บทที่ 5
การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดเชื้อเพลิง

หัวเผาสำหรับระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว จะต้องมีประสิทธิภาพทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวเป็นละอองสูง และมีขนาดละอองที่เล็กมากเพื่อให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ หัวเผาในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีการพ่นละอองเชื้อเพลิงผสมกับอากาศที่มีความละเอียดสูง หรือที่เรียกว่าการฉีดแบบไหลมัว สำหรับการทดสอบเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองน้ำมัน (Mass median diameter, MMD) ของหัวเผาที่ออกแบบ จะนำผลทดสอบที่หาได้เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองน้ำมันกับสมการจากการศึกษาของ Alfonso Ganan Calvo

ในส่วนการทดสอบจะใช้หัวเผาแบบที่ 5.1 เนื่องจากหัวเผาได้ออกแบบเพื่อการทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองน้ำมัน (Mass median diameter, MMD) หัวเผาแบบที่ 5.1 เป็นหัวเผาที่มีการพัฒนารูปแบบมาจากหัวเผาแบบที่ 5 ได้ถูกออกแบบให้มีการต่อท่อทรงกระบอกยาวสำหรับชะลอความเร็วของเชื้อเพลิงผสม ความยาวของท่อปรับลดหรือเพิ่มความยาวได้ตั้งแต่ช่วง 5 ถึง 35 cm โดยออกแบบให้ท่อยาวนี้แยกเป็นท่อนๆ ประกอบกัน หัวเผาแบบที่ 5.1 สำหรับทดสอบหา MMD ดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 หัวเผาแบบที่ 5.1 สำหรับทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองน้ำมัน (MMD)

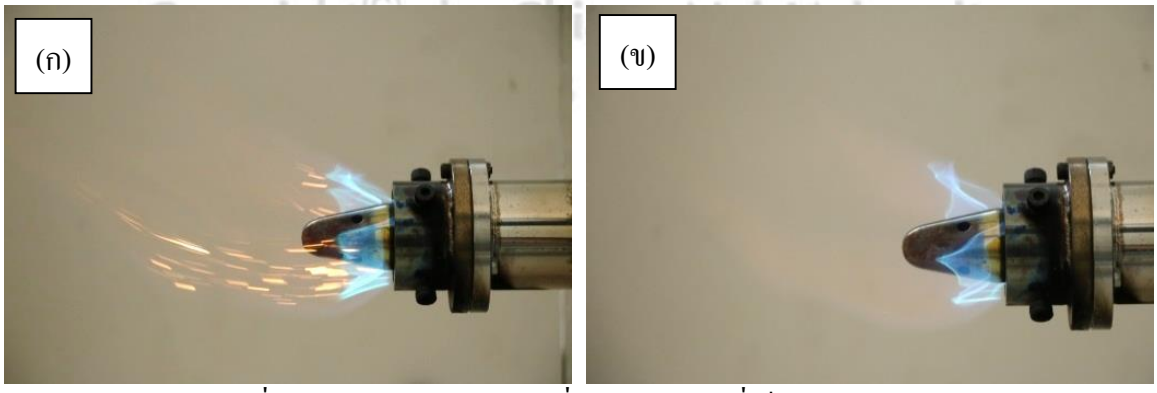
5.1 การทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองน้ำมัน (MMD) จากหัวเผาแบบที่ 5.1 จะหาจากเงื่อนไขการทดสอบได้แก่ อัตราการไหลเชื้อเพลิง อัตราการไหลอากาศปฐมภูมิและอัตราการไหลอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเงื่อนไขทดสอบจะให้ผลการเผาไหม้ที่เกิดหยดน้ำมันออกจากหัวเผาที่เห็นด้วยตาเปล่า สำหรับการทดสอบเพื่อหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน การศึกษานี้มีความสนใจในส่วนของหัวเผาที่ใช้เฉพาะอากาศปฐมภูมิเข้าผสมเชื้อเพลิงในการสร้างละอองขนาดเล็ก ทำการทดสอบเพื่อหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน ที่อัตราการไหลอากาศปฐมภูมิ 0.2 SCFM อัตราการไหลเชื้อเพลิง 4, 5, 6, 7 และ 8 ml/min ทดสอบที่ความยาวท่อ 20 และ 35 cm. จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้ขนาด MMD ของหยดน้ำมันเปรียบเทียบกับสมการจากการศึกษาของ Alfonso Ganan Calvo เพื่อวิเคราะห์ขนาด MMD ของหยดน้ำมันที่ได้จากหัวฉีดที่มีหลักการเดียวกัน

