์ CI แบบ IDI ที่มีอากาศไหลวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูง โดยจะสังเกตเห็นว่าเกิดการกระทำระหว่างอากาศที่กำลังไหลวนกับสเปรย์ทั้งในส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นไอ รวมทั้งสเปรย์ยังเกิดการปะทะกับผนังด้วย



รูปที่ 3-23 แสดงภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง ซึ่งถูกฉีดเข้าสู่อากาศไหลวนในห้องเผาไหม้ ล่วงหน้าแบบโปร่งแสงของเครื่องยนต์ IDI แบบพิเศษ โดยภาพด้านซ้าย เป็นภาพที่ถ่ายด้วยความไวสูง แสดงถึงขอบเขตของบริเวณที่เป็นไอของสเปรย์ ภาพด้านขวา เป็นภาพที่ถ่ายด้วยความไวต่ำ แสดงถึงบริเวณที่เป็นแกนของเหลว (สีเข้ม) ในความสัมพันธ์กับบริเวณที่เป็นไอ (สีจาง) [1]

#### 3.1.2.6 กระบวนการจุดระเบิดของสเปรย์ดีเซล T.Ishiyama,

K.Miwa และ O. Horikoshi [12] ได้อธิบายถึงกระบวนการจุดระเบิดของสเปรย์ดีเซล องค์ประกอบของส่วนผสมเชื้อเพลิง-อากาศที่เกิดขึ้นในช่วง ignition delay ถูกวัดโดยการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในอากาศอุณหภูมิสูงในเครื่องอัดความเร็วสูง องค์ประกอบของส่วนผสมถูกเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบการแตกตัวทางความร้อนเพียงอย่างเดียวโดยใช้ flow reactor

การผสมเชื้อเพลิง-อากาศระหว่างช่วง Ignition delay มีอิทธิพลอย่างมากต่อกระบวนการเผาไหม้ทั้งหมดในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กความเร็วสูง จึงเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุม ignition delay เพื่อลดไอเสียของเขม่า,  $\text{NO}_x$  และไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (Unburned Hydrocarbon, UHC) โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง

การศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการเกิดของส่วนผสมโดยใช้เครื่องอัดความเร็วสูง แสดงว่าแม้กระทั่งก่อนการจุดระเบิด ส่วนของเชื้อเพลิงจะแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนในสถานะแก๊ส ซึ่งจะปลดปล่อยความร้อนออกมามาก ในการศึกษาครั้งนี้ เชื้อเพลิงขององค์ประกอบตัวอย่างถูกเลือกเพื่อชี้ชัดกระบวนการจุดระเบิด ส่วนผสมถูกวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้วิธีสุ่มตัวอย่างแก๊สทั้งหมด ขึ้นแรกใช้เทคนิคนี้ ลักษณะขององค์ประกอบส่วนผสมจะถูกเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดความเร็วสูง (Rapid Compression Machine, RCM) และ flow reactor ขั้นที่สองผลจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับผลการบันทึกความดัน-เวลา และการพัฒนาของสเปรย์ สุดท้ายจะอภิปรายกระบวนการเกิดของส่วนผสมเริ่มต้นที่สามารถกระตุ้นการเผาไหม้เริ่มต้น

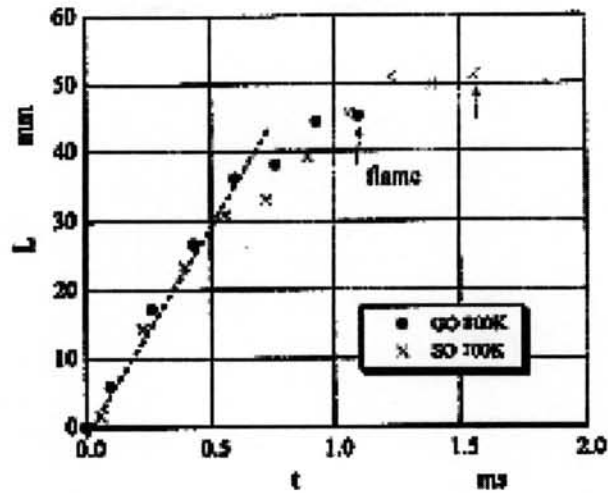
ในการศึกษานี้จะใช้ ignition delay 2 ชนิด คือ pressure recovery delay  $\tau$  ถูกคำนวณจากโค้งความดัน-เวลา ซึ่งวัดโดย piezoelectric transducer และโค้งการยกตัวของเข็มหัวฉีดโดย photoelectric detector เวลาการจุดระเบิดถูกตัดสินจากผลต่างความดัน  $P_f - P_g$  โดย  $P_f$  คือความดันที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ปกติและ  $P_g$  จากการทดสอบซึ่งอัดอากาศโดยไม่มี การฉีดเชื้อเพลิง โดยที่ delay ถูกนิยามว่าเป็นช่วงเวลาจากเริ่มต้นการฉีดถึงเวลาเมื่อ  $P_f - P_g$  เป็นค่า บวกอีกครั้งหลังจากที่ลดลงเป็นค่าลบเนื่องมาจากการดูดความร้อนของสเปรย์ ส่วน illumination delay  $\tau_i$  ได้มาจากการปล่อยแสงช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ ซึ่งตรวจพบโดย phototransistor ที่มี มุมมองกว้าง

องค์ประกอบของส่วนผสมในช่วง Ignition delay - ชั้นแรก องค์ประกอบของ ส่วนผสมในช่วง ignition delay ถูกตรวจสอบโดยการฉีด gas oil เข้าไปในอากาศนิ่งที่ถูกอัดร้อน 800 K ไฮโดรคาร์บอนเบา ( $C_1 - C_4$ ) ถูกตรวจพบว่าเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา และการเพิ่มขึ้น ของไฮโดรคาร์บอน  $C_6 - C_8$  ถูกสังเกตเห็นเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงมาตรฐาน เป็นการแนะนำ เชื้อเพลิงดำเนินการแตกตัวต่อไป และผลผลิตไฮโดรคาร์บอนเบา ก่อนจะสังเกตเห็นการปลดปล่อย ความร้อนอย่างเด่นชัด

เนื่องจาก gas oil ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ดูเหมือนว่าเกือบเป็นไปได้ที่จะตัดสินโดยสิ้นเชิงว่าชนิดใดถูกเหนี่ยวนำจากเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาใดๆ ในการแก้ปัญหา นี้ จะใช้ simple oil ที่อุณหภูมิอากาศเดียวกันที่เริ่มต้นการฉีด รูปแบบการปลดปล่อยความร้อนของ simple oil จะมีคุณลักษณะที่กระจัดกระจายมากกว่าเนื่องจากว่ามี ignition delay สั้นกว่า gas oil ดังนั้นอุณหภูมิอากาศจะลดลงเหลือ 700 K สำหรับ simple oil เพื่อว่าโค้งอัตราการ ปลดปล่อยความร้อนสอดคล้องโดยประมาณกับโค้งของ gas oil ที่ 800 K ที่อุณหภูมินี้ simple oil มี pressure recovery delay ประมาณ 3 ms

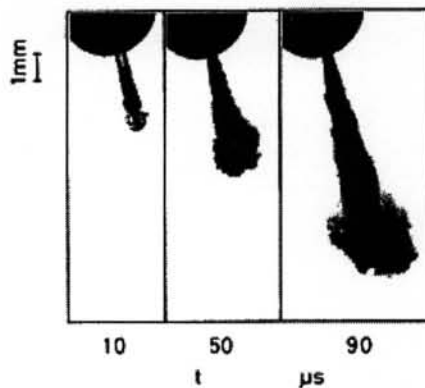
ฝั่งความดัน-เวลา และกระบวนการจุดระเบิด - illumination delay  $\tau_i$  มักจะสั้น กว่า pressure recovery delay  $\tau$  เสมอ เปลวไฟที่เริ่มต้นมองเห็นได้จะปรากฏตรงเวลาที่  $P_f - P_g$  มี ค่าน้อยสุด หรือจุดที่เริ่มต้นการปล่อยความร้อน นั่นคือเริ่มต้นของการปรากฏของการปลดปล่อย ความร้อน ไม่ตรวจพบการปล่อยแสงระหว่างกระบวนการสุ่มตัวอย่างของส่วนผสม ซึ่ง หมายความว่า การสลายตัวของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นก่อนเปลวไฟที่สามารถมองเห็นได้จะปรากฏ และ ความร้อนที่เด่นชัดเริ่มที่จะถูกปลดปล่อย ดังนั้นการเผาไหม้ต้องเริ่มต้นในช่วงต้นของการผสม





รูปที่ 3-24 Penetration ของสเปร์ยก่อนการจุดระเบิด [12]

การพัฒนาของสเปร์ย์และกระบวนการจุดระเบิด - รูปที่ 3-24 แสดง tip penetration L ที่หาจากรูปถ่ายความเร็วสูง มีการพล็อต 2 ชนิดที่สอดคล้องกับการฉีด gas oil เข้าไปในอากาศ 800 K และการฉีด simple oil เข้าไปในอากาศ 700 K penetration L ทั้งสองเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับเวลาถึงประมาณ 0.5 ms และอัตราการเติบโตลดลงหลังจากนั้น การศึกษาบางอย่างแสดงว่าสเปร์ย์แตกตัวเป็นละอองเล็กน้อยในช่วงที่ penetration เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ช่วงเวลานี้เรียกว่า "break-up time"



รูปที่ 3-25 รูปภาพโดยละเอียดของสเปร์ย์เริ่มต้น [13]

รูปที่ 3-25 แสดงภาพถ่ายของสเปร์ย์ที่ไม่ระเหยในไนโตรเจน 1 Mpa ที่ถ่ายด้วย nano-spark light source [13] สเปร์ย์ในภาพถ่ายเหล่านี้อยู่ในส่วนเริ่มต้นของ break-up time (ในกรณีนี้คือ 0.4 ms) จากการมองอย่างกว้างๆ สเปร์ย์ทั้งหมดสามารถถูกกระทำให้เป็นการไหลของเชื้อเพลิงเหลว แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามองย่อลงไป ส่วนของเชื้อเพลิงเล็กๆถูกสังเกตเห็นแล้ว ในเส้นรอบนอกของการไหลของเชื้อเพลิงที่เวลา 90  $\mu$ s จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายนี้ ส่วนเล็กๆเหล่านี้ มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10  $\mu$ m ส่วนเล็กๆที่ว่า สามารถระเหยได้โดยง่ายเพื่อป้อนส่วนผสม

เริ่มต้นถ้าอุณหภูมิแวดล้อมสูง ส่วนผสมที่ก่อตัวด้วยวิธีนี้จะมีหน้าที่เริ่มต้นการเผาไหม้เริ่มแรกที่ทำให้เกิดการระเหยและเผาไหม้ต่อเนื่องในเวลาต่อมา

จากภาพถ่ายความเร็วสูงของสเปรย์ในอากาศอุณหภูมิและความดันสูง สังเกตได้ว่าเปลวไฟที่มองเห็นได้ในตอนแรก แทบจะไม่ปรากฏที่ปลายของสเปรย์ แต่มักจะถูกพบในขอบกลางของสเปรย์ ใกล้กับปลายหัวฉีดเมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในอากาศหนึ่ง เชื้อเพลิงที่พื้นผิวของสเปรย์มีแนวโน้มที่จะเริ่มต้นการเผาไหม้เพราะว่ามันมักจะสัมผัสกับอากาศที่ล้อมรอบ ส่วนผสมที่ถูกให้ความร้อนโดยการเผาไหม้จะเคลื่อนที่เข้าไปในสเปรย์ และจะให้ enthalpy แก่ส่วนในของสเปรย์ โดยการให้ความร้อนนี้ จะเป็นการเริ่มต้นการสลายตัวทางความร้อนหรือการเผาไหม้ภายใต้สภาวะเชื้อเพลิงหนา ณ ตรงนั้น อุณหภูมิของส่วนผสมจะลดลงเนื่องจากการดูดกลืนความร้อนโดยการสลายตัวทางความร้อน ในบริเวณใกล้เคียงของปลายสเปรย์ เชื้อเพลิงจะแตกตัวเป็นละอองได้ดี เป็นหยดหลายหยดซึ่งสามารถระเหยได้ง่ายและเริ่มสลายตัว นอกจากนี้ความสามารถในการผสมนั้นมียากเสียจนกระทั่งส่วนผสมร้อนที่ก่อตัวในชั้นนอกมีแนวโน้มที่จะถูกนำเข้าไปในส่วนในของสเปรย์ ซึ่งสามารถคาดได้ว่าเป็นการยากสำหรับส่วนผสมร้อนที่จะรักษาอุณหภูมิของมันและเร่งปฏิกิริยา แต่ในทางกลับกัน ในส่วนต้นทางของสเปรย์ กระแสหมุนวนของการผสมจะน้อยมากจนกระทั่งส่วนผสมสามารถรักษาอุณหภูมิของมันได้ เนื่องจากมีเชื้อเพลิงที่แตกตัวเป็นละอองเล็กน้อยที่ถูกทำให้ร้อนที่ใกล้ๆกับมัน ผลที่ตามมาคือส่วนผสมร้อนที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนอย่างรวดเร็วควรมีอยู่ที่ขอบกลางของสเปรย์ ขนาดของส่วนผสมนั้นน้อยสอดคล้องกับขนาดกระแสหมุนวนที่ตำแหน่งนั้น จึงเป็นที่คาดเดาว่าอุณหภูมิอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเริ่มต้นกระบวนการเผาไหม้ตอนต้น