5.2 ขั้นตอนการทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน

การหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน ในการศึกษานี้จะหาได้จากวิธีการทดสอบเผาไหม้ โดยที่ค่าขนาด MMD ของหยดน้ำมันหนึ่งค่าได้มาจากช่วงการทดสอบสองตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจะมีค่าขนาดหยดน้ำมันในหนึ่งหน่วยปริมาตร และอัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำมันต่อมวลของเหลวทั้งหมด ซึ่งสามารถประมาณการณ์ได้ว่าทั้งสองตัวอย่าง มีการกระจายข้อมูลแบบการแจกแจงปกติ (Normal distribution) และช่วงของการทดสอบสองตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย (μ = MMD) เท่ากัน ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> : ทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาเงื่อนไขที่จุดระเหยหมดของหยดละอองพอดี ตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 (ก) แสดงผลทดสอบเงื่อนไขเผาไหม้ที่เห็นหยดละออง
และ (ข) เงื่อนไขจุดระเหยหมดของหยดละอองพอดี

สิ่งที่ต้องการจากขั้นตอนที่ 1 คือ (1) ความเร็วเฉลี่ย (V_{avg})

(2) ความหนาแน่นของไอเชื้อเพลิง ($\rho_{fuel,vapor}$)

การคำนวณ

จากสมการ $\dot{m} = \rho A \dot{V}$

จัดรูปสมการได้ว่า

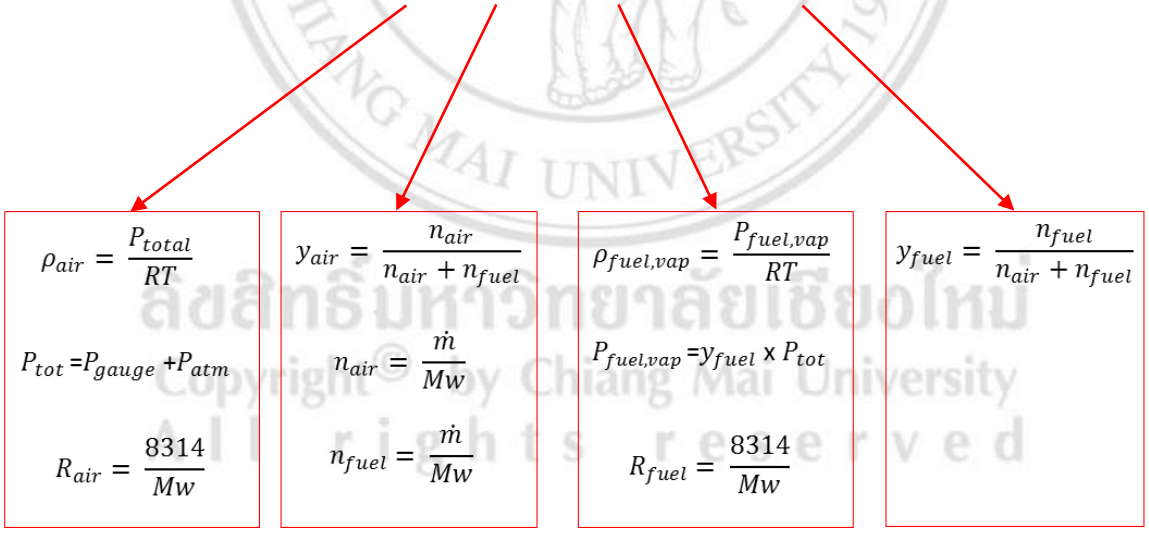
$$V_{avg} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel})}{A_{exit}\rho_{avg}} \quad \text{สมการ (5.1)}$$

Know : $\dot{m}_{air}, \dot{m}_{fuel}, A_{exit}$

Unknow : V_{avg} , ρ_{avg}

ρ_{avg} หาได้จากสมการ

$$\rho_{avg} = \rho_{air}(y_{air}) + \rho_{fuel,vapor}(y_{fuel}) \quad \text{สมการ (5.2)}$$



นำ ρ_{avg} ที่ได้จากสมการ (5.2) แทนในสมการ (5.2) จะได้ V_{avg}

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> : ทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้เปลวไฟมีลักษณะรูปร่างเหมือนเปลวไฟจากขั้นตอนที่ 1 แต่เปลวไปที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ต้องมีหยดเชื้อเพลิงออกจากหัวเผา ดังรูปที่ 5.2 (ก) โดยการปรับลดอากาศปฐมภูมิในการทดสอบลงจากขั้นตอนที่ 1 ในขั้นตอนที่ 2 จะกำหนดให้ V_{avg} มีค่าเท่ากับขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากให้เปลวไฟที่ลักษณะเหมือนกัน

สิ่งที่ต้องการจากขั้นตอนที่ 2 คือ

(1) สัดส่วนโดยปริมาตรของไอน้ำมันและปริมาตรของเหลวทั้งหมด

$$\frac{y_{fuel,vapor}}{y_{fuel,vapor} + y_{fuel,liquid}}$$ สมการ (5.3)

(2) ขนาดหยดน้ำมันโดยใช้ความสัมพันธ์ตามเวลา

$$t = \frac{r_l D_0^2}{8 r \mathcal{D}_{12} (m_{1,s} - m_{1,e})}$$ สมการ (2.6)

การคำนวณสัดส่วนโดยปริมาตรของไอน้ำมันและปริมาตรของเหลวทั้งหมด

จากสมการ (5.1)

$$\bar{\rho}_{mix} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel})}{A V_{avg}}$$ สมการ (5.1)

Assume : V_{avg} กำหนดเท่ากับขั้นตอนที่ 1 เปลวไฟที่ไม่มีหยดน้ำมัน รูปที่ 5.2(ข)

Known : $\dot{m}_{air}, \dot{m}_{fuel}, A_{exit}$

Unknown : $\bar{\rho}_{mix}$

$\bar{\rho}_{mix}$ หาได้จากสมการ (5.4) และสมการ (5.5)

$$\bar{\rho}_{mix} = \rho_{air}(y_{air}) + \rho_{fuel,vapor}(y_{fuel,vapor}) + \rho_{fuel,liquid}(y_{fuel,liquid})$$

สมการ (5.4)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$y_{air} + y_{fuel,vapor} + y_{fuel,liquid} = 1 \qquad \text{สมการ (5.5)}$$

จากสมการ (5.4) และสมการ (5.5)

Assume : $\rho_{fuel,vapor}$ เท่ากับขั้นตอนที่ 1

Known : $\bar{\rho}_{mix}$, ρ_{air} , y_{air} , $\rho_{fuel,liquid}$

Unknown : $y_{fuel,vapor}$, $y_{fuel,liquid}$

แก้ปัญหาสมการ (5.4) และสมการ (5.5) แบบระบบ 2 สมการ 2 ตัวแปรไม่ทราบค่า เพื่อหา $y_{fuel,vapor}$ และ $y_{fuel,liquid}$ แทนค่าในสมการ (5.3) จะได้สัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด

จากขั้นตอนที่ 2 จะได้ข้อมูลจากการทดสอบคือ

(1) ขนาดหยดละอองของน้ำมัน (μm)

(2) สัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด ($y_{fraction} / y_{total}$)