ในปี 1997 Dec[14] ได้นำเสนอแบบจำลองของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI บนพื้นฐานจากผลการทดสอบ โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการเผาไหม้ของสเปรย์ดีเซลในเครื่องยนต์ CI โดยในรูปที่ 3-26 แสดงภาพแบบจำลองของพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในระหว่างการฉีดเชื้อเพลิง โดยเรียงลำดับตามองศาข้อเหวี่ยงหลังจากเริ่มการฉีดเชื้อเพลิง (After the Start of Injection, ASI) พร้อมทั้งแสดงพารามิเตอร์ 6 ตัว คือ ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel), ส่วนผสมอากาศและไอเชื้อเพลิง (Vapor-air mixture), Poly Aromatic Hydrocarbons (PAHs), บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ด้วยเปลวไฟแบบ diffusion flame, บริเวณที่เกิด chemiluminescence emission และแสดงความเข้มข้นของเขม่า (Soot concentration) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ที่  $1.0^\circ$  ASI อยู่ในช่วง ignition delay phase ในขณะที่ฉีดเชื้อเพลิงเหลวเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จะเกิดการแทรกของแกนเชื้อเพลิงเหลวเข้าไปในอากาศร้อน จึงทำให้เกิดการระเหย

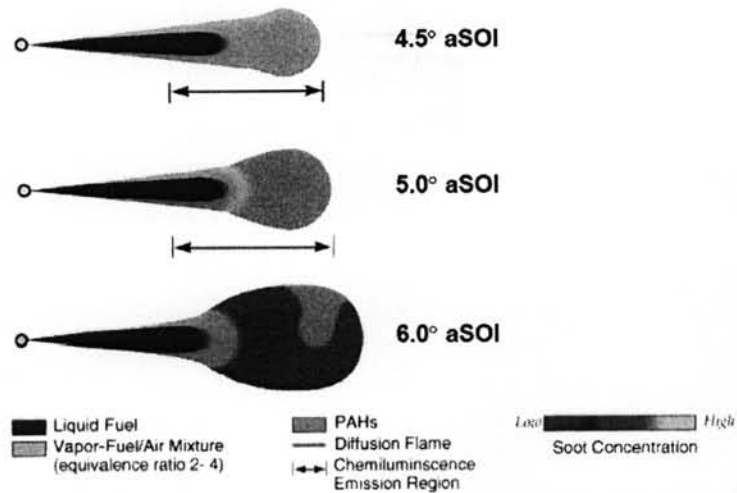
ตามด้านข้างของแกนเชื้อเพลิงเหลว โดยจากภาพทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า ตลอดกระบวนการฉีดเชื้อเพลิง, ความยาวของแกนเชื้อเพลิงเหลวเกือบจะคงที่ตลอดช่วงเวลาในการฉีด

- ที่ประมาณ  $4.5^\circ$  ASI เริ่มเกิด vapor head vortex ที่ส่วนนำของสเปรย์เชื้อเพลิง โดยกลุ่มส่วนผสมของอากาศและไอเชื้อเพลิงใน head vortex จะมีค่าอัตราส่วนผสมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 ตลอดพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์

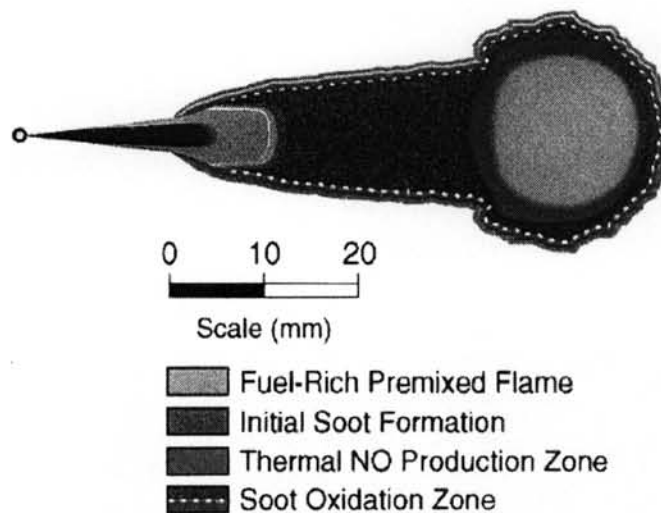
- ที่ประมาณ  $5.0^\circ$  ASI เริ่มเกิด premixed combustion ที่ส่วน head vortex ซึ่งเป็นบริเวณที่มีส่วนผสมหนา ทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1600 K รวมทั้งทำให้เกิด PAHs และเขม่า โดยความเข้มข้นของเขม่าจะมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์

- ที่ประมาณ  $6.5^\circ$  ASI จะเกิดเปลวไฟแบบ turbulent diffusion flame ที่ขอบของสเปรย์ โดยเกิดบริเวณรอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ในช่วง initial premixed stage ซึ่งการเกิด turbulent diffusion flame นี้ ถือว่าเป็นการเริ่มเปลี่ยนจากการเผาไหม้แบบ premixed เป็นการเผาไหม้ในช่วง mixing-controlled phase ในขณะที่ส่วนผสมเริ่มเข้าใกล้ stoichiometric โดยเปลวไฟแบบ diffusion flame จะทำให้เกิดอนุภาคเขม่าเพิ่มขึ้นที่ขอบของสเปรย์และความเข้มข้นของเขม่าจะเพิ่มขึ้นตลอดใน head vortex ที่ส่วนนำของสเปรย์

- ที่  $8.0^\circ$  ASI สเปรย์อยู่ในสถานะ quasi-steady หรือเป็น complete spray ซึ่งลักษณะทั่วไปของสเปรย์เริ่มไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างชัดเจน ดังที่ได้แสดงโครงสร้างโดยละเอียดในรูปที่ 3-26 และรูปที่ 3-27 ในขณะที่สเปรย์กำลังขยายตัวเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ช่วงนี้ถือว่าการเผาไหม้อยู่ในช่วง mixing-controlled phase โดยในช่วงแรกหลังจากที่เชื้อเพลิงเหลวออกมาจากหัวฉีด จะผ่านเข้าสู่บริเวณที่มีส่วนผสมหนามาก (อัตราส่วนผสมมากกว่า 4) เกิด premixed reaction แล้วจึงถูกเผาไหม้ในเปลวไฟแบบ turbulent diffusion flame ที่ขอบของสเปรย์ ส่วนเขม่าที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะถูกเผาไหม้โดยเชื้อเพลิงที่มีอยู่ใน diffusion flame โดยเขม่าส่วนที่ไม่ถูก oxidized จะออกไปกับไอเสียในรูปของควันดำ



รูปที่ 3-26 แสดงแบบจำลองกระบวนการการเผาไหม้ในสเปรย์ดีเซลแบบเรียงตามลำดับมุมข้อเหวี่ยง ซึ่งประกอบด้วย การเผาไหม้ในช่วง auto-ignition และ premixed combustion [14]



รูปที่ 3-27 แสดงแบบจำลองการเผาไหม้ของสเปรย์ดีเซลในช่วง quasi-steady [14]

### 3.1.3 การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลโดยวิธีการถ่ายภาพ

เพื่อที่จะทำตามกฎข้อบังคับเรื่องไอเสีย และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงให้ต่ำที่สุด สิ่งสำคัญคือการทำความเข้าใจกระบวนการในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น การวัดเฉพาะความดันกระบอกสูบ, ตัวแปรในการจุด, แก๊สไอเสีย นั้นไม่เพียงพออีกต่อไป ซึ่งมีหลายวิธี วิธีหนึ่งคือการจำลองการจุดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้วิธีทางแสงในการตรวจดูกระบวนการในกระบอกสูบ

มีหลายวิธีทางแสงที่ใช้ในการตรวจดูเครื่องยนต์ดีเซลในที่นี่ จะใช้แต่ละวิธีแยกจากกัน ห้องเผาไหม้จะต้องถูกดัดแปลงเพื่อให้แสงเข้าได้ เมื่อใช้แสงเลเซอร์ ห้องเผาไหม้โดยปกติ

จะต้องถูกดัดแปลงอย่างมาก เพื่อให้แสงเลเซอร์ทะลุผ่านห้องเผาไหม้ ทำให้มีอิทธิพลต่อการเกิดสเปร์ยเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ การวัดที่สภาวะคงตัวนั้นหายากเนื่องจากปัญหาจากเขม่าที่เกาะบนหน้าต่างปกป้อง ในการตรวจสอบส่วนใหญ่ในที่นี้ เครื่องยนต์จะถูกหมุนแล้วเชื้อเพลิงจะถูกฉีดในไม่กี่วัฏจักรระหว่างการวัดเพื่อป้องกันการเกิดเขม่าที่หน้าต่าง

Dec [14] ใช้วิธี elastic scattering เพื่อวัดการฟุ้งกระจายของสเปร์ยเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์ โดยฉายแผ่นเลเซอร์บางๆเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่าน window ซึ่งติดตั้งในปลอกสูบและบันทึกภาพผ่าน window ใน piston bowl ส่วน Ricart และคณะ [15] ใช้ระบบการวัดที่ขึ้นกับ endoscope เพื่อวัดการฟุ้งกระจายของสเปร์ยเชื้อเพลิงเหลว ในการให้แสงกับสเปร์ยเชื้อเพลิง แสงเลเซอร์จะถูกฉายเข้าไปในห้องเผาไหม้โดยผ่าน optical fiber รูปที่ได้จะถูกบันทึกโดยกล้องดิจิทัลขาว-ดำ 8 บิต เนื่องจากตำแหน่งของ endoscope ทำให้เห็นสเปร์ยเชื้อเพลิงหลังจากออกจากหัวฉีดแล้ว 10 mm และเมื่อเปลวไฟที่ส่องสว่างปรากฏในรูป จะไม่สามารถวัดการฟุ้งกระจายได้อีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะแยกสเปร์ยเชื้อเพลิงออกจากเปลวไฟในรูปขาว-ดำ

ในการวัดการกระจายของเขม่าในเปลวไฟดีเซลที่กำลังเผาไหม้ จะใช้วิธี Laser Induced Incandescence (LII) อีกวิธีหนึ่งคือ two-color method โดยการวัดความเข้มการแผ่รังสีของเขม่าที่สองความยาวคลื่นที่ต่างกัน จะสามารถคำนวณได้ทั้งการแจกแจงของเขม่าและอุณหภูมิเขม่า ข้อเสียข้อหนึ่งของวิธีนี้คือ ความเข้มที่ถูกวัดเกิดจากความลึกทั้งหมดไม่ใช่ระนาบของรูปภาพที่ถูกระบุไว้ ในการวัดความเข้มข้นเขม่าในเครื่องยนต์ดีเซล Black และคณะ [16] ใช้วิธี laser extinction method โดยฉายแสงเลเซอร์ที่ทราบค่าความเข้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยผ่าน window ที่ปลอกสูบ ความเข้มของลำแสงเลเซอร์จะถูกวัดที่ด้านตรงข้ามของกระบอกสูบ ความแตกต่างของความเข้มถูกใช้เป็นตัววัดความเข้มข้นของเขม่า วิธีนี้สามารถวัดความเข้มข้นในเขม่าที่มีอุณหภูมิไม่สูงได้

ในการศึกษาของ Larsson [17] ระบบทางแสงแบบ endoscope ถูกใช้ในการศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล DI การฟุ้งกระจายของสเปร์ยเชื้อเพลิงเหลว, flame lift-off และ flame length ถูกวัดในรูปภาพ ระหว่างการทดสอบ windows จะสะอาดเสมอและสามารถเดินเครื่องที่ steady state ได้หลายนาที จากการใช้ two-color method รูปภาพสองมิติของการแจกแจงอุณหภูมิจะถูกวิเคราะห์ออกมา