ขั้นตอนที่ 3 : ทำการทดสอบอีกครั้งโดยเพิ่มหรือลดอัตราการไหลเชื้อเพลิง (ปรับไม่เกิน $\pm$1 ml/min) แต่ต้องอยู่ในช่วงอัตราการไหลเชื้อเพลิงทดสอบ 4 ถึง 8 ml/min

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณเพื่อหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน จากการกำหนดให้ขนาดหยดน้ำมันที่ได้จากการทดสอบมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) กำหนดให้ข้อมูลสองชุดมีค่า MMD ของหยดน้ำมัน (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ที่เท่ากัน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมี 2 ชุด ดังนี้

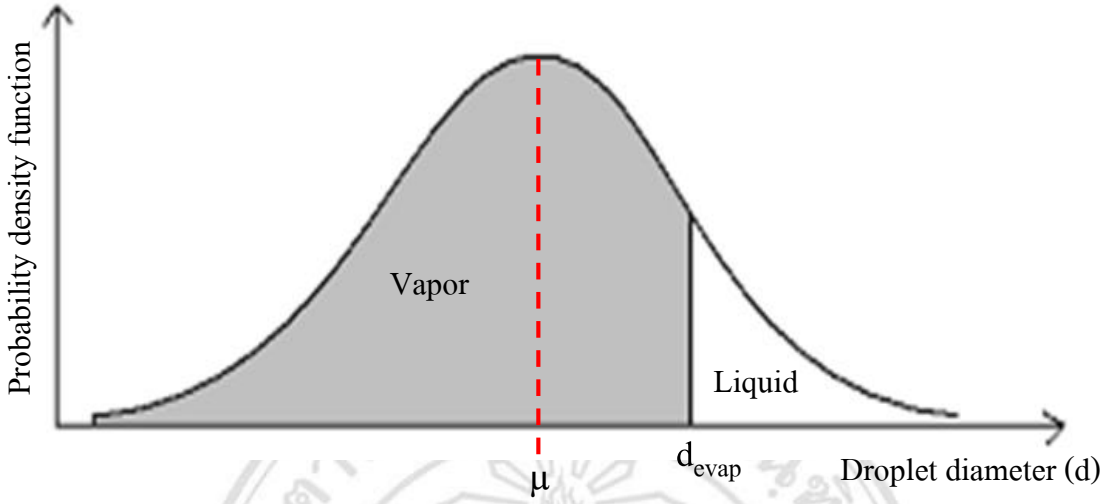
ข้อมูลชุด 1 : - ขนาดหยดละอองน้ำมัน d_{evap1}

- สัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด ,c1

ข้อมูลชุด 2 : - ขนาดหยดละอองน้ำมัน d_{evap2}

- สัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด ,c2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายข้อมูลการทดสอบแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution)