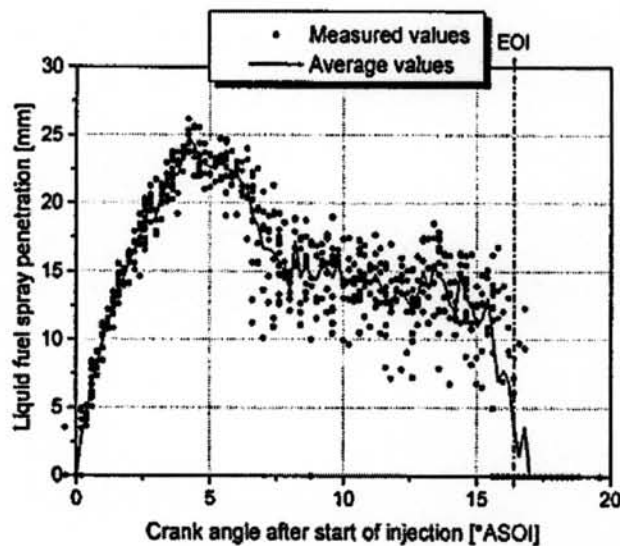
การตั้งค่าเครื่องยนต์ที่ต่างกัน 13 ค่า จะถูกเปรียบเทียบในการทดสอบทางแสง แต่ละจุดการทดสอบจะบันทึก 3 ลำดับภาพ 2 ลำดับภาพจะใช้แสงแฟลชเพื่อส่องสว่างให้สเปร์ยเชื้อเพลิงก่อนที่จะเผาไหม้ ลำดับแรกจะได้มา 8 ภาพ ที่มุมข้อเหวี่ยงในช่วง  $-12$  ถึง  $60^{\circ}$  ATDC ที่  $1.0^{\circ}$  CA resolution ลำดับที่สองได้มา 6 ภาพ ที่มุมข้อเหวี่ยงในช่วง  $-11$  ถึง  $8.6^{\circ}$  ATDC ที่  $0.2^{\circ}$  CA resolution ลำดับที่สาม รูปภาพของการส่องสว่างด้วยตนเองจะถูกบันทึกโดยไม่ต้องใช้แสง



เพิ่มเติม รูปภาพถูกใช้สำหรับการคำนวณการกระจายอนุภาคน้ำมัน 8 รูปภาพจะถูกบันทึกที่แต่ละมุมข้อเหวี่ยงในช่วง  $-12$  ถึง  $60^\circ$  ATDC ที่  $1.0^\circ$  CA resolution รูปภาพทั้งหมดถูกบันทึกในวัฏจักรการเผาไหม้ที่ต่างกัน

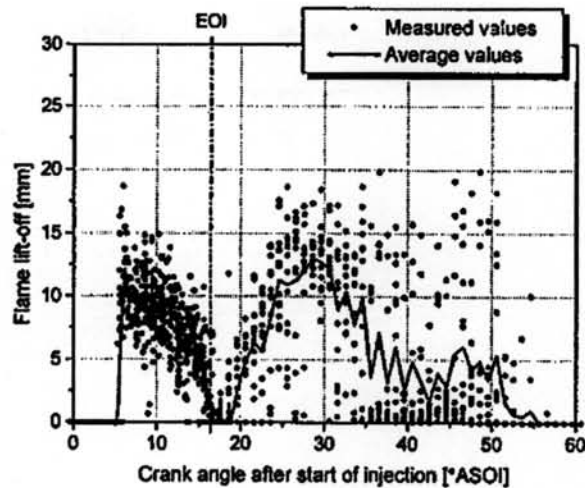
#### Spray penetration, flame lift-off and flame length

การพุ่งกระทบของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว, flame lift-off และ flame length จะถูกวัดสำหรับแต่ละกรณี ค่าที่วัดจะถูกนำมาเฉลี่ย รูปที่ 3-28 แสดงการพุ่งกระทบของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวสำหรับ  $SOI = -9^\circ$  ATDC จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นการฉีด ค่าที่วัดจะเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยเล็กน้อย หลังจาก SOC การเบี่ยงเบนจะมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากจากการเบี่ยงเบนในตำแหน่งของเพลวไฟ ดังจะสามารถเห็นได้ในรูปที่ 3-29 ที่ซึ่งมีการแสดง flame lift-off โดย flame lift-off จะเกิดการเบี่ยงเบนมากกว่าการพุ่งกระทบของสเปรย์ ในรูปที่ 3-29 จะเห็นได้ว่า flame lift-off จะอยู่ที่ 4-6 mm หลังการพุ่งกระทบของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว เพลวไฟไปถึงหัวฉีดหลังจากสิ้นสุดการฉีด (EOI) หลังจากนั้น flame lift-off จะแสดงการเบี่ยงเบนมากกว่า แต่ดูเหมือนจะเคลื่อนออกไปจากหัวฉีดอีกครั้ง Winklhofer [18] แสดงว่าสำหรับความดันในการฉีดที่คล้ายคลึงกัน flame lift-off เบื้องต้นคือ 13-15 mm จากหัวฉีด ซึ่งเป็นระยะทางจากหัวฉีดที่มากกว่าในการทดลองเหล่านี้เล็กน้อย



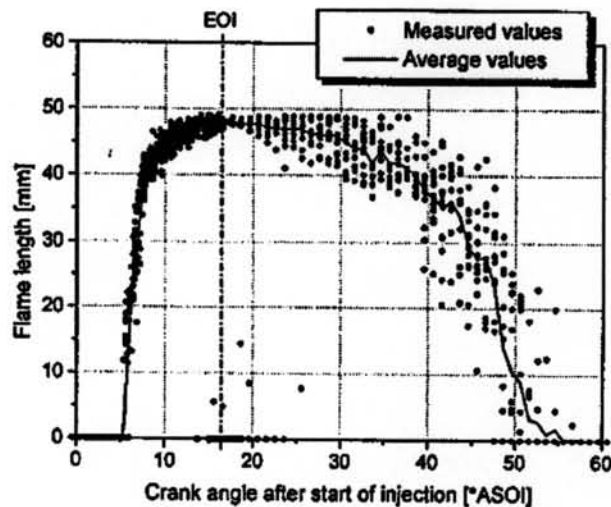
รูปที่ 3-28 Penetration ของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1) [17]





รูปที่ 3-29 Flame lift-off สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1) [17]

เช่นเดียวกับ flame lift-off ดูเหมือนว่า flame length จะค่อนข้างเสถียรจนถึง EOI ดังรูปที่ 3-30 จากนั้น flame length จะเริ่มเกิดการเบี่ยงเบน



รูปที่ 3-30 Flame length สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1) [17]

#### Inlet air pressure

ความหนาแน่นอากาศที่สูงขึ้น จะเพิ่มแรงเสียดทานที่กระทำต่อสเปร์ย์ ทำให้การแตกตัวเป็นละอองดีขึ้นและการพุ่งกระทบสูงสุดของสเปร์ย์เชื้อเพลิงเหลวลดลง อากาศร้อนเพิ่มเติมที่มากกว่าจะถูกดึงเข้าไปในสเปร์ย์ ทำให้การระเหยของเชื้อเพลิงเหลวเร็วขึ้น

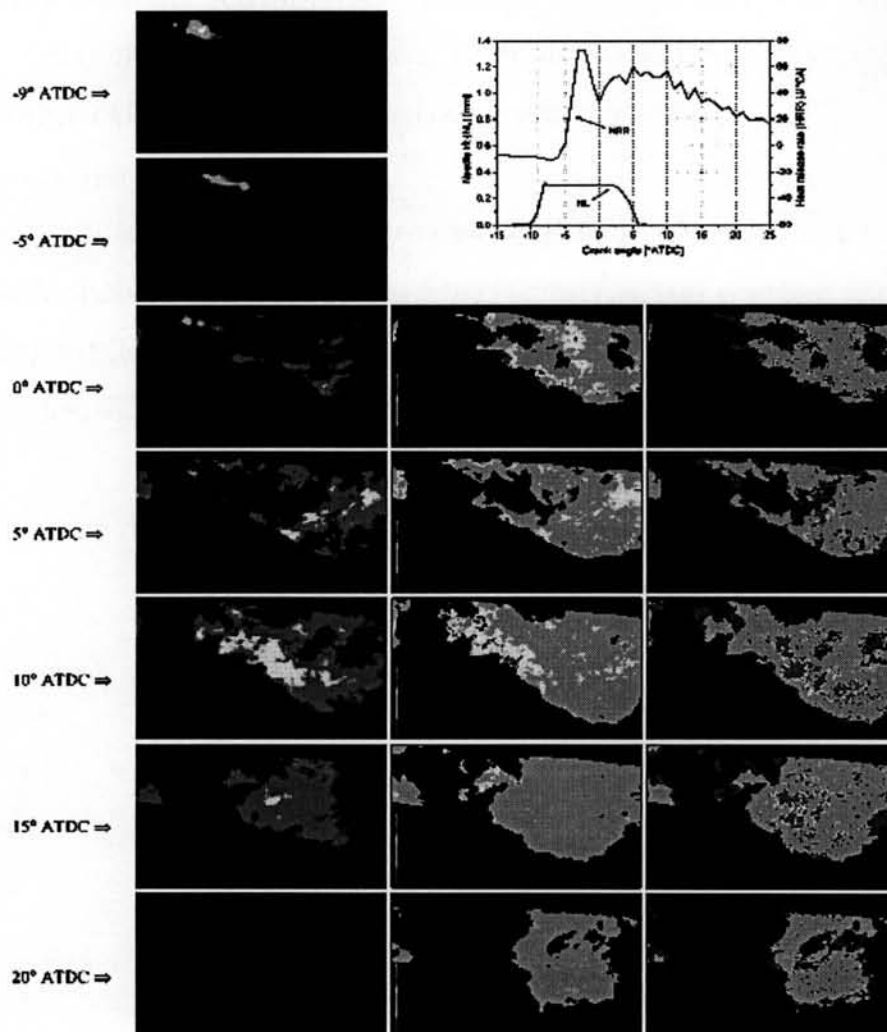
ความดันอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้น จะลดช่วงการล่าช้า เป็นการลดระดับสูงสุดในการปลดปล่อยความร้อนให้ต่ำลง เหตุผลสำหรับการลดช่วงการล่าช้า เป็นได้ทั้งความดันอากาศที่สูงกว่าและการแตกตัวเป็นละอองของเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

### Inlet air temperature

เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิทั้งหมดในห้องเผาไหม้หลังจากการอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้การฟุ้งกระแทกสูงสุดของสเปรย์เชื้อเพลิงลดลง อุณหภูมิแก๊สที่สูงกว่าจะทำให้ช่วงการล่าช้าลดลงด้วย ส่วนของการเผาไหม้แบบ premixed ลดลง และการเผาไหม้แบบ diffusion จะเริ่มต้นเร็วขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่สูงจากการเผาไหม้แบบ diffusion ดังนั้นการระเหยที่เพิ่มขึ้น การฟุ้งกระแทกของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวจะลดลงจากค่าสูงสุดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่ม  $T_{in}$  จะมีความแตกต่างเล็กน้อยใน flame lift-off และ flame length เมื่ออุณหภูมิขาเข้าถูกเปลี่ยน ยกเว้นความแตกต่างที่จุดเริ่มต้นของการเผาไหม้แบบ diffusion

### Load level

เมื่อระดับภาระลดลง ช่วงการล่าช้าจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวและอุณหภูมิของก๊าซตกค้างในห้องเผาไหม้ที่ต่ำลง ดังนั้น ส่วนของการเผาไหม้แบบ premixed จะเพิ่มขึ้น การเผาไหม้ที่สว่างจะเกิดภายหลังด้วยระดับโหลดที่ต่ำกว่าเนื่องจากระยะเวลาในการฉีดที่สั้นกว่า flame length จะสั้นกว่าที่ภาระเครื่องยนต์ต่ำกว่า



รูปที่ 3-31 ค่าสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ค่า  $k_{cs}$  ต่างๆ [17]