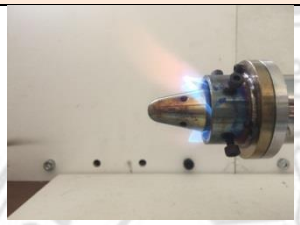
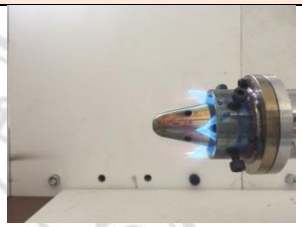
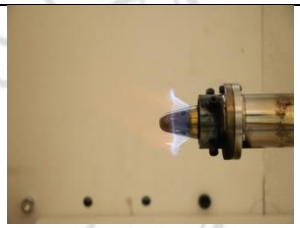
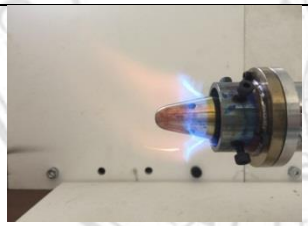
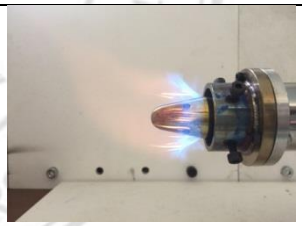
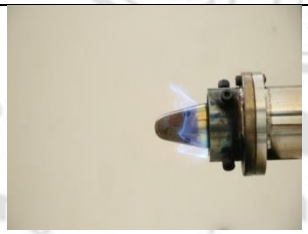
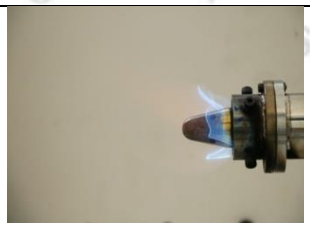
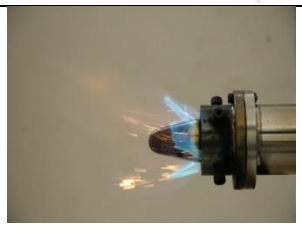
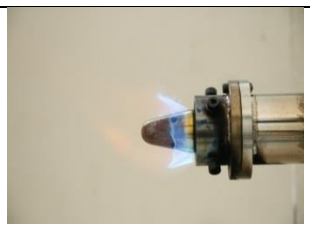
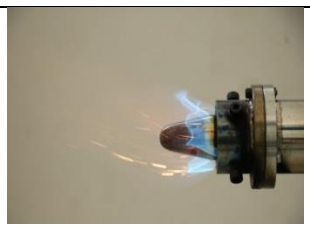
จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสองชุด สามรถนำมาประมาณขอบเขตหรือพื้นที่บนกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) แสดงดังรูปที่ 5.3 แกน x คือ Droplet diameter (d) เป็นแกนแสดงขนาดของหยดน้ำมันที่มี d_{evap} เป็นตัวแบ่งขอบเขตพื้นที่ของ Vapor กับ Liquid ส่วนแกน y เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability density function) ตัวแปรที่กำหนดขนาดพื้นที่ส่วน Vapor และ Liquid นั้นคืออากาศปฐมภูมิ ส่วนการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเชื้อเพลิงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ของ Vapor กับ Liquid น้อยมาก ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าข้อมูลทดสอบสองชุดมีขนาดพื้นที่ของ Vapor กับ Liquid เท่ากัน สำหรับการหาค่า MMD ของหยดน้ำมัน (μ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) จากฟังก์ชันความน่าจะเป็น ดังนี้

$$c = \int_0^{\frac{\pi}{6}d_{evap}^3} \frac{1}{3\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\left(vol\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} - \mu\right)^2}{2\sigma^2}} (vol)^{-2/3} \left(\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} dv \qquad \text{สมการ (5.6)}$$

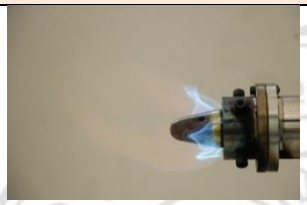
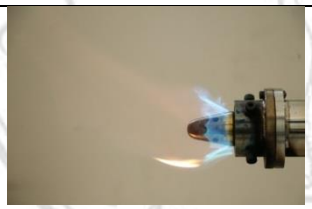
สมการ (5.6) นี้จะทราบค่า $V_{evap} = (\pi d^3)/6$ และค่า $G(V_{evap}) = c1$ และ $c2$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ มีตัวแปรที่ต้องการหาคือ ค่า MMD = μ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ สามารถหาได้จากการแก้ระบบสมการ 2 สมการและ 2 ตัวแปรไม่ทราบค่าจากสองชุดข้อมูล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมันที่ความยาวท่อ 35 cm

	เปลวไฟขั้นตอนที่ 1 ไม่มีหยดน้ำมัน		เปลวไฟขั้นตอนที่ 2 มีหยดน้ำมัน		
Fuel flow (ml/min)	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**d (μm) , $y_{fraction}$**
4	0.3 , 30		0.2 , 38		78.661, 0.995
5	0.3 , 60		0.2 , 75		62.354, 0.987
6	0.3 , 60		0.2 , 85		61.920, 0.975
6	0.35, 50		0.2, 80		65.026, 0.971
7	0.35, 60		0.2, 80		60.825, 0.987
8	0.35, 60		0.2, 80		60.475, 0.988

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมันที่ความยาวท่อ 35 cm (ต่อ)

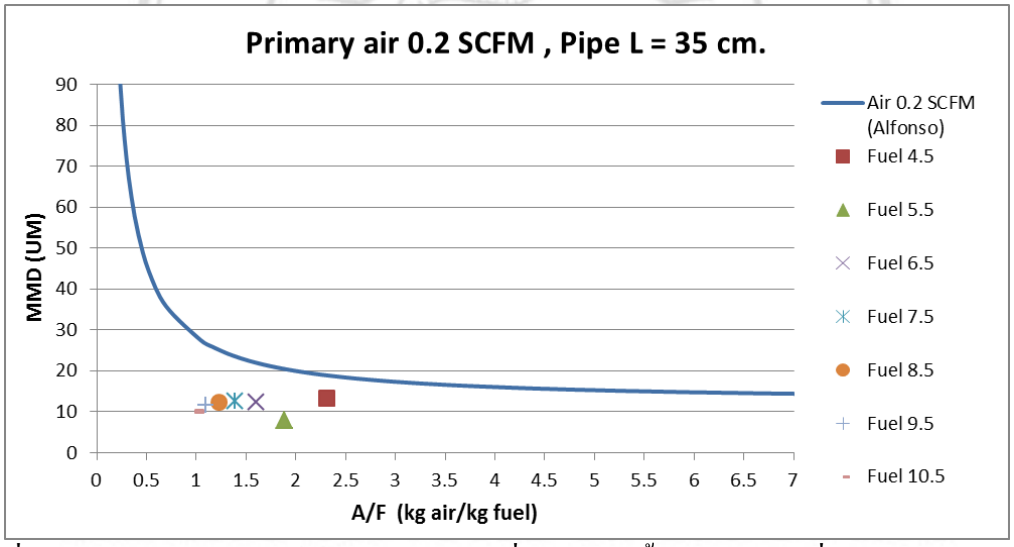
	เปลวไฟขั้นตอนที่ 1 ไม่มีหยดน้ำมัน		เปลวไฟขั้นตอนที่ 2 มีหยดน้ำมัน		
Fuel flow (ml/min)	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**d (μm), $y_{fraction}$**
9	0.35 , 70		0.2 , 90		57.052, 0.990
10	0.35 , 80		0.2 , 100		54.151, 0.990
11	0.35 , 95		0.2 , 110		50.267, 0.994

ตารางที่ 5.1 คือผลทดสอบหาขนาดหยดน้ำมัน ที่ความยาวท่อ 35 cm จากผลทดสอบพิจารณาเฉพาะเปลวไฟที่ได้จากการทดสอบขั้นตอนที่ 2 เปลวไฟแบบมีหยดน้ำมัน ที่มีการประมาณความความเร็วเฉลี่ย (V_{avg}) มีค่าเท่ากับเปลวไฟที่ไม่มีหยดน้ำมันจากการทอสอบขั้นตอนที่ 1 เพื่อใช้ประกอบการหาค่าสัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด ส่วนการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตรของหยดน้ำมัน หาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย (V_{avg}) และระยะความยาวท่อทดสอบ ซึ่งจะนำข้อมูลค่าสัดส่วนปริมาตรไอน้ำมันต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตรของหยดน้ำมันเพื่อหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน ผลการหา MMD ของน้ำมันดังตารางที่ 5.2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำมัน (MMD) ที่ความยาวท่อ 35 cm

A/F Ratio	Fuel flow rate (ml/min)	Fuel flow average (ml/min)	MMD (μm)
2.31	4,5	4.5	13.26
1.89	5,6	5.5	7.88
1.60	6,7	6.5	12.36
1.39	7,8	7.5	12.65
1.23	8,9	8.5	12.21
1.10	9,10	9.5	11.46
0.99	10,11	10.5	10.08