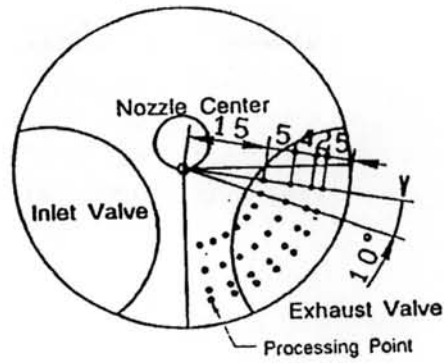
### Flame temperature distribution

การกระจายของเขม่าและอุณหภูมิถูกคำนวณในรูปภาพเปลวไฟโดยใช้วิธี two-color method ในรูปที่ 3-31 แสดงผลของการคำนวณที่ว่าสำหรับกรณีมาตรฐาน แถวซ้ายแสดงรูปภาพที่ได้มาของสเปกซ์เชื้อเพลิงเหลวและเปลวไฟ แถวกลางแสดงการกระจายอุณหภูมิในเปลวไฟ และแถวขวาเป็นการกระจายของเขม่า ในรูปภาพ หัวฉีดจะอยู่มุมบนซ้ายของรูป ในบางรูปของเปลวไฟจะมีเปลวไฟเล็กๆ อยู่ต่ำกว่าหัวฉีด ซึ่งเปลวไฟนี้จะไม่เกี่ยวกับสเปกซ์เชื้อเพลิงที่ศึกษา แต่จะเป็นของ 1 ใน 3 สเปกซ์อื่น ในรูปภาพอุณหภูมิ สเกลสี (ม่วง-ฟ้า-เขียว-เหลือง-แดง-ขาว) ระบุช่วงของอุณหภูมิ 1800 ถึง 3000 K ในรูปการกระจายเขม่า สเกลสีตัวเดิมจะระบุความหนาแน่นของเขม่าจัดช่วงจากเขม่าบางจนถึงเขม่าหนาแน่น กราฟข้างบนรูปที่ 3-31 เป็นการพล็อตระยะยกของเข็มและอัตราการปลดปล่อยความร้อน เส้นจุดแนวตั้งคือมุมข้อเหวี่ยงที่ซึ่งได้มาซึ่งรูปภาพดังที่เห็นที่ 0 และ 5 °ATDC ในรูปที่ 3-31 เปลวไฟข้างหน้าสเปกซ์เชื้อเพลิงจะถูกทำให้เย็นลงโดยเชื้อเพลิงทำให้เกิดความเข้มข้นแผ่รังสีเปลวไฟที่ต่ำกว่า การแผ่รังสีของเปลวไฟจะต่ำเกินกว่าที่จะคำนวณการกระจายอุณหภูมิและเขม่าได้ ดังนั้นจะไม่มีอุณหภูมิและความหนาแน่นเขม่าแสดงในพื้นที่ข้างหน้าสเปกซ์เชื้อเพลิง

Long Zhang และคณะ [19] ได้วิเคราะห์ปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล DI ลงไปในรายละเอียด โดยจะประยุกต์ใช้วิธี "cross-correlation" และ "two-color method" เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของเปลวไฟที่เผาไหม้และอุณหภูมิเปลวไฟ ตามลำดับ โดยกระบวนการถ่ายภาพความเร็วสูง จุดประสงค์ของการตรวจสอบนี้คือเพื่อศึกษาผลของตัวแปรของเครื่องยนต์ เช่น pumping rate, ขนาดหัวฉีด และ injection timing ที่มีต่อกระบวนการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลต่อการเคลื่อนที่ของเปลวไฟและอุณหภูมิเปลวไฟ

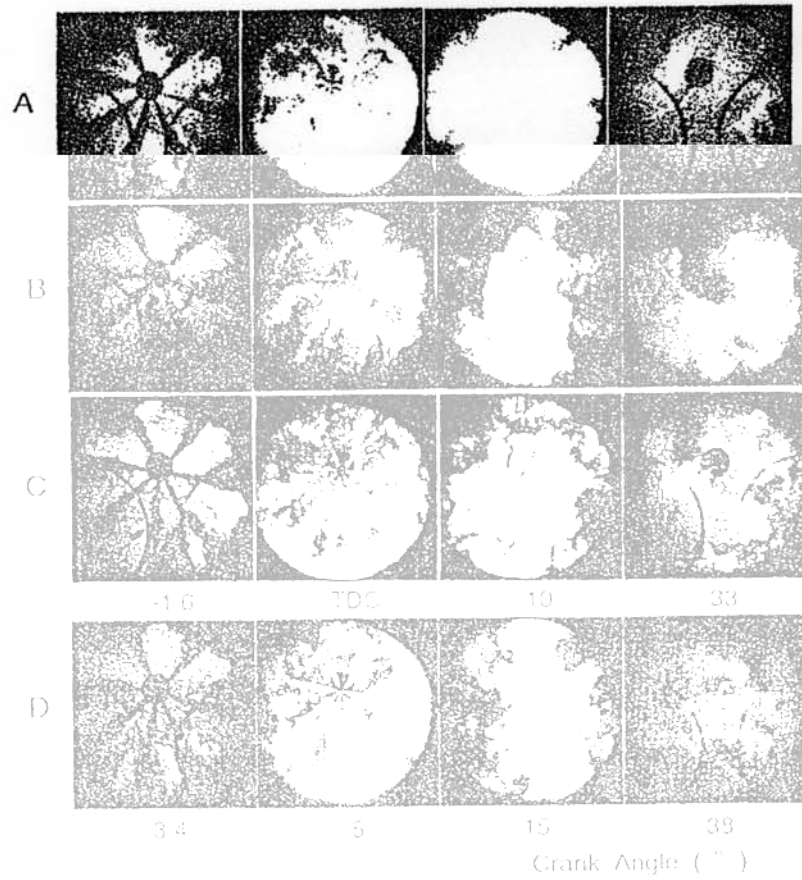
หลักการของวิธี "cross-correlation" สำหรับการวัดความเร็วเปลวไฟได้ถูกอธิบายโดย Shioji [20] และโดย Yamaguchi [21] โดยการคำนวณฟังก์ชัน cross-correlation 2 มิติระหว่างภาพถ่ายการเผาไหม้ 2 ภาพในช่วงเวลาสั้นๆ จะสามารถหาเวกเตอร์ความเร็วได้โดยการสแกนตำแหน่งของ maximum cross-correlation coefficient และโดยการทราบช่วงของเวลา

ตำแหน่งของจุดที่ทำการวัด 32 จุดในบริเวณที่มองเห็นได้ของห้องเผาไหม้แสดงไว้ในรูปที่ 3-32 บริเวณทั้งหมดจะถูกวัดเพื่อแสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ของเปลวไฟและจุดศูนย์กลางของ swirl เพื่อลดเวลาในการคำนวณ การเปรียบเทียบระหว่างสภาวะต่างๆ จะถูกกระทำที่จุดที่ทำการวัด 32 จุด เนื่องจากวิธีนี้ต้องการก้อนที่มีแสงสว่าง (luminous lumps) อย่างน้อย 2 รูปแบบภายในบริเวณที่ทำการวัดเพื่อให้ได้เวกเตอร์ที่ถูกต้อง ดังนั้นบริเวณที่ทำการวัดจะถูกตรึงไว้ที่ 10×10 mm ในครั้งแรก สำหรับเวกเตอร์บางตัวที่ผิดปกติไป บริเวณที่ทำการวัดจะถูกเปลี่ยนเป็น 20×20 mm สำหรับการคำนวณใหม่



รูปที่ 3-32 Processing points distribution [19]

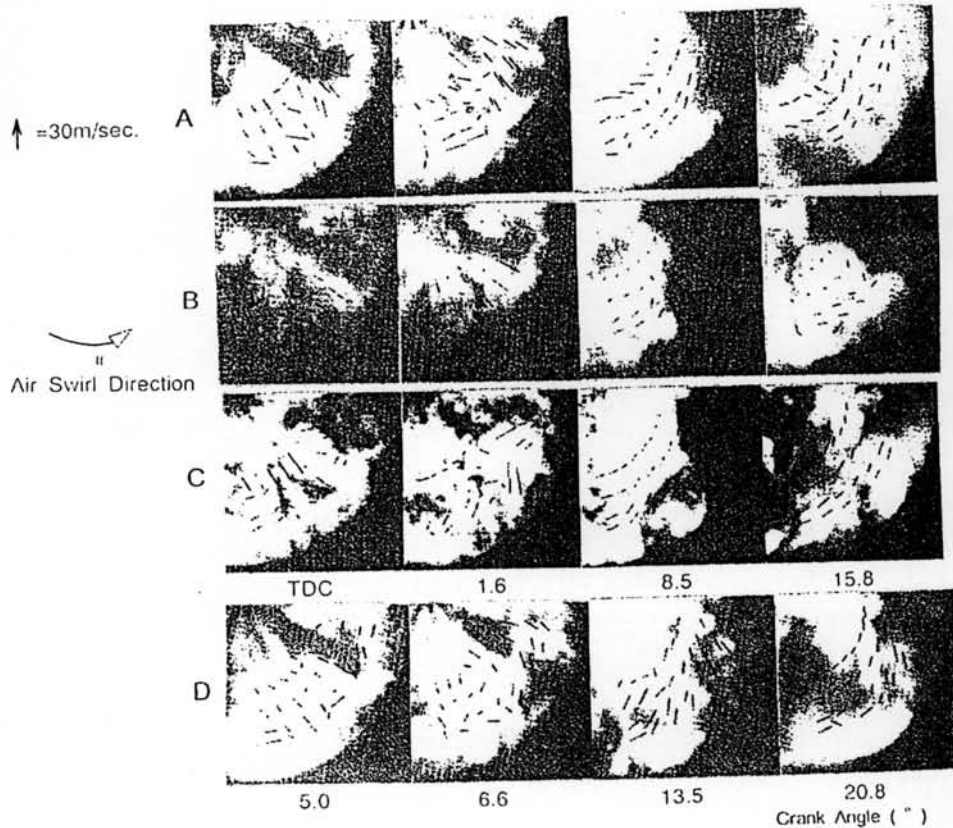
อุณหภูมิเปลวไฟจะถูกวัดโดยวิธี "two-color method" ในกรณีนี้เส้น calibration จะได้มาโดยการถ่ายภาพตะเกียงฮาโลเจนมาตรฐานในสภาวะเดียวกับภาพถ่ายการเผาไหม้ ความยาวคลื่นที่ใช้คือ สีแดง (0.65  $\mu\text{m}$ ) และสีน้ำเงิน (0.46  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 3-33 การเปรียบเทียบกระบวนการเผาไหม้โดย Long Zhang และคณะ [19]

รูปที่ 3-33 แสดงรูปที่เลือกมาของกระบวนการเผาไหม้ภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ มุมข้อเหวี่ยงจะถูกระบุไว้ได้รูป

กระบวนการเผาไหม้ จากรูปที่ 3-34 การเปรียบเทียบพบว่ากรณีที่ pumping rate ต่ำกว่า (รูป B) การแพร่กระจายของเปลวไฟจะช้า และมีเขม่ามากในเปลวไฟระหว่างจังหวะการเผาไหม้แบบ diffusion ความแตกต่างระหว่างพื้นที่หัวฉีด แสดงไว้ในรูป A และ C พบว่าหัวฉีดที่มีพื้นที่รูใหญ่จะมีเขม่ามากกว่าในเปลวไฟใกล้ๆผนังห้องเผาไหม้ และเมื่อ injection timing ถูกหน่วงลงจาก  $11^{\circ}$  BTDC (รูป A) ไปเป็น  $5^{\circ}$  BTDC (รูป D) จะพบว่าแสงสว่างของเปลวไฟจะลดลงและจุดสิ้นสุดของการเผาไหม้จะล่าช้าออกไป



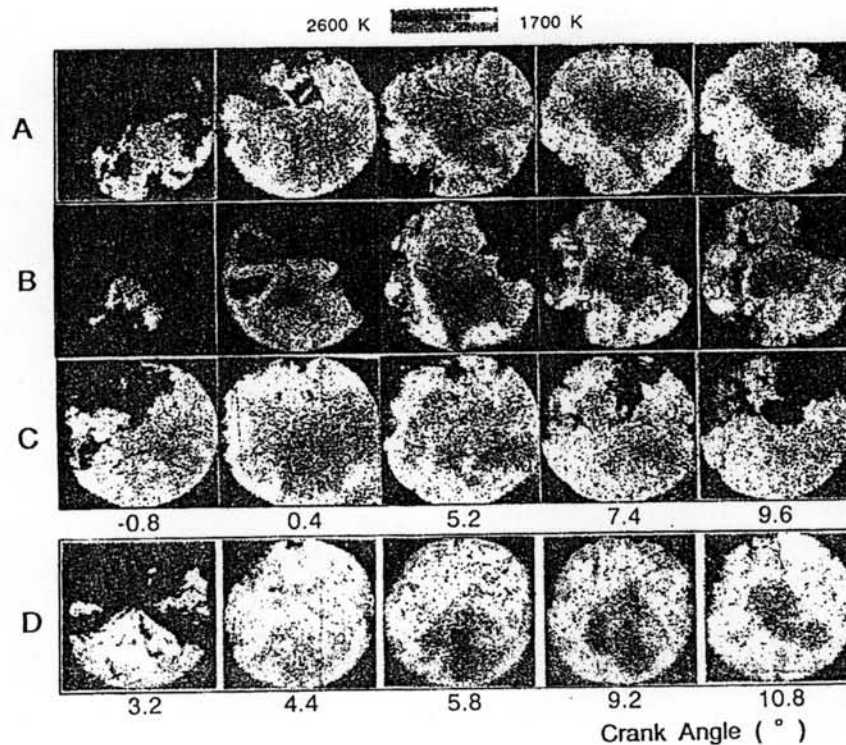
รูปที่ 3-34 การเปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วเปลวไฟโดย Long Zhang และคณะ [19]

การเคลื่อนที่ของเปลวไฟ รูปที่ 3-34 แสดงผลของเวกเตอร์ความเร็วของเปลวไฟที่คำนวณโดยวิธี cross-correlation method การคำนวณเริ่มต้นที่เวลาเมื่อ spray plume ของเชื้อเพลิงเกือบถูกปกคลุมด้วยเปลวไฟ ดังนั้นจากจุดเริ่มต้นของการคำนวณ จะสมมติว่ามีการเผาไหม้แบบ diffusion อยู่ทั่วไป ถ้ามองอย่างกว้างๆ จะพบว่าการเคลื่อนที่ของเปลวไฟในช่วงเวลาของการฉีดจะแตกต่างไปจากการเคลื่อนที่ของเปลวไฟในช่วงหลังจากสิ้นสุดการฉีด ระหว่างการฉีดเชื้อเพลิง เวกเตอร์ความเร็วจะผิดปกติกว่าในทั้งทิศทางและขนาด แต่อย่างไรก็ตาม ที่เวลาสั้นๆ หลังจากสิ้นสุดการฉีด เวกเตอร์ความเร็วส่วนมากจะมุ่งหน้าไปในทิศเดียวกับ swirl ของอากาศ และการเคลื่อนที่แบบผิดปกติจะลดลงอย่างรวดเร็ว



เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบผิปกตินั้นจะถูกพิจารณาให้สัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการเป็น turbulence ขนาดใหญ่ในบริเวณที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามี turbulence อย่างหนักหน่วงเกิดขึ้นโดยเชื้อเพลิงที่ฉีด, spray plume ที่ไปกระทบผนังห้องเผาไหม้ และการเผาไหม้ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างช่วงเวลา

อุณหภูมิเปลวไฟ อุณหภูมิเปลวไฟที่คำนวณโดยวิธี two-color method สำหรับสภาวะทางการทดลองจาก A ไปสู่ D แสดงไว้ในรูปที่ 3-35 จากผลเหล่านี้จะแสดงถึงการกระจายไปตามส่วนต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงของเวลาของอุณหภูมิเปลวไฟ ในกรณีเหล่านี้จะมุ่งเน้นไปที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 2000 K) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิด  $\text{NO}_x$  และการเผาไหม้เขม่า เพื่อว่าจะได้ทำการเปรียบเทียบเลขฟิกเชล (คือตัวเลขของฟิกเชลที่แสดงถึงขนาดของพื้นที่) ที่มากกว่า 2000 K สำหรับสภาวะการทำงานต่างๆ



รูปที่ 3-35 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวไฟโดย Long Zhang และคณะ [19]

การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยความร้อนและการปล่อยแก๊สไอเสีย ผลของ pumping rate ที่มีต่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนจะเป็นค่าสูงสุดสำหรับการเผาไหม้ทั้งแบบ premixed และ diffusion ซึ่งสูงขึ้นภายใต้สภาวะที่ pumping rate มีค่าสูง

สำหรับหัวฉีดที่มีพื้นที่รูใหญ่ ค่า peak ของอัตราการปลดปล่อยความร้อนระหว่างช่วงการเผาไหม้แบบ premixed จะสูงกว่า เป็นผลของอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงกว่าในช่วงการเผาไหม้แบบ premixed แต่ค่า peak ของอัตราการปลดปล่อยความร้อนระหว่างกระบวนการเผาไหม้แบบ



diffusion จะต่ำกว่า เป็นผลจากอุณหภูมิเปลวไฟที่ต่ำกว่าและการเคลื่อนที่ของเปลวไฟที่ active น้อยกว่าในจังหวะ diffusion ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

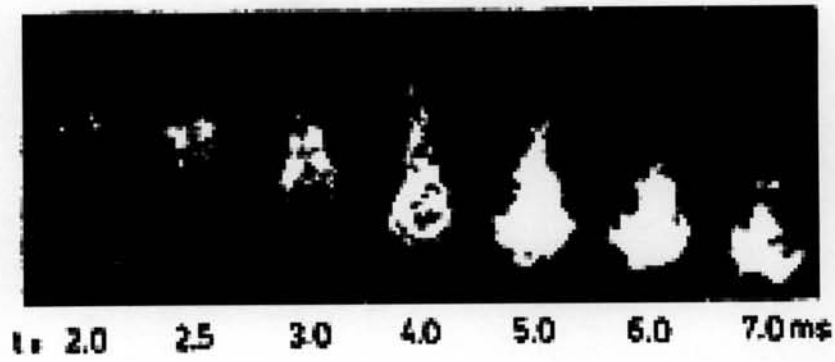
เมื่อ injection timing หน่วงลง ค่า peak ของการปลดปล่อยความร้อนจะลดลง ในระหว่างการเผาไหม้แบบ premixed และ diffusion ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิเปลวไฟที่ต่ำลงเนื่องจากสภาวะการทำงานนี้

Pumping rate ที่สูงจะทำให้ควันทดลงและ  $\text{NO}_x$  เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ active และอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงขึ้นภายใต้ injection timing เดียวกัน เพื่อรักษาระดับ  $\text{NO}_x$  ให้คงเดิม วิธีทั่วไปคือการหน่วง injection timing ทำให้อุณหภูมิเปลวไฟต่ำลง ดังนั้นการเผาไหม้เข้ามาที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่สูงกว่าจะไม่อยู่ในกรณีของการฉีดในตอนแรก

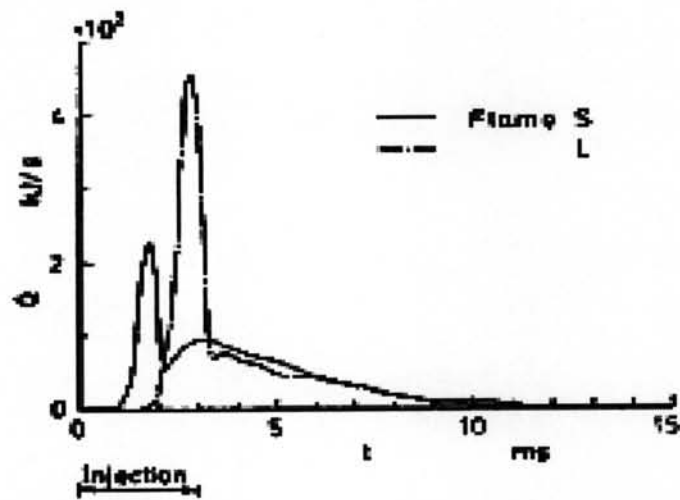
หัวฉีดที่มีพื้นที่รูเล็ก จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟต่ำลงระหว่างการเผาไหม้แบบ premixed ดังนั้นการเกิด  $\text{NO}_x$  ระหว่างจังหวะการเผาไหม้แบบ premixed อาจลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้หัวฉีดที่มีพื้นที่รูเล็กกว่าจะสามารถลดระดับ  $\text{NO}_x$  ให้น้อยลง ที่ injection timing เดิมหรือหน่วงเล็กน้อย

Yong June Chang และคณะ [22] ได้ตรวจสอบกระบวนการก่อตัวและการเผาไหม้ของอนุภาคเขม่าในเปลวไฟดีเซลด้วยเครื่องอัดความเร็วสูง กลุ่มหมอกของเขม่าถูกตรวจสอบโดยวิธี laser schlieren และอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง/อากาศของบริเวณการเกิดเขม่าถูกประมาณจากการกระจายความเข้มข้นเชื้อเพลิงที่วัดได้ในสเปรย์ที่ไม่ระเหย การแปรผันของความเข้มข้นเขม่าในเปลวไฟจะสัมพันธ์กับอัตราการปลดปล่อยความร้อนด้วย

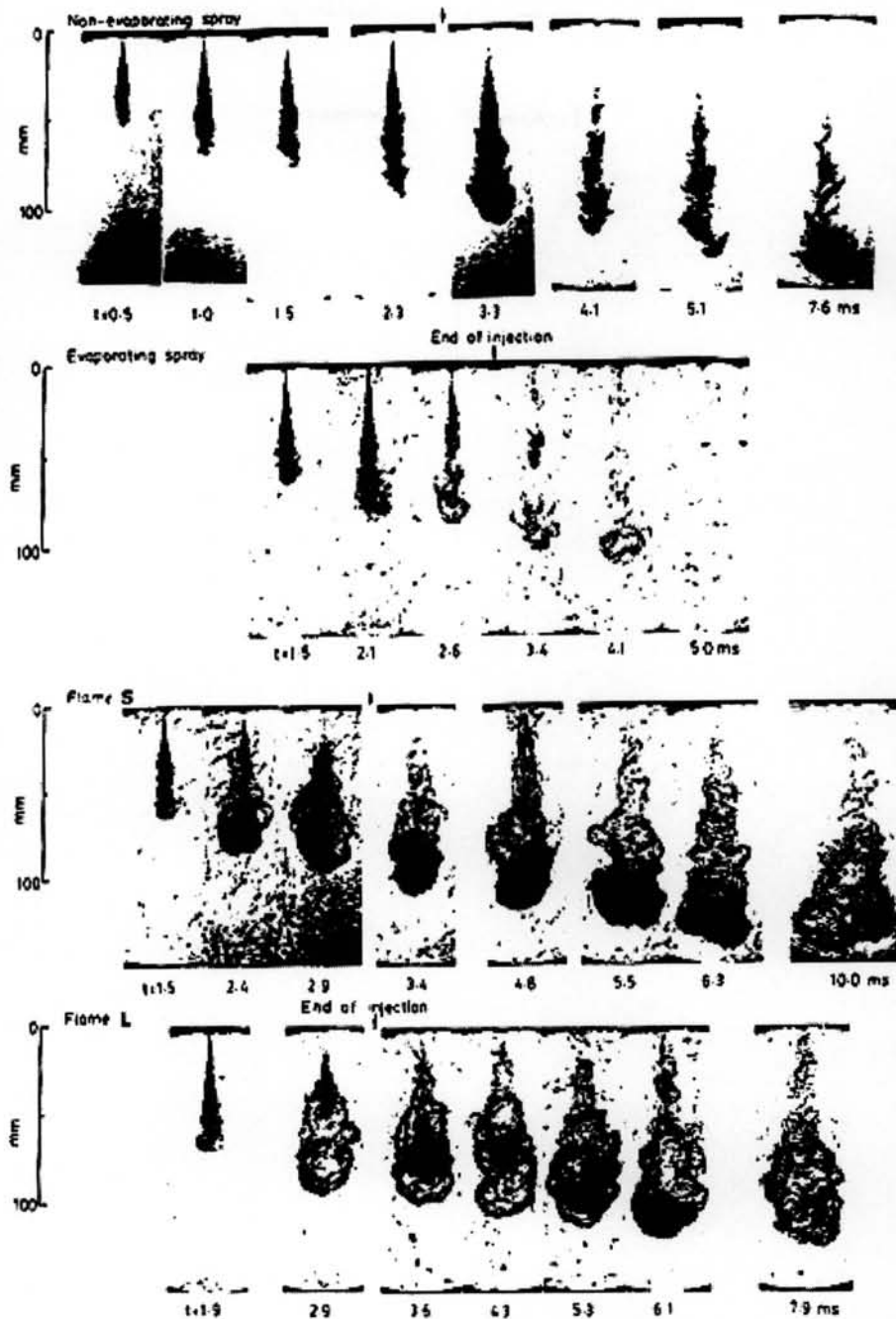
กระบวนการก่อตัวและการเผาไหม้ของอนุภาคเขม่าถูกตรวจสอบโดยวิธีสุ่ม ตัวอย่างแก๊สโดยตรงโดย Aoyagi และคณะ [23] และวิธี two-color method โดย Matsui และคณะ [24] ความสัมพันธ์ตามเวลาของความเข้มข้นเขม่าที่ถูกวัดโดยทั้ง 2 วิธีนี้เปิดเผยว่าการก่อตัวของเขม่าเริ่มต้นขึ้นพร้อมกับการเริ่มต้นของการเผาไหม้แบบ diffusion และความเข้มข้นของมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเวลาระหว่างช่วงการฉีด ความเข้มข้นนี้มีค่าสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการฉีด จากนั้นเขม่าจะเผาไหม้ในอัตราที่รวดเร็วจนความเข้มข้นลดลงเหลือ 1/50 ของความเข้มข้นสูงสุด แต่หลังจากที่อุณหภูมิเปลวไฟลดลงต่ำกว่า 1800 K การเผาไหม้ในทีใกล้เคียงจะหยุดลงและเขม่าถูกปล่อยออกมาที่ระดับความเข้มข้นนั้น โดยการใช้ข้อมูลจากการทดลอง Kamimoto และคณะ [25] ได้คำนวณอัตราการเผาไหม้ของเขม่าในเปลวไฟดีเซล ซึ่งพบว่าอัตราการเผาไหม้ของเขม่าถูกควบคุมโดย partial pressure ของออกซิเจนรอบๆ อนุภาคเขม่า เนื่องมาจากการผสมแบบ turbulent



รูปที่ 3-36 ภาพถ่ายความเร็วสูงโดยตรงของเปลวไฟ S [22]



รูปที่ 3-37 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสำหรับเปลวไฟ S และเปลวไฟ L [22]



รูปที่ 3-38 ชุดของภาพถ่ายขณะใดขณะหนึ่งของสเปรย์ที่ไม่ระเหย, สเปรย์ที่ระเหย, เปลวไฟ S และเปลวไฟ L [22]

รูปที่ 3-36 แสดงภาพถ่ายโดยตรงของ "เปลวไฟ S" (เปลวไฟที่มี ignition delay สั้น) รูปที่ 3-37 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสำหรับเปลวไฟ S และ เปลวไฟ L (เปลวไฟที่มี ignition delay ยาว) รูปที่ 3-38 แสดงชุดของภาพถ่ายขณะใดๆของสเปรย์และเปลวไฟ ในรูปเหล่านี้ t หมายถึงเวลาหลังจากเริ่มฉีดเชื้อเพลิง

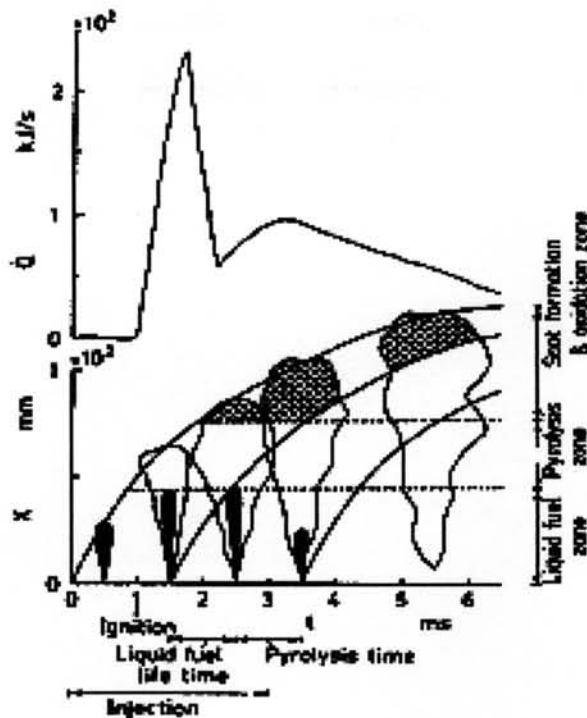
การเปรียบเทียบระหว่างสเปร์ยที่ไม่ระเหยกับสเปร์ยที่ระเหย แสดงให้เห็นว่า สเปร์ยที่ระเหยมีเงาที่ใกล้บริเวณปลายสเปร์ยสว่างกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่ามีไอเชื้อเพลิงอยู่ตรงนั้น ในกรณี ของสเปร์ยที่ระเหยสามารถสังเกตเห็นส่วนมืดบางๆ ใกล้ทางออกหัวฉีด ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหยด เชื้อเพลิงหรือแกนของเหลวซึ่งมีความยาวประมาณ 40-50 mm สอดคล้องกับระยะทางที่ต้องการ สำหรับเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดจนแตกตัวและระเหย การเปรียบเทียบระหว่างสเปร์ยที่ระเหยกับเปลวไฟ บ่งบอกว่าระหว่างช่วงการฉีด ความยาวของเงามืดใกล้หัวฉีดสำหรับเปลวไฟจะสั้นกว่า ซึ่งอาจ เนื่องมาจากอุณหภูมิแก๊สสูงในเปลวไฟ และบริเวณที่มากับเงามืดจะสังเกตเห็นได้ใกล้ๆ ปลายของ เปลวไฟ S และ L ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นในสเปร์ยที่กำลังระเหย

ความสัมพันธ์ระหว่างการก่อตัวของเขม่ากับการปลดปล่อยความร้อน จากการ เปรียบเทียบภาพถ่าย Schlieren ในรูปที่ 3-38 และอัตราการปลดปล่อยความร้อนในรูปที่ 3-37 เรา จะหาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดเขม่าและการปลดปล่อยความร้อน

ในกรณีของเปลวไฟ S: ระหว่างช่วงการเผาไหม้เริ่มต้น ไม่ตรวจพบเขม่าในเปลว ไฟ เขม่าถูกสังเกตเห็นเป็นครั้งแรกทันทีหลังจากเริ่มช่วงการเผาไหม้แบบ diffusion และบริเวณที่ เกิดเขม่าจะขยายปริมาตรอย่างรวดเร็วไปสู่ปลายเปลวไฟ เมื่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนถึง จุดสูงสุด ขนาดของบริเวณที่เกิดเขม่าก็สูงสุดด้วย ต่อมาขนาดของบริเวณที่เกิดเขม่าจะคงที่สักพัก จากนั้นเขม่าจะเผาไหม้หรือกระจัดกระจายที่ละน้อยและดับลงในที่สุด

ในกรณีของเปลวไฟ L: นั่นคือเปลวไฟที่มี ignition delay ยาวนานกว่า จะสังเกตเห็น จากภาพถ่ายพบว่ามีเขม่าน้อยกว่าเปลวไฟ S การที่ ignition delay ยาวนานกว่าทำให้การ ปลดปล่อยความร้อนเริ่มต้นสูงกว่าเนื่องจากมีเวลาเพียงพอที่จะเตรียมส่วนผสม การขยายตัว ทางความร้อนอย่างรวดเร็วของเปลวไฟเกิดขึ้นระหว่างช่วงการเผาไหม้เริ่มต้น เนื่องจากการ ปลดปล่อยความร้อนที่สูงและการขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงส่งเสริมการผสมและการแทรกตัวของ อากาศ เป็นไปได้ว่าอัตราการผสมที่สูงกว่าในเปลวไฟ L จะลดการเกิดเขม่าและส่งเสริมการเผา ไหม้เขม่า

การสังเกตภาพวาดแสดงในรูปที่ 3-39 ทำให้เราสรุปและแปลลำดับการเกิดและ การเผาไหม้ทั้งหมดของอนุภาคเขม่าโดยมีข้อมูลที่ตีพิมพ์แล้วเช่นดังนี้



รูปที่ 3-39 ภาพวาดแสดงแนวคิดของการก่อตัวของเขม่าในเปลวไฟดีเซล [22]

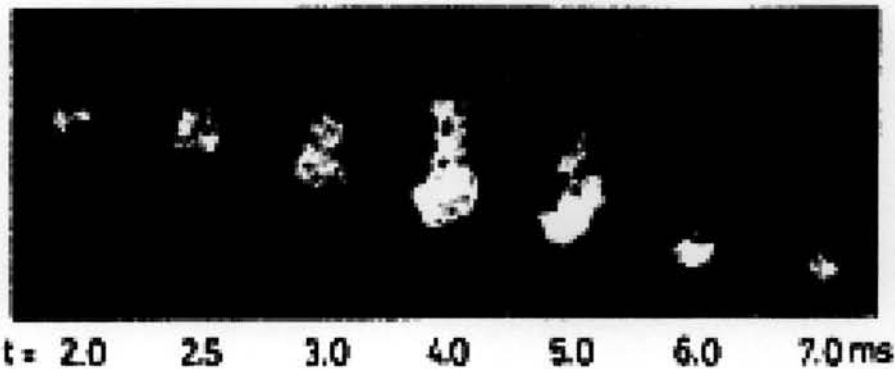
1.) Ignition delay period Miwa และคณะ [26] พบจากการศึกษาตัวอย่างแก๊ส โดยตรงว่าเชื้อเพลิงที่ระเหยหลังจากเดินทางเป็นระยะ 40 mm ห่างจาก orifice หัวฉีด จะเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยความร้อนจากอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ทำปฏิกิริยาบางส่วน และพบว่าที่ไกลจาก orifice ออกไปอีก ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากความร้อน เช่น  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  และ  $\text{C}_2\text{H}_4$  จะสูงขึ้น

2.) Initial combustion period เมื่อความดันแก๊สในกระบอกสูบเริ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจุดระเบิด สเปรย์จะเพิ่มปริมาตรขึ้นอย่างทันทีทันใด (ยกเว้นที่บริเวณใกล้ orifice) เป็นการแสดงถึงการปลดปล่อยความร้อนอย่างรวดเร็วตลอดทั่วทั้งสเปรย์ทั้งหมด กลุ่มก้อนของส่วนผสมที่ติดไฟได้ที่เตรียมระหว่าง ignition delay เผาไหม้ในประมาณ 1 ms เป็นเปลวไฟที่ไม่ส่องสว่างและผลิตภัณฑ์ที่ร้อนจากการเผาไหม้ มีส่วนมากกว่าในเปลวไฟทั้งหมด กลุ่มก้อนส่วนผสมที่มีอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง/อากาศหนาแน่นกว่าที่จะเผาไหม้จากจุดตรวจจุดเล็กๆ จะดำเนินการเกิดความร้อนเนื่องจากการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่ร้อนจากการเผาไหม้ซึ่งเด่นชัดในเปลวไฟ กลุ่มส่วนผสมหนาซึ่งมีแนวโน้มที่จะให้อนุภาคเขม่าเดินทางลงปลายทาง (ไปสู่ปลายเปลวไฟด้วยผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้) นั่นคือเมื่อมันขึ้นกับการเกิดความร้อนที่ตามมา, nucleation และการจับตัวเป็นก้อน

3.) Diffusion combustion period หลังจากการแยกกันของเวลาประมาณ 2 ms จากเริ่มต้นของการจุดระเบิด อนุภาคเขม่าปรากฏในบริเวณใกล้ๆปลายเปลวไฟเมื่อช่วงการเผา

ไหม้แบบ diffusion เริ่มขึ้น ข้อมูลการสูมตัวอย่างก๊าซที่ได้จาก Aoyagi และคณะ [23] ด้วยเครื่องยนต์ดีเซล DI แสดงว่าเขม่าถูกตรวจพบทันทีหลังจากปลายเปลวไฟไปถึงตำแหน่งที่สูมตัวอย่าง

เชื้อเพลิงที่ฉีดระหว่างช่วงเวลานี้จะเดินทางห่างจาก orifice หัวฉีดประมาณ 40 mm ในสถานะของเหลว และสลายตัวอย่างรวดเร็วโดยความร้อนเมื่อเชื้อเพลิงระเหย ผลิตรกณฑ์จากความร้อนพุ่งกระทบไปในบริเวณที่เผาไหม้ ผนวกกับเชื้อเพลิงแรกเริ่ม ผลคือมีบางส่วนเผาไหม้และบางส่วนเกิดเขม่าและดังนั้นจึงเกิดกระบวนการเผาไหม้ เมื่อกลุ่มก้อนส่วนผสมเหล่านี้ที่ซึ่งเกิดเขม่าเข้าถึงในบริเวณใกล้ปลายเปลวไฟ เขม่าจะมีปริมาณสุดท้าย 20% ของคาร์บอนรวมกับเชื้อเพลิงแรกเริ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3-39



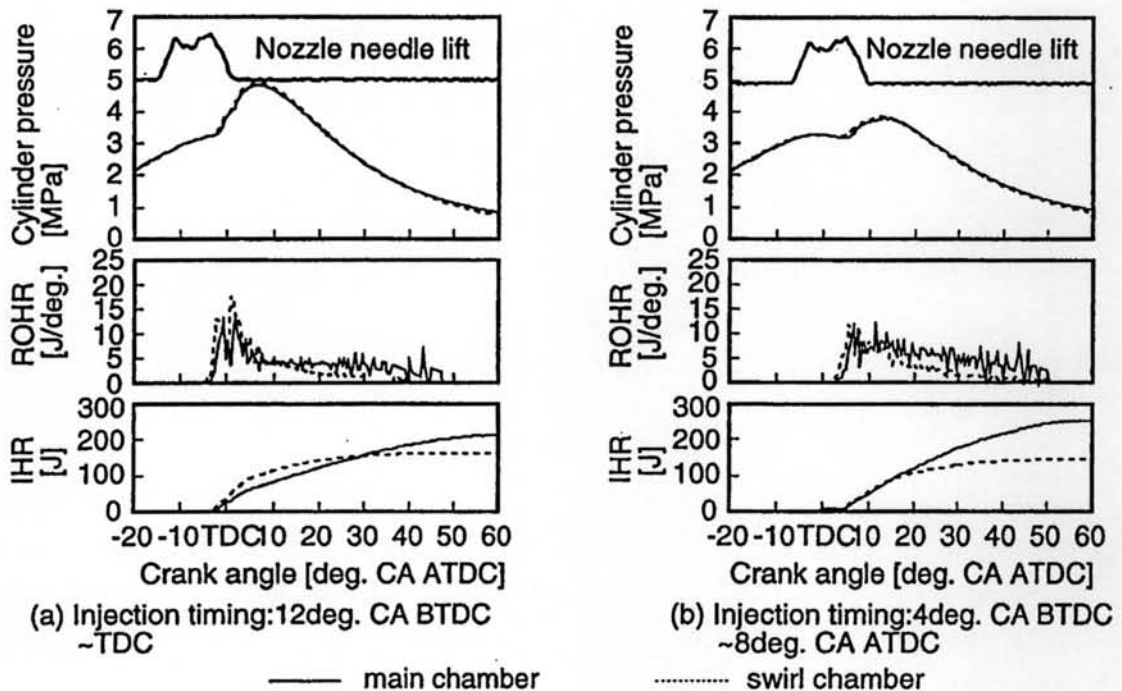
รูปที่ 3-40 ภาพถ่ายความเร็วสูงโดยตรงของเปลวไฟ [22]

เงามืดเนื่องจากแสงธรรมชาติที่ดับลงโดยอนุภาคเขม่าถูกสังเกตเห็นอย่างชัดเจนเฉพาะในบริเวณใกล้ปลายเปลวไฟ ในขณะที่ภาพถ่ายโดยตรงในรูปที่ 3-39 และ รูปที่ 3-40 แสดงว่าบริเวณที่ส่องสว่างเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอขึ้นถึงบริเวณใกล้กับ orifice หัวฉีด ถึงแม้ว่าการส่องสว่างจะน้อยเทียบกับการส่องสว่างของปลายเปลวไฟ ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าอนุภาคเขม่าหรือแหล่งกำเนิดเขม่าด้วยความเข้มข้นต่ำมีอยู่ในบริเวณนี้ การวัดการกระจายอนุภาคเปลวไฟตามแกนโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ two-color method ของภาพถ่ายสี บอกถึงการกระจายเชิงเปรียบเทียบ

4.) Period after the end of injection บริเวณที่มีเขม่าบรรจุอยู่ ไหลลงปลายทางหลังจากสิ้นสุดการฉีด และที่ 6-7 ms หลังจากเริ่มต้นการฉีด อนุภาคเขม่าส่วนมากเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการเผชิญกับอากาศผ่าน turbulent diffusion

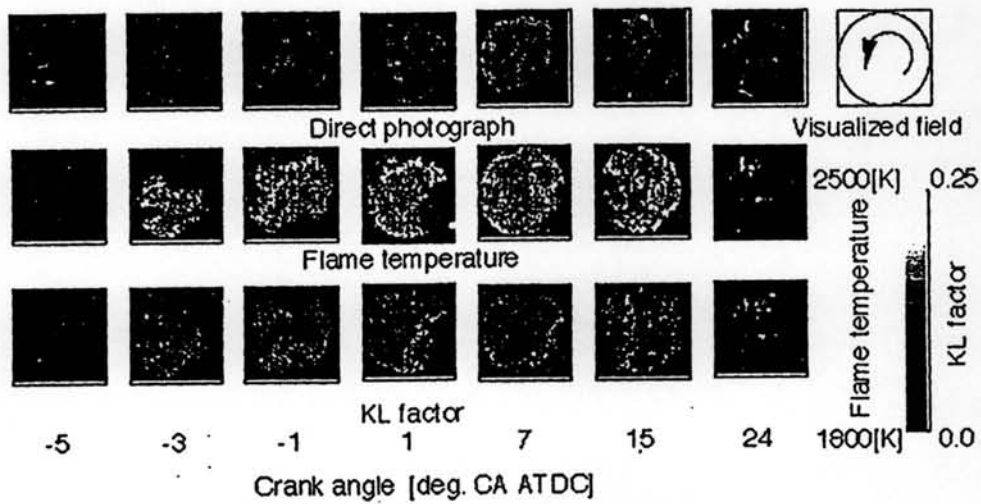
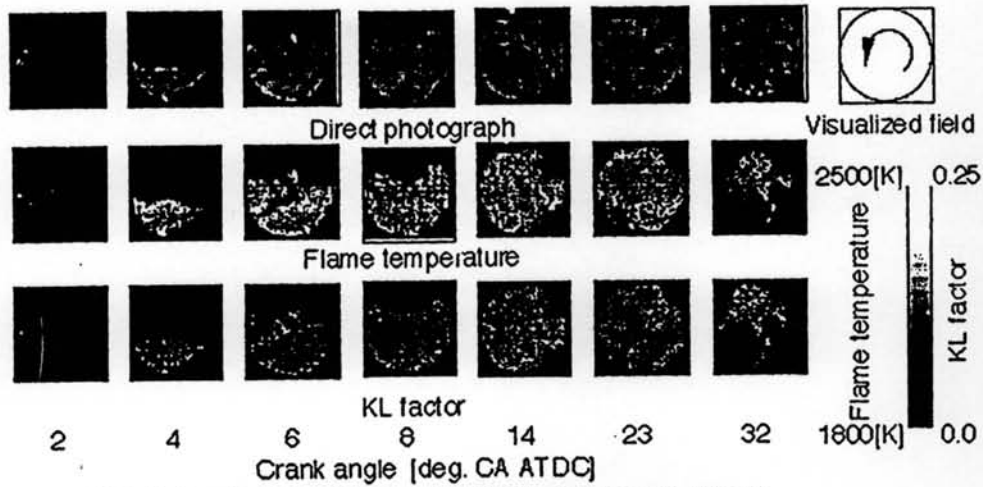
Hajime Fujimoto และคณะ [27] ได้ตรวจสอบปรากฏการณ์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล IDI ที่มีห้องเผาไหม้แบบ swirl โดยวิธีทางแสง การกระจายของการปล่อยอนุมูล OH ออกมาโดยธรรมชาติถูกวัดผ่าน band pass filter ส่วน KL factor [28] และอนุภาคเปลวไฟได้มาจากวิธี two-color method





รูปที่ 3-41 ที่มาของระยะยกเข็มหัวฉีด, ความดันในกระบอกสูบ, อัตราการปลดปล่อยความร้อน และ integrated heat release [27]

สมรรถนะทั่วไปของเครื่องยนต์ รูปที่ 3-41 เป็นที่มาของระยะยกเข็มหัวฉีด, ความดันในกระบอกสูบ, อัตราของการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release, ROHR) และ integrated heat release (IHR) ในกรณี injection timing จาก  $4^{\circ}$  BTDC ถึง  $8^{\circ}$  ATDC และ  $12^{\circ}$  BTDC ถึง TDC เส้นทึบแสดงกรณีของห้องเผาไหม้หลัก และเส้นประแสดงกรณีของห้องเผาไหม้ swirl ที่มาของความดันในทั้งสองห้องเผาไหม้เหมือนกันทั้งๆที่มี injection timing ต่างกัน เมื่อ injection timing ช้าลง ความดันในกระบอกสูบลดลงเล็กน้อยหลัง TDC จากนั้นจะสูงสุดโดยสอดคล้องกับความจริงที่ว่านี้ ยอดแรกของอัตราการปลดปล่อยความร้อนในทั้งสองห้องเผาไหม้จะน้อยกว่า และยอดที่ 2 จะเด่นชัดกว่าในกรณีของ injection timing ที่เร็วขึ้นเนื่องจากความดันในห้องเผาไหม้หลักแตกต่างออกไปเนื่องจาก timing ที่ช้ากว่า อีกสิ่งที่น่าสนใจคือ integrated heat release ในห้องเผาไหม้ทั้งสองแสดงที่มาที่จังหวะแรกของการเผาไหม้ในกรณีของ timing ที่ช้ากว่าเหมือนกัน ในทางตรงข้าม integrated heat release ในห้องเผาไหม้ swirl มากกว่าในห้องเผาไหม้หลักในกรณีของ timing ที่เร็วกว่า ดูเหมือนว่าแนวโน้มเกิดจากการปล่อยออกมาของเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ปริมาณมากจากห้องเผาไหม้ swirl สู่อังห้องเผาไหม้หลักเนื่องจาก timing ที่ล่าช้า



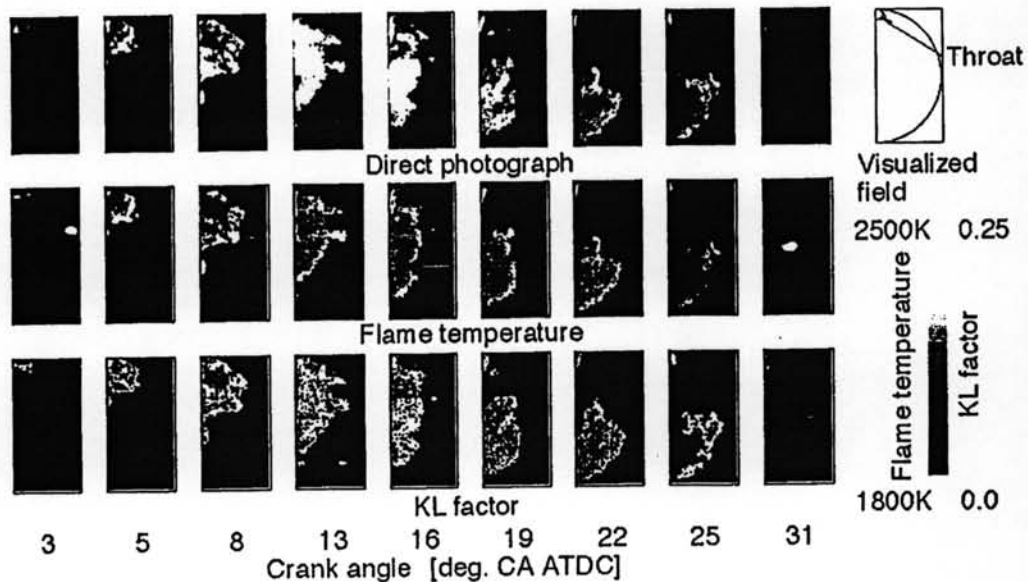
รูปที่ 3-42 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ

และรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้ swirl [27]

รูปภาพเปลวไฟ, อุณหภูมิเปลวไฟและ KL factor รูปที่ 3-42 แสดงภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟและรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้ swirl: (a) injection timing จาก  $4^{\circ}$ BTDC ถึง  $8^{\circ}$ ATDC และ (b) injection timing จาก  $12^{\circ}$ BTDC ถึง TDC เปลวไฟที่มองเห็นได้ครั้งแรกปรากฏที่ควอเตอร์ที่ 4 ในแต่ละกรณีใกล้กับหัวเผา จากนั้นเปลวไฟพัฒนาตามการเคลื่อนที่ของ swirl ทวนเข็มนาฬิกา เปลวไฟครอบคลุมบริเวณในห้องเผาไหม้ swirl เกือบทั้งหมดที่ประมาณ  $14^{\circ}$ ATDC ในกรณี (a) และที่ประมาณ  $3^{\circ}$ ATDC ในกรณี (b) เมื่อการแพร่กระจายของเปลวไฟเร็วขึ้น ความสว่างของเปลวไฟก็ยิ่งสูงขึ้น peak timing ของความสว่างสูงสุดจะเร็วขึ้นและช่วงการเผาไหม้ในกรณี (b) จะสั้นกว่าในกรณี (a) ความแตกต่างในแนวโน้มเหล่านี้ ถูกดึงจากความแตกต่างใน ignition delay เนื่องมาจาก injection timing การไหลแบบซับซ้อนปรากฏที่ประมาณ  $8^{\circ}$ ATDC ใกล้กับคอคอดในทั้งสองกรณี เหตุผลคือปฏิกิริยา

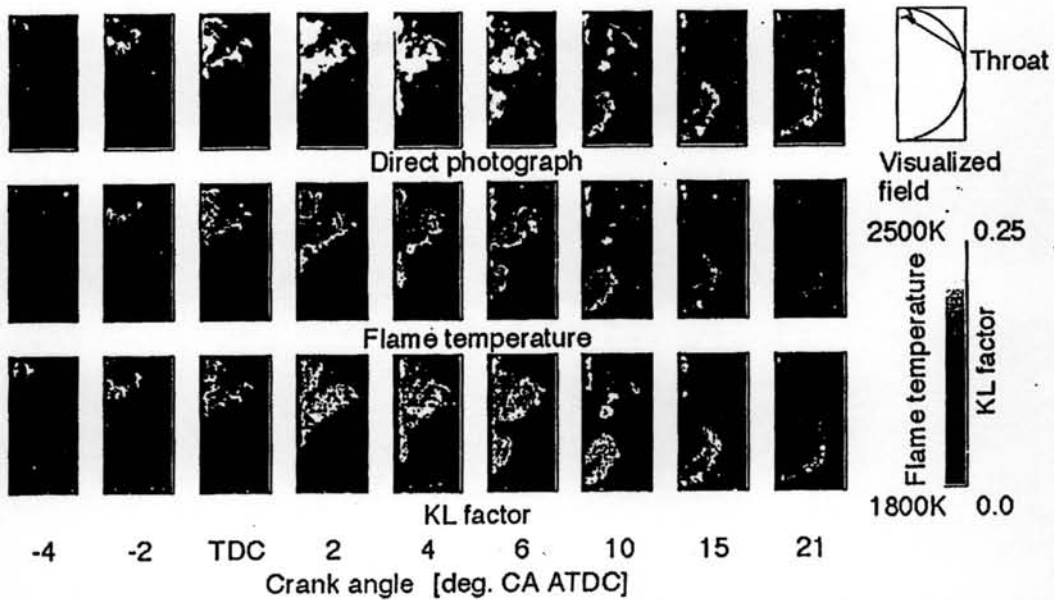
ระหว่างการเคลื่อนที่แบบ swirl และการไหลออกจากห้องเผาไหม้ swirl สู่อุณหภูมิห้องเผาไหม้หลักที่มีอยู่ใกล้คอคอดที่ timing นี้

กล่าวโดยทั่วไป แนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟเกือบเหมือนเดิม และดังที่ทราบกันดีว่า KL factor แสดงแนวโน้มในทางกลับกันของอุณหภูมิเปลวไฟโดยไม่คำนึงถึง injection timing บริเวณของอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงเกิน 2200 K ปรากฏที่บริเวณปลายเปลวไฟที่จังหวะเริ่มต้นของการเผาไหม้ นั่นคือที่ช่วงเวลากการเผาไหม้แบบ premixed โดยไม่ขึ้นกับ injection timing บริเวณที่ KL factor มีค่าสูง คงอยู่ใกล้ทางเข้าของคอคอดและใกล้ผนังด้านซ้ายของห้องเผาไหม้ swirl เนื่องมาจาก quenching effect จากช่วงกลางถึงช่วงท้ายของการเผาไหม้ นั่นคือระหว่างช่วงการเผาไหม้แบบ diffusion บริเวณที่อุณหภูมิสูงปรากฏที่บริเวณตรงกลางของบริเวณเปลวไฟ และบริเวณที่ KL factor มีค่าสูง คงอยู่รอบๆ บริเวณอุณหภูมิสูงที่ส่วนบนของห้องเผาไหม้ แนวโน้มของ KL factor นี้เกิดจากความจริงที่ว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟ ในทางกลับกัน อุณหภูมิเปลวไฟที่ด้านต่ำกว่า มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ด้านสูงกว่าของห้องเผาไหม้ เพราะว่าการไหลออกจากห้องเผาไหม้ swirl เพิ่มขึ้น และผลของการขยายตัวมากขึ้นระหว่างจังหวะนี้



รูปที่ 3-43 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor

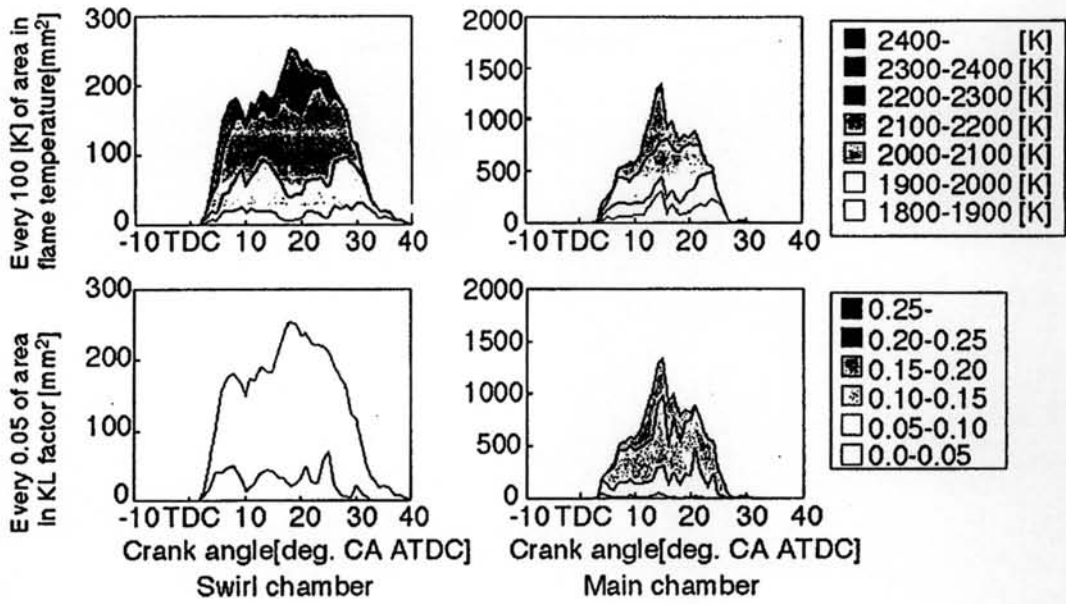
ในห้องเผาไหม้หลัก (Injection timing:  $4^{\circ}\text{CA BTDC} - 8^{\circ}\text{CA ATDC}$ ) [27]



รูปที่ 3-44 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor

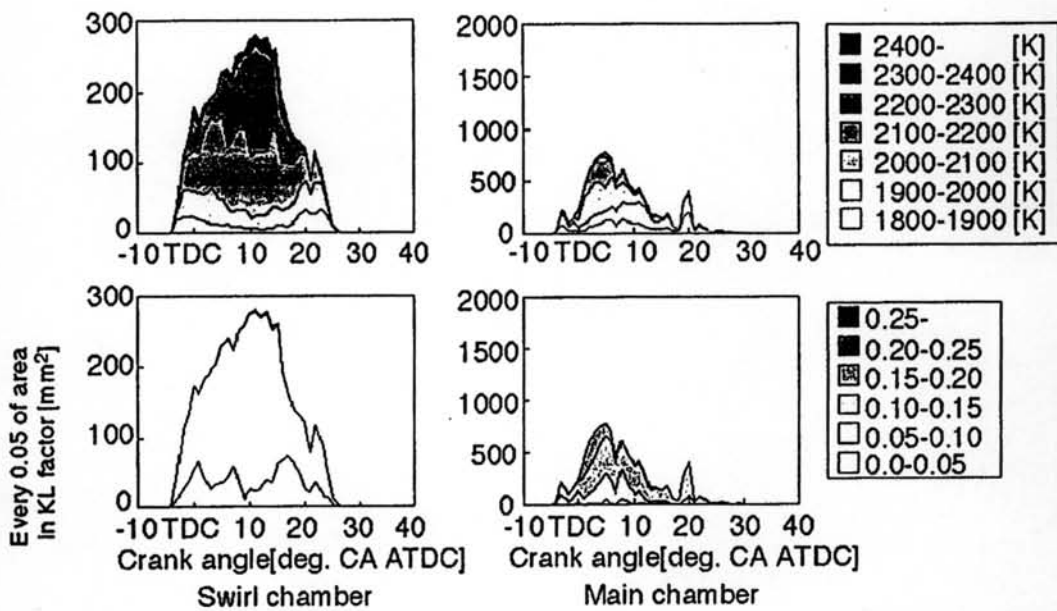
ในห้องเผาไหม้หลัก (Injection timing:  $12^{\circ}$ CA BTDC – TDC) [27]

รูปที่ 3-43 และ 3-44 แสดงภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้หลักในกรณีของช่วงการฉีดจาก  $4^{\circ}$ BTDC ถึง  $8^{\circ}$ ATDC และจาก  $12^{\circ}$ BTDC ถึง TDC ตามลำดับ แนวโน้มของอุณหภูมิเปลวไฟแสดงผลกลับกับ KL factor ในห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ swirl ดังกล่าวข้างต้น กล่าวโดยละเอียด ปรากฏการณ์การเผาไหม้เกือบเหมือนเดิมโดยไม่คำนึงถึง injection timing เปลวไฟปรากฏในห้องเผาไหม้หลักหลังจากเกิดการจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ swirl และขยายตัวขึ้นในแนวรัศมี หลังจากนั้นบริเวณที่มีดปรากฏใกล้ผนังกระบอกสูบที่อยู่ข้างๆทางออกของคอคอด ปรากฏการณ์เกิดจาก quenching เนื่องจากพื้นผิวที่เย็นของลูกสูบที่จังหวะเริ่มแรกของการเผาไหม้ อุณหภูมิสูงปรากฏที่บริเวณปลายเปลวไฟเนื่องจาก diffusion ที่รุนแรงและการผสมระหว่างปลายเปลวไฟและสิ่งแวดล้อม จากช่วงกลางถึงช่วงท้ายของช่วงการเผาไหม้ KL factor ค่าสูงปรากฏที่บริเวณตรงกลางของบริเวณเปลวไฟ ในทางกลับกัน KL factor ที่ต่ำคงอยู่ที่บริเวณปลายเปลวไฟ นั่นคือการเผาไหม้อีกครั้งของเขม่าเด็นซ์ที่บริเวณนี้ ช่วงการเผาไหม้จะสั้นกว่า และการส่องสว่างของเปลวไฟสว่างกว่าในกรณีของ injection timing ที่เร็วกว่า เพราะว่าความดันในกระบอกสูบในห้องเผาไหม้หลักสูงกว่า



รูปที่ 3-45 ที่มาของการกระจายของพื้นที่ทุก 100 K ในอุณหภูมิเปลวไฟและพื้นที่ทุก 0.05 ใน KL factor ในห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ swirl

ช่วงการฉีด :  $4^{\circ}$ CA BTDC –  $8^{\circ}$ CA ATDC [27]



รูปที่ 3-46 ที่มาของการกระจายของพื้นที่ทุก 100 K ในอุณหภูมิเปลวไฟและพื้นที่ทุก 0.05 ใน KL factor ในห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ swirl

ช่วงการฉีด:  $12^{\circ}$ CA BTDC – TDC [27]

รูปที่ 3-45 และรูปที่ 3-46 แสดงที่มาของการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟในพื้นที่  
 ทุกๆ 100 K และทุกๆ 0.05 ของพื้นที่ใน KL factor ในทั้งห้องเผาไหม้ swirl และห้องเผาไหม้หลัก  
 ในกรณีของช่วงเวลาการฉีดจาก  $4^{\circ}$  BTDC ถึง  $8^{\circ}$  ATDC และจาก  $12^{\circ}$  BTDC ถึง TDC ตามลำดับ  
 ในห้องเผาไหม้ swirl บริเวณของอุณหภูมิเปลวไฟสูงกว่า 2000 K โดยเฉพาะอย่างยิ่งมากกว่า  
 2200 K จะเด่นชัด แนวโน้มนี้เด่นชัดมากขึ้นในกรณีของ injection timing ที่เร็ว เหตุผลคือความดัน  
 ในห้องเผาไหม้ swirl สูงกว่าและ ignition delay สั้นกว่า ถ้า injection timing เร็วกว่า ในห้องเผา  
 ไหม้หลัก บริเวณของอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงลดลง และบริเวณอุณหภูมิเปลวไฟที่ต่ำกว่า 1900 K ซึ่ง  
 แทบจะไม่ปรากฏในห้องเผาไหม้ swirl เกิดขึ้นแม้ว่าจะมี injection timing เพราะว่สภาวะทางการ  
 ทดลองเป็นไว้ภาวะ และลูกสูบเคลื่อนที่จาก TDC ถึง BDC บริเวณที่อุณหภูมิเปลวไฟต่ำใหญ่ขึ้น  
 เมื่อ injection timing หน่วงลง ในห้องเผาไหม้ swirl บริเวณที่ KL factor น้อยกว่า 0.10 ครอบคลุม  
 บริเวณเปลวไฟทั้งหมดโดยไม่ขึ้นกับ injection timing บริเวณที่ KL factor ต่ำกว่า 0.05 ในกรณี  
 ของ injection timing ที่เร็วจะใหญ่กว่าในกรณีของ injection timing ที่ช้า ในห้องเผาไหม้หลัก  
 บริเวณของ KL factor ที่มากกว่า 0.10 ปรากฏโดยไม่ขึ้นกับ injection timing เนื่องจากเป็นช่วง  
 เคลื่อนลงของลูกสูบ บริเวณนี้ในกรณีของ injection timing ที่ช้าจะใหญ่กว่าในกรณีของ injection  
 timing ที่เร็ว