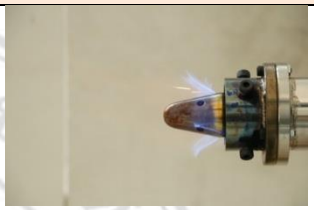
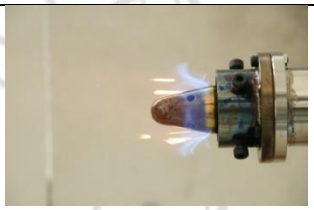
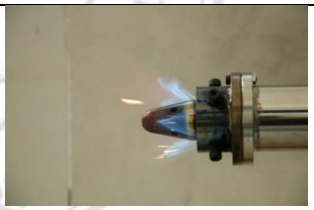
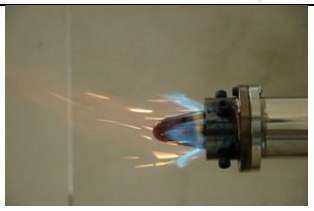
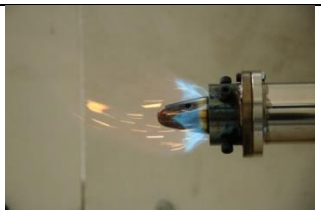


รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำมัน (MMD) ที่ความยาวท่อ 35 cm กับสมการศึกษาของ Alfonso และ Ganan Calvo

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

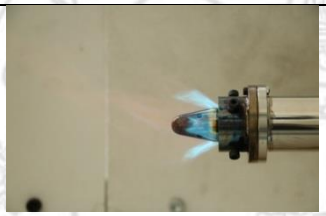
จากรูปที่ 5.4 เป็นผลทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน ทดสอบที่ความยาวท่อ 35 cm และกำหนดอากาศปฐมภูมิอัตราการไหล 0.2 SCFM เปรียบเทียบกับสมการศึกษาโดย Alfonso และ Ganan Calvo ที่มีผลการศึกษาเป็นในลักษณะที่ลดลงของขนาด MMD ของไหลที่ทดสอบตามการเพิ่มอากาศผสม สำหรับผลทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่าหัวเผาที่ออกแบบให้ขนาด MMD ของหยดน้ำมันประมาณในช่วง 7.88 – 13.26 μm ซึ่งมีค่าไม่ตรงตามกับสมการของ Alfonso Ganan Calvo เนื่องจากเป็นสมการทดสอบของไหลที่เป็นน้ำและเอทานอล

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมันที่ความยาวท่อ 20 cm

	เปลวไฟขั้นตอนที่ 1 ไม่มีหยดน้ำมัน		เปลวไฟขั้นตอนที่ 2 มีหยดน้ำมัน		
Fuel flow (ml/min)	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**1^{st} air (SCFM) , 2^{nd} air (SCFH)**	**Picture**	**d (μm) , $y_{fraction}$**
4	0.3 , 40		0.2 , 70		54.516, 0.949
5	0.3 , 52		0.2 , 80		49.557, 0.965
6	0.3 , 55		0.2 , 70		48.246, 0.989
6	0.35, 55		0.2, 85		47.636, 0.971
7	0.35, 65		0.2, 90		44.729, 0.981
8	0.35, 70		0.2, 90		43.349, 0.988

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

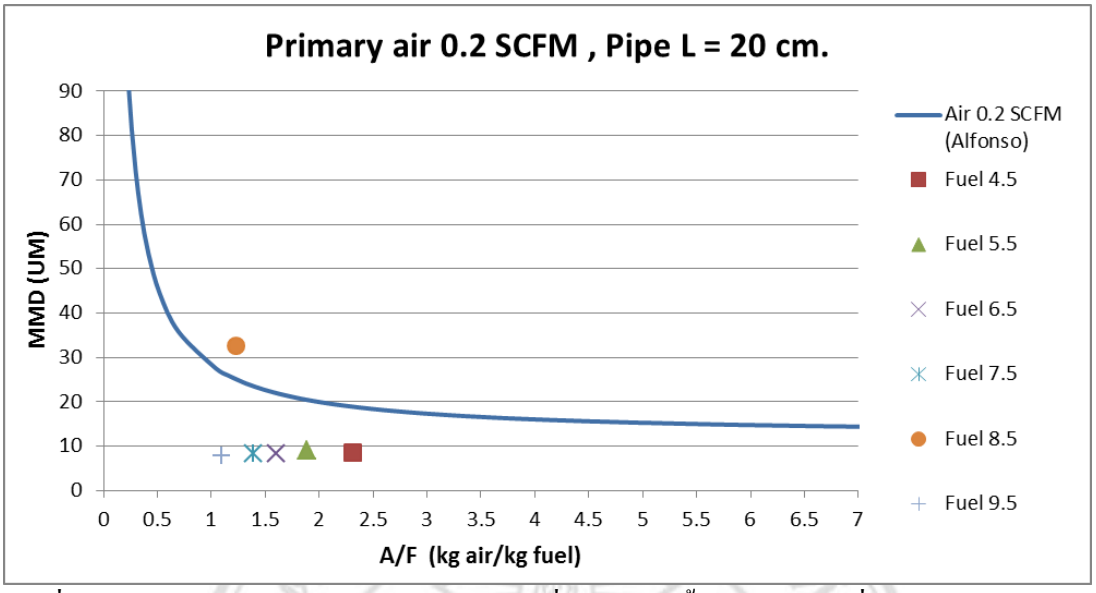
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมันที่ความยาวท่อ 20 cm (ต่อ)

	เปลวไฟขั้นตอนที่ 1 ไม่มีหยดน้ำมัน		เปลวไฟขั้นตอนที่ 2 มีหยดน้ำมัน		
Fuel flow (ml/min)	**1st air (SCFM) , 2nd air (SCFH)**	**Picture**	**1st air (SCFM) , 2nd air (SCFH)**	**Picture**	**d (μm), $y_{fraction}$**
9	0.35 , 70		0.2 , 100		43.127, 0.981
10	0.35 , 80		0.2 , 110		40.934, 0.983

ตารางที่ 5.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำมัน (MMD) ที่ความยาวท่อ 20 cm

A/F Ratio	Fuel flow rate (ml/min)	Fuel flow average (ml/min)	MMD (μm)
2.31	4,5	4.5	8.59
1.89	5,6	5.5	9.14
1.60	6,7	6.5	8.24
1.39	7,8	7.5	8.25
1.23	8,9	8.5	32.72
1.10	9,10	9.5	7.72

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำมัน (MMD) ที่ความยาวท่อ 20 cm กับสมการศึกษาของ Alfonso และ Ganan Calvo

จากรูปที่ 5.5 เป็นผลทดสอบหาขนาด MMD ของหยดน้ำมัน ทดสอบที่ความยาวท่อ 20 cm และกำหนดอากาศปฐมภูมิอัตราการไหล 0.2 SCFM เปรียบเทียบกับสมการศึกษาโดย Alfonso และ Ganan Calvo ที่มีผลการศึกษาเป็นในลักษณะที่ลดลงของขนาด MMD ของไหลที่ทดสอบตามการเพิ่มอากาศผสม หรือการเพิ่มอัตราส่วน A/F สำหรับผลทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่าหัวเผาที่ออกแบบให้ขนาด MMD ของหยดน้ำมันประมาณช่วง 8.24 – 9.14 μm (ช่วงทดสอบอัตราการไหลเชื้อเพลิง 2 – 8 ml/min) ซึ่งมีค่าไม่ตรงตามกับสมการของ Alfonso Ganan Calvo เนื่องจากเป็นสมการทดสอบของไหลเป็นน้ำและเอทานอล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved