



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อช่วยการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของช่วงกว้างการติดไฟ

Development of Learning Equipment for Flammability Limits

นามผู้วิจัย นายณัฐชัย ละอองทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์อภิัญญา ดวงจันทร์, Ph.D. )

ประธานสาขาวิชา

( รองศาสตราจารย์สุรชัย ระตะนะอาพร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อช่วยการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของช่วงกว้างการติดไฟ

Development of Learning Equipment for Flammability Limits

โดย

นายณัฐชัย ละอองทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

พ.ศ. 2550

ณัฐชัย ละอองทอง 2550: การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อช่วยการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของช่วงกว้างการติดไฟ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย) สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี, Ph.D. 95 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ประกอบการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของช่วงกว้างการติดไฟ ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มที่ใช้ตามบ้านเรือนโดยทั่วไป ว่ามีผลต่ออัตราการลุกไหม้แตกต่างกันอย่างไร เพื่อเป็นสื่อประกอบการเรียนการสอน ด้านการป้องกันและระงับอัคคีภัยในอนาคต ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย แผ่น stainless steel plate ขึ้นรูปเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างประมาณ 50 เซนติเมตร ความยาว 80 เซนติเมตร สูง 75 เซนติเมตร ใต้กระจกใส ติดฟิล์มป้องกันการแตกของกระจก และเพื่อให้มองเห็นการเผาไหม้ด้านใน กระจกหนา 5 มิลลิเมตรติดตั้ง 3 ด้าน มีประตูสำหรับควบคุมปริมาณอากาศ 1 บาน ด้านล่างติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟ (Ignition Source) และพัดลมสำหรับใช้ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ด้านบนของอุปกรณ์ ถูกออกแบบให้สามารถเปิดออกได้อัตโนมัติ เมื่อเกิดการระเบิด (explosion) พร้อมเข็มบอกปริมาณเชื้อเพลิงที่ปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยระบบไฟฟ้า

ผลการทดลองการทำงานพบว่าอุปกรณ์สามารถใช้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับอากาศ ตลอดจนความหมายและคำจำกัดความต่างๆ ได้ดี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องขีดจำกัดการติดไฟขั้นต่ำ Lower Flammable Limit (LFL) ขีดจำกัดการติดไฟขั้นสูง Upper Flammable Limit (UFL) ปรากฏการณ์ของการเกิด Flash Over การติดไฟในลักษณะเปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion Flame) ตลอดจนจะได้เข้าใจในอันตรายจากปรากฏการณ์ Back Draft ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาอุปกรณ์การเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของไฟที่ออกแบบนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอด เพื่อจะได้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอน และสามารถสร้างแรงบันดาลใจให้วิศวกรรุ่นต่อไปได้มีแนวคิดเพื่อพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการศึกษาด้านการดับเพลิงต่อไป

Natthun Laongthong 2007: Development of Learning Equipment for Flammability Limits. Master of Engineering (Fire Protection Engineering), Major Field: Fire Protection Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Mr. Nattasak Boonme, Ph.D. 95 pages.

The objective of this thesis is to develop an apparatus for demonstrating ignition, and burning behaviors of premixed gases. The fuel gas mainly used in the experiment is LPG (Liquefied Petroleum Gas). The apparatus compartment was a rectangular box of 50 cm width 80 cm long and 75 cm height. The compartment frame was constructed with 2 mm thick stainless steel. Three compartment walls were installed with a 5 mm thick explosion proof glass for visual observation while one wall was installed with a stainless steel sheet which can be slid up for fresh air ventilation. A compartment roof was installed with a stainless steel sheet. The roof was uniquely designed to be able to detach from the compartment frame to relief pressure when the combustible gas was ignited. An electrical ignition source was placed on the compartment floor. The fuel gas was supplied via a small fuel port installed on the compartment floor. The amount of fuel supplied was carefully monitored by a control valve. To promote a uniform combustible mixture in the compartment, an electrical paddle was installed at the compartment floor near the fuel port.

The experimental results of ignition show fairly good agreement with the premixed flame ignition theory. The lower and upper flammable limits of combustible mixtures can be demonstrated with the proposed apparatus. Other compartment fire behaviors such as Backdraft can also be illustrated. The apparatus will enhance a learning process of fire safety personnel in order to develop a qualified fire safety staff for a building.

\

---

Student's signature

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อภิญา ดวงจันทร์ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ และ รศ.ดร.สุรัช รัตนระอาพร ที่ได้ให้โอกาส และความเมตตาแนะนำในการเรียนต่างๆ และขอขอบคุณ รศ.ดร.เดชา พวงดาวเรือง ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้ ขอขอบคุณ คุณกฤษฎา ประเสริฐสุขโข และคุณจิตรลดา ศรีไพทสมันต์ ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ น.ส.เครือมาส แสงจันทร์ และ น.ส.ภาวิณี อัมพันธ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมป้องกันและระงับอัคคีภัย ที่ได้ช่วยดำเนินการด้านเอกสาร

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ณัฐชัย ละอองทอง

พฤษภาคม 2550

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	15
อุปกรณ์	15
วิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	36
ผล	36
วิจารณ์	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	75
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติการติดไฟของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	7
2	แสดงการคำนวณความเข้มข้นของเชื้อเพลิงแต่ละช่วงเซนติเมตรของไม้ บรทัด	13
3	แสดงรายการอุปกรณ์ส่วนประกอบ โครงสร้าง	16
4	สรุปจำนวนการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่ตำแหน่งความเข้มข้นต่างๆ	35

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สามเหลี่ยมไฟแสดงองค์ประกอบของไฟ(สามเหลี่ยมไฟ)	4
2	ตัวอย่างของเปลวไฟผสมก่อน	5
3	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติการติดไฟของแก๊สผสมติดไฟได้	6
4	ไดอะแกรมแสดงการเผาไหม้ของเปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion flame)	8
5	ตัวอย่างการเผาไหม้แบบราบเรียบและการเผาไหม้แบบปั่นป่วนของเปลวไฟแบบแพร่	9
7	แสดงรายละเอียดการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สาธิต	17
8	แสดงส่วนประกอบด้านหน้าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้ว	18
9	แสดงการผ่านแผ่นเหล็กประกอบกันวัด เพื่อแสดงปริมาณเชื้อเพลิงในตำแหน่งด้านหน้า	19
10	แสดงส่วนประกอบด้านข้างขวามือเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้ว	20
11	แสดงส่วนประกอบโครงสร้างด้านซ้าย และตำแหน่งการติดตั้งจุดต่อแก๊สเข้าห้องเผาไหม้ และจุดต่อสายควบคุมเชื้อเพลิงและระบบไฟฟ้าต่างๆของอุปกรณ์	21
12	แสดงการติดตั้ง(ก)ระบบสวิตซ์การเปิดปิดไฟฟ้าของระบบควบคุม และ(ข)ท่อแก๊สด้านข้าง	21
13	แสดงส่วนประกอบโครงสร้างด้านหลังของอุปกรณ์	22
14	แสดงกลไกการประกอบกันวัดเข้ากับแกนวัด	23
15	แสดงการติดตั้งแกนวัดอีกด้านหนึ่งของตู้	24
16	แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมภายในห้องเผาไหม้	25
17	แสดงตำแหน่งจุดปล่อยแก๊ส พัดลม และ Ignition source	25
18	แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง	26
19	แสดงการติดตั้งพัดลมสำหรับกวนเพื่อผสมเชื้อเพลิงกับอากาศภายในตู้	27
20	แสดงการติดตั้งตัวเปิดปิดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และตำแหน่งการปรับตั้ง	27
21	แสดงการติดตั้งระบบ แหล่งไฟฟ้า ควบคุมระบบภายในทั้งหมด	28

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงภาพรวมการคิดระบบภายในของระบบไฟฟ้าควบคุมทั้งหมด	28
23	แสดงการประกอบ และโครงสร้างการเปิดของฝาเปิด	29
24	แสดงฝาเปิดด้านบนที่สามารถทำงานได้พร้อมกันเมื่อเกิดแรงดันภายในตู้	30
25	แสดงอุปกรณ์สวิตช์ควบคุมระบบการทำงานของอุปกรณ์ ทั้งหมด	31
26	แสดงตำแหน่งการต่อสายจาก ตัวควบคุมและสายเชื่อมเพลิงเข้ากับตัวตู้สวิต	31
27	แสดงการต่อระบบลดแรงดันจากถังแก๊สหุงต้มและสายต่อต่างๆ	32
28	แสดงขนาดของกล่องที่ออกแบบเพื่อใช้ประกอบการสาธิตการเกิด Back draft ในกรณีพิเศษอื่นๆ	32
29	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 1/30 วินาที	37
30	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 2/30 วินาที	38
31	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 3/30 วินาที	38
32	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 4/30 วินาที	39
33	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 5/30 วินาที	39
34	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 2 $X = 1.82\%$ ที่เวลา 6/30 วินาที	40
35	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 1/30 วินาที	41
36	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 2/30 วินาที	41
37	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 3/30 วินาที	42
38	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 4/30 วินาที	42
39	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 5/30 วินาที	43
40	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 3 $X = 2.8\%$ ที่เวลา 6/30 วินาที	43
41	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4 $X = 3.6\%$ ที่เวลา 1/30 วินาที	44
42	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4 $X = 3.6\%$ ที่เวลา 2/30 วินาที	45
43	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4 $X = 3.6\%$ ที่เวลา 3/30 วินาที	45
44	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4 $X = 3.6\%$ ที่เวลา 4/30 วินาที	46
45	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4 $X = 3.6\%$ ที่เวลา 5/30 วินาที	46



### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในช่วง 23 cm (8.7 % ) เมื่อมีการจุด ประกายไฟก็แก๊ส หุงต้มไม่สามารถเผาไหม้ได้	62
72	แสดงการเปิดหน้าต่างเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้	63
73	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 1/30 วินาที	63
74	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 2/30 วินาที	64
75	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 3/30 วินาที	64
76	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 4/30 วินาที	65
77	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 5/30 วินาที	65
78	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9 $X = 8.7\%$ ที่เวลา 6/30 วินาที	66
79	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 1/30 วินาที	67
80	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 2/30 วินาที	68
81	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 3/30 วินาที	68
82	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 4/30 วินาที	69
83	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 5/30 วินาที	69
84	แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10 $X = 9.1\%$ ที่เวลา 6/30 วินาที	70
85	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มที่ได้จากทฤษฎี และ จากการทดลอง	71
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 1.82 % โดยปริมาตร (1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	76
2	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 2.8 % โดยปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	77

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
3	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 3.6 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	78
4	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 5 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 4.0 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	79
5	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 6 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 4.7 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	80
6	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 7 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.0 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	81
7	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 8 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.3 % โดย ปริมาตร	85
8	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 9 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.7 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	90
9	ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 10 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 9.0 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)	91

### สัญลักษณ์และคำย่อ

$X_L$	=	เศษส่วนโดยโมลที่ความเข้มข้น LFL
$X_I$	=	เศษส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิง
$X_{ST}$	=	เศษส่วนโดยโมลที่ความเข้มข้นสำหรับการเผาไหม้โดยสมบูรณ์
$X_U$	=	เศษส่วนโดยโมลที่ความเข้มข้น UFL
$m$	=	มวลของเชื้อเพลิง, g
$\Delta h_C$	=	อัตราการเผาไหม้, kJ/mole
$V_{TOTAL}$	=	ปริมาตรโดยรวมของห้องเผาไหม้
$V_F$	=	ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้
$V_{AIR}$	=	ปริมาตรของอากาศในห้องเผาไหม้
$V_{F,L}$	=	ปริมาตรต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้ของห้องเผาไหม้
$V_{F,ST}$	=	ปริมาตรความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในสภาวะเผาไหม้ที่สมบูรณ์
$V_{F,U}$	=	ปริมาตรความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้

**คำย่อ**

LEL	=	Lower Explosion Limit
LFL	=	Lower Flammable Limit
UEL	=	Upper Explosion Limit
UFL	=	Upper Flammable Limit
AIT	=	Auto Ignition Temperature
LPG	=	Liquefied Petroleum Gas
MW	=	Molecular Weight
BP	=	Boiling Point at 1 atmosphere, °F
Sol	=	Solubility in water at 68 °F, % by weight
Fl.P	=	Flash Point
VP	=	Vapor Pressure at 68 °F
RGasD	=	Relative Density of Gases referenced to air = 1
IP	=	Ionization potential, eV
MLT	=	Melting point for solids, °F
IDLH	=	Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations

## การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อช่วยการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของช่วงกว้างการติดไฟ

### Development of Learning Equipment for Flammability Limits

#### คำนำ

เมื่อปี พ.ศ. 2533 ได้เกิดอุบัติเหตุรถแก๊สพลิกคว่ำ และเกิดเพลิงไหม้ขึ้น เหตุการณ์ในครั้งนั้นได้สร้างความสูญเสียกว่า 400 ล้านบาท ต่อมาเมื่อปี 2534 ก็ได้เกิดเพลิงไหม้สินค้าอันตรายที่คลังเก็บสินค้าท่าเรือคลองเตย เหตุการณ์ในครั้งนี้ได้ส่งผลให้รัฐบาลประเทศสวีเดน ยื่นมือเข้ามาเพื่อให้ความช่วยเหลือด้านการป้องกันและระงับอัคคีภัยแก่รัฐบาลไทย โดยให้เจ้าหน้าที่ดับเพลิงของไทย ไปเรียนรู้เกี่ยวกับด้านการป้องกันและระงับอัคคีภัยที่ประเทศสวีเดน และเมื่อเรียนจบแล้วเจ้าหน้าที่เหล่านั้นก็ได้รับการฝึกให้เป็นครูฝึกดับเพลิง เพื่อถ่ายทอดให้ความรู้กับพนักงานดับเพลิงต่างๆ ของกองบังคับการตำรวจดับเพลิงในเวลาต่อมา

ข้าพเจ้าก็เป็นคนหนึ่งที่ได้รับการแต่งตั้งให้เป็นครูฝึกดับเพลิงของประเทศสวีเดนในสมัยนั้น จากการได้เรียนรู้เชิงปฏิบัติการและเทคนิคต่างๆ ทำให้มีโอกาสได้เห็นสื่อการเรียน การสอนที่หลากหลายของประเทศที่พัฒนาด้านการดับเพลิงและกู้ภัย อย่างประเทศสวีเดน และในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าปฏิบัติหน้าที่เป็นเจ้าหน้าที่ด้านการดับเพลิงและกู้ภัย กว่า 16 ปีนั้น ทำให้รู้ว่า ปัญหาหลักของเมืองไทยนั้นเราขาดสถานที่สำหรับการเรียนการสอน ด้านการดับเพลิงและกู้ภัย นอกจากจะขาดสถานที่ศึกษาแล้ว เมืองไทยเรายังขาดอุปกรณ์สำหรับการเรียนรู้ เพื่อช่วยในการอธิบายทฤษฎีบทต่างๆ จากสิ่งที่ยากๆ ให้กลายเป็นสิ่งที่ย่อยและเห็นภาพ

เมื่อข้าพเจ้าได้มีโอกาสมาเรียนรู้ ในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย นั้นทำให้ข้าพเจ้าได้มองเห็นแนวทางที่จะพัฒนาอุปกรณ์สำหรับใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับเรื่องช่วงกว้างการติดไฟและปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เคยไปเรียนจากประเทศสวีเดน ว่าน่าจะมีเครื่องมือสำหรับการเรียนรู้เหมือนที่เมืองนอกเขามีกัน ที่ออกแบบโดยคนไทย โดยใช้วัสดุที่หาง่าย และสามารถใช้งานได้ดีและมีความปลอดภัย ซึ่งอุปกรณ์ช่วยเสริมการเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมในเรื่องช่วงกว้างของการติดไฟนี้ จะสามารถแก้ไขปัญหาลึกลับที่ทำความเข้าใจยากในเรื่องพฤติกรรมของไฟให้เป็นสิ่งที่ย่อยง่ายขึ้น เพราะเราต้องใช้ชีวิตอยู่คู่กับไฟต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการเรียนการสอนในเรื่อง พฤติกรรมการเกิดไฟ ที่สามารถแสดงให้เห็นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของ เชื้อเพลิง ความร้อน และอากาศ ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรในการเกิดการเผาไหม้
2. เพื่อเป็นอุปกรณ์สาธิตและสื่อการสอนให้ผู้เข้ารับการศึกษามีความเข้าใจเกี่ยวกับ ช่วงกว้างของการติดไฟ (Flammability Limit ) และพฤติกรรมของไฟในส่วนที่เรียกว่า“Back Draft”
3. เพื่อเป็นแนวทาง และแรงกระตุ้นให้วิศวกรป้องกันระงับอัคคีภัย หันมาผลิตคิดค้น สื่อการเรียนการสอนด้าน การป้องกันและระงับอัคคีภัยของเมืองไทย

## การตรวจเอกสาร

อัคคีภัย หรือ ไฟไหม้ (Fire) คือ รูปแบบหนึ่งของการเผาไหม้ (Combustion) ที่สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวันแทบทุกวัน ไม่ว่าจะเป็นการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ การเผาไหม้ที่เตาหุงต้มอาหาร หรือแม้กระทั่งการเผาไหม้ของเปลวไฟจากเทียน อย่างไรก็ตาม อัคคีภัยแตกต่างจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เตาหุงต้มอาหาร หรือเปลวไฟจากเทียนโดยตรง อัคคีภัยคือการเผาไหม้ที่ควบคุมไม่ได้ ในขณะที่การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เตาหุงต้มอาหาร หรือเปลวไฟจากเทียนนั้นสามารถที่จะควบคุมการเผาไหม้ได้ อัคคีภัยเป็นการเผาไหม้ที่เราไม่ต้องการให้เกิด แต่อย่างไรก็ตามเราก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงจากความเสียหายของการเกิดอัคคีภัยได้โดยสมบูรณ์เพราะบางครั้งอัคคีภัยก็เกิดจากเหตุสุดวิสัย เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร เป็นต้น

อัคคีภัยก่อให้เกิดผลเสียมากมายไม่ว่าจะเป็นชีวิตและทรัพย์สินหรือต่อจิตใจของผู้ที่ประสบเหตุการณ์ไฟไหม้ ดังนั้นวิศวกรป้องกันอัคคีภัยจำเป็นจะต้องเรียนรู้และเข้าใจถึงวิธีการป้องกันและการควบคุมเหตุอัคคีภัยที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามก่อนที่จะก้าวไปถึงจุดนั้น ควรจะทำความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของการเกิดไฟและการเผาไหม้รวมถึงกลไกในการดับไฟเสียก่อน ซึ่งความรู้ความเข้าใจในเรื่องพื้นฐานเหล่านี้จะเป็นองค์ประกอบสำคัญให้สามารถป้องกันหรือควบคุมเหตุอัคคีภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1. ธรรมชาติการเกิดไฟ

1.1 องค์ประกอบของไฟ ไฟคือปฏิกิริยาเคมี ที่มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกมา การจะเกิดไฟได้อย่างถูกต้องประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างคือ เชื้อเพลิง (Fuel) ตัวสันดาป (Oxidizer) และพลังงาน (Energy) เชื้อเพลิงก็คือวัตถุทุกอย่างที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยเชื้อเพลิงสามารถอยู่ในสถานะของแข็งของเหลวหรือแก๊สก็ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับการเผาไหม้ที่สามารถมองเห็นเปลวไฟ เชื้อเพลิงจะต้องอยู่ในสถานะแก๊สก่อนที่จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวสันดาปได้ ตัวสันดาปก็คือสารที่เข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีกับเชื้อเพลิงแล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ตัวสันดาปสำหรับการเกิดเผาไหม้ในบรรยากาศปรกติคือออกซิเจนในอากาศนั่นเอง โดยอากาศในบรรยากาศปรกติจะประกอบด้วย ออกซิเจนร้อยละ 21 และ ไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร องค์ประกอบสำคัญสุดท้ายของการเกิดไฟคือ พลังงาน ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ได้จากการเผาไหม้จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน (Heat) กระบวนการเผาไหม้อาศัยความร้อน เพื่อให้

ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นสามารถดำเนินต่อไปได้ด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ 1) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไอ (แก๊ส) และ 2) เพื่อใช้ในการทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและออกซิเจนสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ สำหรับการเผาไหม้โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิของแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกัน (อุณหภูมิเปลวไฟ) ลดลงต่ำกว่า  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยประมาณ การเผาไหม้จะไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ องค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 อย่างของการเกิดไฟสามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมสามเหลี่ยมโดยวางองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ที่มุมของสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเรียกว่า สามเหลี่ยมไฟ (Fire triangle) องค์ประกอบทั้ง 3 มีความสำคัญพอกันในการเกิดไฟ ถ้าองค์ประกอบขององค์ใดองค์หนึ่งขาดหายไปไฟก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ นอกเหนือองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างของการเกิดไฟแล้ว การเผาไหม้จะสามารถดำเนินอยู่ต่อไปได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reactions) ปฏิกิริยาลูกโซ่ คือการทำปฏิกิริยาเคมีอย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาลูกโซ่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการทำให้เกิดการเผาไหม้ดำเนินต่อไป ดังนั้นถ้าสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ ก็เท่ากับเป็นการยับยั้งกระบวนการเผาไหม้ได้ ไฟก็จะดับลง



ภาพที่ 1 แสดงองค์ประกอบของการเกิดไฟ(สามเหลี่ยมไฟ)

1.2 ชนิดของไฟ เราสามารถแบ่งชนิดของไฟตามลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ 1) การเผาไหม้แบบมีเปลวไฟซึ่ง แยกย่อยออกเป็น การเผาไหม้แบบเปลวไฟผสมก่อนและเปลวไฟแบบการแพร่ และ 2) การเผาไหม้แบบไม่มีเปลวไฟซึ่งสามารถแยกย่อยได้เป็น การเผาคุ และการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous combustion )

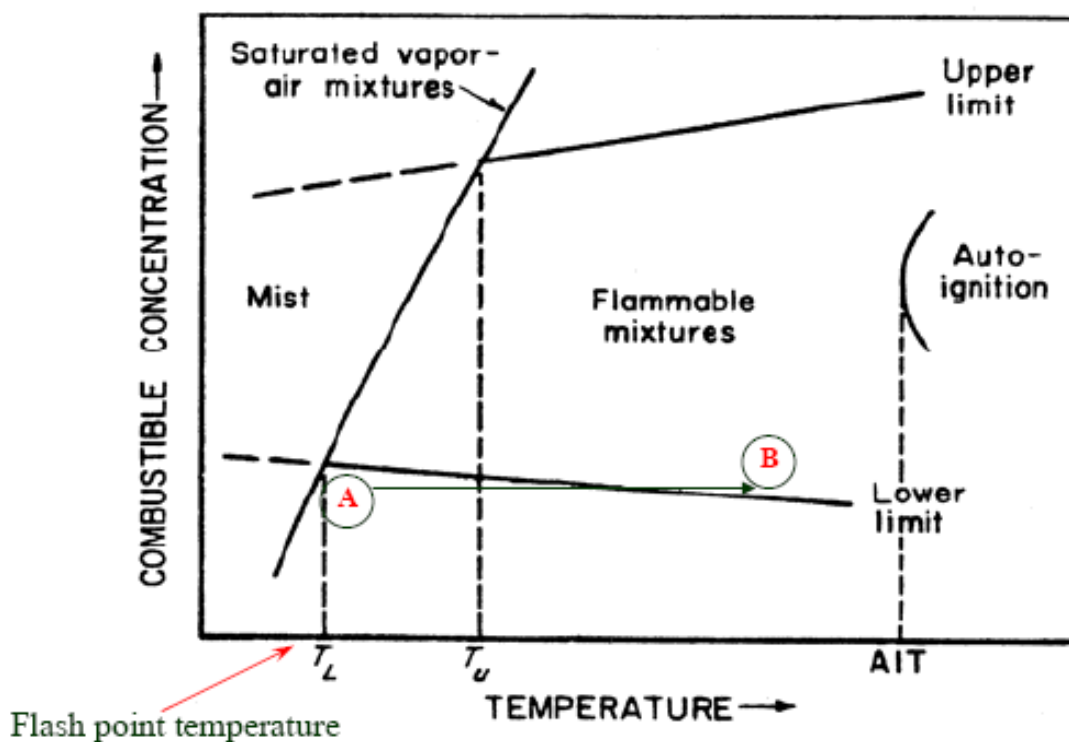
1.2.1 เปลวไฟผสมก่อน (Premixed flame) การเผาไหม้ของเปลวไฟในลักษณะนี้ เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะแก๊สจะผสมกับอากาศ (ออกซิเจน) เป็นแก๊สผสม (Mixture) ก่อนได้รับความร้อนและจุดติดไฟ ตัวอย่างของเปลวไฟผสมก่อน มี เช่น เปลวไฟจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศในเครื่องยนต์เบนซิน หรือเปลวไฟจากหัวตัด Oxyacetylene ในงานโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างของเปลวไฟผสมก่อน

แก๊สผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศจะจุดติดไฟได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 ประการคือ หนึ่ง อุณหภูมิของแก๊สผสมสูงเพียงพอเพื่อการจุดติดไฟได้หรือไม่ และสองความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในแก๊สผสมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการจุดติดไฟหรือไม่ ถ้าเราเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในแก๊สผสม จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 3 ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงต่ำสุดในแก๊สผสมที่สามารถจุดติดไฟได้ เรียกว่า ขีดจำกัดล่างของช่วงติดไฟได้ (Lower flammable limit, LFL) ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงสุดในแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้จะเรียกว่า ขีดจำกัดบนของช่วงติดไฟได้ (Upper flammable limit, UFL) ถ้าแก๊สผสมมีความเข้มข้นของเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง LFL และ UFL เรียกแก๊สผสมนี้ว่า แก๊สผสมติดไฟได้ (Flammable mixture) และช่วงความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ระหว่าง LFL และ UFL เรียกว่าช่วงติดไฟได้ (Zabetakis, 1965) เมื่อแก๊สผสมมีความเข้มข้นของเชื้อเพลิงอยู่ในช่วงติดไฟได้ ถ้าเพิ่มพลังงานเพียงเล็กน้อยให้กับแก๊สผสม เช่น ประกายไฟจากไม้ขีดไฟ การจุดติดไฟก็สามารถเกิดขึ้นได้ การจุดติดไฟของแก๊สผสมลักษณะนี้เรียกว่า การจุดติดไฟแบบไฟลัด (Piloted ignition) ในทางกลับกัน ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟได้ จนกระทั่งแก๊สผสมจุดติดไฟด้วยตนเองโดยไม่ได้อาศัยประกายไฟ (พลังงาน) จากภายนอก เรียกการจุดติดไฟในลักษณะนี้ว่า การจุดติดไฟด้วยตัวเอง (Auto ignition) อุณหภูมิต่ำที่สุดที่แก๊สผสมสามารถจุดติดไฟได้ด้วยตัวเองเรียกว่า อุณหภูมิจุด

ติดไฟได้เอง (Auto ignition temperature, AIT) จากภาพที่ 3 จะพบว่าถ้าอุณหภูมิของแก๊สผสมเพิ่มขึ้น ค่า LFL จะมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า UFL จะมีค่าเพิ่มขึ้น พฤติกรรมเช่นนี้ทำให้ช่วงการติดไฟได้ขยายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าเราลดอุณหภูมิของแก๊สผสมลง เชื้อเพลิงซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สก็อาจควบแน่นกลายเป็นละอองของเชื้อเพลิง (Mist) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว ค่าอุณหภูมิต่ำสุดก่อนที่ไอของเชื้อเพลิงจะควบแน่นเป็นละออง ของเหลวที่ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในแก๊สผสมเท่ากับ LFL จะเรียกว่า จุดวาบไฟ (Flash point) หรือ อุณหภูมิวาบไฟ (Flash point temperature) จุดวาบไฟเป็นดัชนีสำคัญตัวในการชี้ว่าเชื้อเพลิงแต่ละชนิดสามารถจุดไฟได้ง่ายหรือยาก (Beyler, 1995) เชื้อเพลิงที่มีจุดวาบไฟต่ำจะสามารถจุดติดไฟได้ง่าย ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีจุดวาบไฟสูงจะสามารถจุดติดไฟได้ยาก ค่า LFL, UFL และ AIT ของเชื้อเพลิงต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ต่างๆ

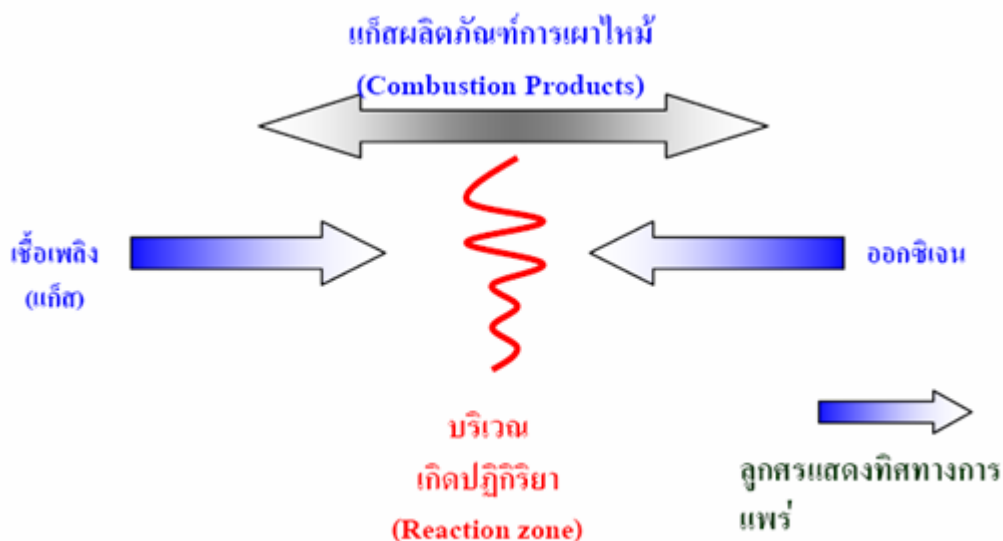


ภาพที่ 3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติการติดไฟของแก๊สผสมติดไฟได้ (Zabetakis, 1965)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติการติดไฟของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (Beyler, 1995)

เชื้อเพลิง	LFL(%)	UFL(%)	AIT(°C)	T <sub>L</sub> (°C)
Acetylene	2.5	100	305	-
Benzene	1.3	7.9	560	-
Ethylene	2.7	36	490	-
n-Butane	1.8	8.4	405	-72
n-Heptane	1.05	6.7	215	-4
n-Octane	0.95	-	220	13
Methane	5.0	15	540	-187
Propane	2.1	9.5	450	-102
Kerosine	-	-	230	-

1.2.2 เปลวไฟแบบแพร่หรือแบบไม่ผสมก่อน (Diffusion or non-premixed flame) แตกต่างจากการเผาไหม้แบบเปลวไฟผสมก่อน ในการเผาไหม้ของเปลวไฟแบบแพร่นั้น เชื้อเพลิงและออกซิเจน (อากาศ) จะเคลื่อนที่มาจากคนฟากของบริเวณที่เรียกว่า บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ซึ่งเมื่อเชื้อเพลิงและออกซิเจนมาพบกันที่บริเวณเกิดปฏิกิริยาเคมี การเผาไหม้ก็จะเกิดขึ้น ผลลัพธ์จากการเผาไหม้จะได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ (Combustion products) และความร้อน จากนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้จะเคลื่อนตัวออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไปทั้งสองฝั่ง ดังแสดงในภาพที่ 4 ที่บริเวณเกิดปฏิกิริยานี้จะไม่มีเชื้อเพลิงและออกซิเจนเหลืออยู่เลยเพราะเชื้อเพลิงและออกซิเจนได้ถูกใช้หมดไปในกระบวนการเผาไหม้ ไดอะแกรมแสดงการเกิดการเผาไหม้ของเปลวไฟแบบแพร่แสดงไว้ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โคออร์ดิเนตแสดงการเผาไหม้ของเปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion flame)

กลไกสำคัญที่ทำให้เชื้อเพลิงและออกซิเจนเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณเกิดปฏิกิริยาและการที่แก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้เคลื่อนตัวออกจากบริเวณเกิดปฏิกิริยานั้นก็คือ การแพร่ (Diffusion) ซึ่งการแพร่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Fick's Law ที่กล่าวว่า สารจะแพร่ (เคลื่อนที่) จากบริเวณที่สารนั้นมีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น ถ้าเราหยดน้ำหมึกสีดำลงไปกลางผิวน้ำในแก้ว หยดของน้ำหมึกจะค่อยๆ จางลงจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ เนื่องจากน้ำหมึกสีดำจะแพร่จากบริเวณกลางแก้ว ซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำหมึกสูงกว่าไปสู่บริเวณโดยรอบซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำหมึกต่ำกว่า เช่นเดียวกันที่บริเวณเกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นเชื้อเพลิงและออกซิเจนมีค่าเป็นศูนย์เพราะถูกใช้หมดไปในการเผาไหม้ ดังนั้นเชื้อเพลิงและออกซิเจนจากภายนอกบริเวณเกิดปฏิกิริยาจึงแพร่เข้ามา ในทางตรงกันข้ามแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้มีความเข้มข้นสูงสุดที่บริเวณเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้จึงแพร่ออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับการแพร่ออกซิเจนและเชื้อเพลิง การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติรวมไปถึงการเผาไหม้จากเหตุอัคคีภัยจะมีลักษณะเป็นเปลวไฟแบบแพร่เป็นส่วนใหญ่ บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) จะมีลักษณะเป็นพื้นผิวบางๆ มีความหนาโดยประมาณ 0.5 – 1 mm อุณหภูมิของแก๊สในบริเวณนั้นมีค่าสูงมาก ซึ่งก็คืออุณหภูมิของเปลวไฟนั่นเอง เปลวไฟแบบแพร่นี้ถ้าเปลวไฟมีขนาดเล็ก ลักษณะการเผาไหม้ก็จะไปอย่างราบเรียบ (Laminar diffusion flame) ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้ของเปลวไฟที่ปลายเทียน (ดูภาพที่ 5 ประกอบ) ในทางตรงกันข้ามถ้าเปลวไฟมีขนาดใหญ่ เปลวไฟแบบแพร่ก็จะมีลักษณะการเผาไหม้แบบปั่นป่วน (Turbulent diffusion flame) ดังแสดงในภาพที่ 5



เปลวไฟที่มีการแพร่แบบราบเรียบ



เปลวไฟที่มีการแพร่แบบปั่นป่วน

### ภาพที่ 5 ตัวอย่างการเผาไหม้แบบราบเรียบและการเผาไหม้แบบปั่นป่วนของเปลวไฟแบบแพร่

วัตถุประสงค์ในการจัดทำอุปกรณ์สาธิตนี้ เพื่อใช้สาธิตเรื่องพฤติกรรมของไฟเกี่ยวกับ คุณสมบัติช่วงกว้างการติดไฟของเชื้อเพลิง และการเกิดปรากฏการณ์ Backdraft ซึ่งเป็นพฤติกรรมชนิดหนึ่งของการเผาไหม้ที่สามารถสร้างอันตรายให้กับนักดับเพลิงได้ สำหรับการทดลองนี้ เน้นไปที่เชื้อเพลิงชนิดแก๊สหุงต้ม เพราะแก๊สหุงต้มนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่มีใช้กันโดยทั่วไป ทุกครัวเรือน ตลอดถึงอุตสาหกรรมต่างๆ โดยทั่วไป ในบรรดาเหตุการณ์แก๊สรั่วที่สร้างความเสียหายโดยทั่วไป เรามักจะพบว่า ส่วนใหญ่ เป็นแก๊ส LPG ยกตัวอย่างเช่น โรงแรมจอมเทียน พัทยา มีผู้เสียชีวิต ร้อยกว่าคน อุบัติเหตุรถแก๊สพลิกคว่ำ ที่ถนนเพชรบุรี กรุงเทพฯ สร้างความสูญเสียสี่ร้อยล้านบาท โดยเฉพาะเหตุการณ์รถแก๊สพลิกคว่ำดังกล่าวนั้น จากการบอกเล่าของผู้ที่พบเห็นเหตุการณ์ และข้าพเจ้าได้มีส่วนร่วมในการเข้าระงับเหตุการณ์ดังกล่าว นั้น ได้รับทราบข้อมูลว่า ขณะแก๊สรั่วและได้มีการกระจายตัวไปที่แหล่งกำเนิดไฟ ซึ่งเป็น รถขายปลาหมึกย่าง และไฟก็ได้ลุกย้อนกลับมายังแหล่งกำเนิด และได้ลุกลามผ่าน รถยนต์ ที่จอดอยู่บนท้องถนน ซึ่งบางครั้งก็เครื่องยนต์ดับ เนื่องจาก ขาด ออกซิเจนเพื่อใช้ในการเผาไหม้ และในขณะที่ไฟได้ลุกไหม้ผ่านไปนั้น รถหลายคันก็ได้เกิดการระเบิดขึ้นเป็นช่วงๆ ดังนั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการลุกไหม้ต่างๆ ของ แก๊ส LPG จึงจำเป็นต้องมีการทดลอง เพื่ออธิบายเหตุและผลต่างๆ ให้ผู้ที่ยังขาดความเข้าใจในเรื่องพฤติกรรมการลุกไหม้ต่อไป

## 2. คุณสมบัติของแก๊ส LPG

แก๊ส LPG ย่อมาจากคำว่า Liquefied Petroleum Gas ส่วนใหญ่เป็นแก๊สผสม ระหว่างแก๊ส Propane ( $C_3H_8$ ) และ Butane ( $C_4H_{10}$ ) ซึ่ง ข้อมูลเกี่ยวกับการผสมระหว่าง แก๊สสองชนิดนี้ โดยทั่วไปไม่มีอัตราส่วนที่ไม่แน่นอน บางครั้ง ใช้อัตราส่วนผสม เป็น Propane 30 % : Butane 70% แต่บางครั้ง อาจใช้ Propane 40 % : Butane 60 % ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก แต่โดยส่วนใหญ่ ใช้การ ผสมอยู่ที่อัตราส่วน Propane 40% : Butane 60% ดังนั้น ช่วงกว้างการ เผาไหม้ของแก๊สหุงต้มจึงเป็นไปตามทฤษฎีบท ว่าด้วยแก๊สผสม เป็นเกณฑ์ในการคิด อัตราการเผาไหม้ต่างๆ แต่ก่อนที่จะทำการทดสอบตู้สารติดไฟดังกล่าว จะต้องเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของแก๊สหุงต้มก่อน ซึ่งแสดงในภาพที่ 6

<b>Exposure</b>	ค่าแนะนำในการสัมผัสสารเฉลี่ย : (TWA) 1000 ppm (1800 mg/m <sup>3</sup> )		
<b>Limits</b>			
ค่าความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อร่างกายอย่างฉับพลัน(IDLH) : 2000 ppm [10%LEL]			
คุณสมบัติทางกายภาพ: ไม่มีสี, ไม่ก่อก้อน, ไม่มีกลิ่น			
น้ำหนักโมเลกุล(MW): 42-58	จุดเดือด) > -44°F		ไม่ละลายน้ำ
แรงดันไอ: > 1 atm	IP: 10.95 eV	น้ำหนักเทียบกับอากาศ: 1.45-2.00 เท่า	
จุดวาบไฟ: NA (Gas)	UEL: 9.5% (Propane) 8.5% (Butane)	LEL: 2.1% (Propane) 1.8 % (Butane)	

ภาพที่ 6 แสดงคุณสมบัติของแก๊ส LPG ที่มา : The National Institute for Occupational Safety and Health (1995)

โดยปกติ เมื่อเชื้อเพลิงอยู่ในรูปของแก๊ส ก็พร้อมที่จะติดไฟได้ ถ้ามีพลังงานเพียงพอ ที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนเกิดขึ้นได้ แต่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมี ความสมดุล ระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ซึ่งถ้าเราดูข้อมูลในภาพที่ 6 จะมีข้อมูล ว่า UFL: 9.5 % (Propane) 8.5% (Butane) และ LFL: 2.1 % (Propane) 1.8 % (Butane) ซึ่งข้อมูลส่วนนี้ เป็นการบอกถึงช่วงกว้างการติดไฟของแก๊ส โพรเพน และแก๊สบิวเทนนั่นเอง หรืออาจอธิบายได้อีกแบบหนึ่งว่า

ใน 100 ส่วนโดยโมล หรือ โดยปริมาตร การผสมระหว่างอากาศกับ แก๊สโปรเพนจะสามารถเริ่มติดไฟได้นั้น จะต้องมิก๊าซโปรเพนอยู่ไม่น้อยกว่า 2.1 % และอากาศ 97.9 % (LEL หรือ LFF) และเช่นเดียวกัน ถ้ามีการเพิ่มปริมาณของแก๊สมากขึ้นเป็น 9.5% ผสมกับอากาศ 90.5% และ เมื่อเราเพิ่มพลังงานความร้อนหรือแหล่งประกายไฟ เข้าไปแก๊สผสมนั้น การเผาไหม้ก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ (UEL หรือ UFL) ซึ่งคุณสมบัติการติดไฟของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าช่วงกว้างการติดไฟที่แตกต่างกัน โดยปกติ ในอากาศนั้น จะมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 20.9 หรือคิดง่ายๆที่ 21 เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือก็เป็นแก๊สไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ ประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆ อีกเล็กน้อย แต่ถ้ามองในเทอมของการเผาไหม้แล้ว เราจะสนใจแต่ออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ สำหรับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอื่นในอากาศนั้น ไม่ได้ช่วยในการเผาไหม้ เป็นเพียงแต่ช่วยในการพาความร้อนต่างๆได้ เราก็เลยคิดเหมาว่าใช้ไนโตรเจนไปทั้งหมด 79 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ซึ่งรวมๆกันแล้วก็จะได้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของอากาศ การเผาไหม้นั้นต้องใช้ ออกซิเจน และเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะต้องการใช้ปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ที่แตกต่างกันจึงหาความสัมพันธ์ ระหว่างเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ว่าต้องการใช้ในปริมาณที่ต้องผสมกับอากาศจำนวนเท่าไรโดยปริมาตร

จากทฤษฎี Le Chatelier's Law ได้กล่าวเกี่ยวกับเรื่อง ค่าความเข้มข้นของช่วงกว้างการติดไฟต่ำสุดของ เชื้อเพลิงผสมประเภท พาราฟินส์ไฮโดรคาร์บอน (Quintiere, 2005) ไว้ว่า

$$\frac{1}{X_L} = \sum_{i=1}^{N_{fuel}} \left( \frac{X_i}{X_{Li}} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $X_L$  คือค่าความเข้มข้นต่ำสุดของเชื้อเพลิงแก๊สผสมใดๆ,  $X_i$  เป็นจำนวนปริมาตรของแก๊สผสมใดๆ และ

$$X_L = 0.55 X_{st} \quad (2)$$

เมื่อ  $X_{st}$  เป็นค่าความเข้มข้นที่มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์สูงสุด ของเชื้อเพลิงแก๊สผสมนั้นๆ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นสถานะที่เชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ผสมกันนั้น ได้ถูกใช้ไปในการเผาไหม้หมดทั้งคู่ นั่นเอง หรือที่เราเรียกกันว่า สถานะที่เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ ตามทฤษฎี และนอกจากนั้น จะได้

สมการเกี่ยวกับค่าความเข้มข้นสูงสุดของเชื้อเพลิงแก๊สผสม  $X_U$  ที่สามารถเผาไหม้ได้ในค่าความเข้มข้นที่สูงสุดไว้ว่า

$$X_U = 6.5\sqrt{X_L} \quad (3)$$

ซึ่ง  $X_L$  ของ โพรเพน = 2.1 % และ  $X_L$  บิวเทน = 1.8 % ดังนั้นถ้าเราจะหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของเชื้อเพลิงประเภทแก๊ส LPG ซึ่งมีอัตราส่วนผสมระหว่าง Propane 40% : Butane 60% ก็จะสามารถหาค่า คัดไฟต่ำสุดของแก๊สหุงต้มได้จากสมการที่ (1) ได้ว่า

$$X_L \text{ ของแก๊สหุงต้ม(LPG)} = \frac{100}{\frac{40}{2.1} + \frac{60}{1.8}} = 1.9 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

และจาก สมการที่ 2  $X_L = 0.55X_{ST}$  เราสามารถหาค่า ช่วงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์  $X_{ST}$  ได้ว่า

$$X_{ST} = \frac{X_L}{0.55} = \frac{1.90}{0.55} = 3.45 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

และเราสามารถหาค่าความเข้มข้นช่วงบน ( $X_U$ ) จากสมการที่ (3) ซึ่งจะได้ค่าความเข้มข้นช่วงบนของแก๊สหุงต้มได้ว่า

$$X_U = 6.5\sqrt{1.9} = 8.9 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

เนื่องจาก ตู้สาธิต มีขนาดห้องเผาไหม้ = 50 cm x 68 cm x 50 cm คิดเป็นปริมาตรแล้วจะมีปริมาตรเท่ากับ 170 ลิตร และอุปกรณ์ได้ปรับตั้งอัตราการไหลของแก๊สหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้ไว้ที่ 4.2 ลิตรต่อ 10 วินาที ซึ่งในเวลา 10 วินาทีนั้น จะทำให้เข็มแสดงปริมาณของเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ไปเป็นจำนวน 6 cm ดังนั้นเราสามารถหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ต่อ 1 cm ได้ว่า 6 cm = 4.2 ลิตร/วินาที ถ้า 1 cm = 4.2/6 = 0.7 ลิตร/วินาที ซึ่งแสดงว่า เข็มวัดเคลื่อนที่ 1 cm ก็จะได้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เข้าห้องเผาไหม้เป็นจำนวน 0.7 ลิตร/cm ดังนั้นเราสามารถหาปริมาตรโดยรวม ( $V_{TOTAL}$ ) ของเชื้อเพลิงที่ปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ว่า

$$V_{TOTAL} = V_F + V_{AIR} \quad (4)$$

$$X_L = \frac{V_{F,L}}{V_{AIR} + V_{F,L}} \quad (5)$$

$$X_{ST} = \frac{V_{F,ST}}{V_{AIR} + V_{F,ST}} \quad (6)$$

$$X_U = \frac{V_{F,U}}{V_{AIR} + V_{F,U}} \quad (7)$$

เมื่อ  $V_{TOTAL}$  คือ ปริมาตรโดยรวมของห้องเผาไหม้ ซึ่งมีค่าคงที่  $V_F$  คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และ  $V_{AIR}$  คือ ปริมาตรของอากาศในห้องเผาไหม้ เมื่อ  $V_{F,L}$  คือ ปริมาตรต่ำสุดของแก๊สที่ผสมกับอากาศที่สามารถติดไฟได้ของห้องเผาไหม้  $X_L$  คือ ความเข้มข้นติดไฟต่ำสุดของแก๊สใดๆ และ  $V_{F,ST}$  คือ ปริมาตรความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในสภาวะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งเมื่อคิดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งที่ เข้ม แสดงผลเคลื่อนที่ผ่านต่างๆแล้ว จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการคำนวณความเข้มข้นของเชื้อเพลิงแต่ละช่วงเซนติเมตรของไม้บรรทัด

ช่วงแสดงผล (cm)	ปริมาตรเชื้อเพลิง (ลิตร)	เศษส่วนโดยปริมาตรของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
1	0.70	.04
2	1.40	.12
3	2.10	1.2
4	2.80	1.6
5	3.50	2.0
6	4.20	2.4
7	4.90	2.8
8	5.60	3.2

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ช่วงแสดงผล (cm)	ปริมาตรเชื้อเพลิง (ลิตร)	เศษส่วนโดยปริมาตรของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
9	6.30	3.6
10	7.00	4.0
11	7.70	4.3
12	8.40	4.7
13	9.10	5.1
14	9.80	5.5
15	10.50	5.8
16	11.20	6.2
17	11.90	6.5
18	12.60	6.9
19	13.30	7.3
20	14.00	7.6
21	14.70	8.0
22	15.40	8.3
23	16.10	8.7
24	16.80	9.0
25	17.50	9.3
26	18.20	9.7

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการออกแบบและทดสอบ
  - 1.1 กระดาษ
  - 1.2 ดินสอ
  - 1.3 ไม้บรรทัด
  - 1.4 กล้องวิดีโอ
  
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตตู้สาธิต
  - 2.1 อุปกรณ์ส่วนประกอบของโครงสร้าง รายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 1
  - 2.2 ฟิล์มนิรภัย ของ 3 M ชนิด Micro –layers Polyester
  - 2.3 ไม้บรรทัดชนิด Stainless steel 1 อัน
  - 2.4 แผ่น Plate stainless หน้า 2 mm 2 แผ่น
  - 2.5 เหล็กกลม  $\Phi$  6 หุน ยาว 65 เซนติเมตร 1 อัน
  - 2.6 ชุดมอเตอร์ของวิทยุ Tape พร้อมเฟืองทดรอบ AC. 12 V. 50 mA. 1 ชุด
  - 2.7 Solenoid valve DC , 24 V 1 อัน
  - 2.8 Air quick connector Type male and female 1 ชุด
  - 2.9 ชุดสร้างกระแสไฟฟ้าแรงสูง Input 12 V, DC. Output DC.8,000 V .1 ชุด
  - 2.10 ไคเป่าลม 220 V 20 Watt 1 อัน
  - 2.11 พัดลม 220 V 1 อัน
  - 2.12 ตัวลดแรงดันแก๊สหุงต้ม 1 ชุด
  - 2.13 ถังแก๊ส ขนาด 15 กิโลกรัม 1 ถัง
  - 2.14 สายส่งแก๊สชนิด ขาง Nitrite ภายในหุ้มใยสังเคราะห์ ความยาว 2 เมตร 1 เส้น
  - 2.15 เหล็กรูปตัว L ทำจาก Stainless หน้า 3 หุน จำนวน 4 เส้น



ตารางที่ 3 แสดงรายการอุปกรณ์โครงสร้าง คูประกอบด้วยภาพที่ 7

ITEM	DESCRIPTION	LONG	Q'TY	TOTAL
1	L 30 x 30 x 3 mm (Stainless)	0.80 m	4	3.20 m
2	L 30 x 30 x 3 mm (Stainless)	0.69 m	6	4.14 m
3	L 30 x 30 x 3 mm (Stainless)	0.50 m	6	3.0 m
4	PLATE 2 mm.	0.56 m <sup>2</sup>		0.56 m <sup>2</sup>
5	PLATE 1 mm.	1.46 m <sup>2</sup>		1.46 m <sup>2</sup>
6	PLATE 0.5 mm.	0.33 m <sup>2</sup>		0.33 m <sup>2</sup>
7	กระจกใส 5 mm.	0.93 m		0.93 m.
8	หูหิ้วแบบพับ		4	4 อัน
9	บานพับ		15	15 ตัว
10	SUS $\phi$ 4 mm		1	
11	L 40 x 40 x 3 mm (Stainless)	0.69 m.	4	2.76 m.
12	L 40 x 40 x 3 mm (Stainless)	0.71 m.	4	2.84 m.
13	L 40 x 40 x 3 mm (Stainless)	0.52 m.	4	2.08 m.
14	ล้อ		4	4 ล้อ
15	PLATE 1 mm (245 x 725)mm		1	0.18 m <sup>2</sup>
15'	PLATE 1 mm (215 x 255)mm		1	0.06 m <sup>2</sup>

## 2. ประกอบอุปกรณ์ที่ออกแบบเข้ากับโครงสร้าง

2.1 ประกอบวัสดุต่างๆเข้ากับโครงสร้างด้านหน้าทั้งหมด ตามที่ออกแบบ โดย เชื่อมแผ่นเหล็ก Stainless Steel เข้ากับโครงสร้าง ในตำแหน่งต่างๆตามแบบดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จแล้วจะได้อุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 8



แสดงด้านบน



ด้านขวา

ด้านซ้าย

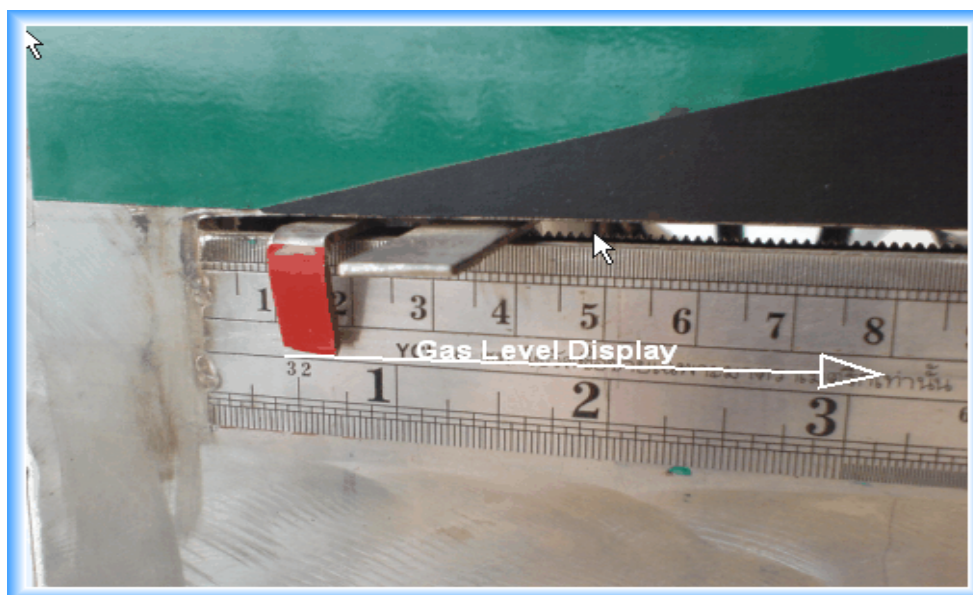
ด้านบน

ด้านหลัง

ภาพที่ 8 แสดงส่วนประกอบด้านหน้าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้ว

เมื่อประกอบเสร็จแล้ว ก็จะทำการติดกระจกพร้อมฟิล์มนิรภัยป้องกันการแตกของกระจก ในส่วนของโครงสร้าง หลังจากนั้นให้ทำการติดกระดาษทึบและสีดำเอาไว้ เพื่อใช้แทน ความหมายของความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งสีเขียวยใช้แทนปริมาตรของอากาศที่ อยู่ในตู้ และ แผ่นสติ๊กเกอร์สีดำใช้แทนปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้จากนั้น ให้ทำการผ่า แผ่นเหล็ก Stainless steel plate ด้านหน้า ให้เป็นช่องยาวเท่ากับไม้บรรทัด ขนาดความ

กว้างของช่องที่ผ่า ขนาด 4 มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับใส่ก้านวัด สำหรับแสดงปริมาณของเชื้อเพลิงที่ปล่อยไหลเข้าไปในตู้สาธิต หลังจากนั้นก็ให้ติดไม้บรรทัดเข้ากับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 9



**ภาพที่ 9** แสดงการผ่าแผ่นเหล็กประกอบก้านวัด เพื่อแสดงปริมาณเชื้อเพลิงในตำแหน่งด้านหน้า และการติดไม้บรรทัด เข้ากับโครงสร้างของอุปกรณ์

ในส่วนด้านหน้านี้ เมื่อผ่าช่องสำหรับใส่แผ่นเหล็กสำหรับให้เลื่อนเพื่อบอกตำแหน่งตัวเลขและปริมาณของเชื้อเพลิง เสร็จแล้วก็ให้ใส่ไม้บรรทัดที่มีความยาวขนาด 60 เซนติเมตร ติดเข้าไป เพื่อให้มีเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ หรือบ่งชี้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของตัวเข็มวัดสำหรับแสดงปริมาณของเชื้อเพลิงที่ปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้

2.2 ประกอบวัสดุต่างๆเข้ากับโครงสร้างด้านขวาของอุปกรณ์ ตามที่ออกแบบ โดย เชื่อมแผ่นเหล็ก Stainless steel เข้ากับโครงสร้าง ในตำแหน่งต่างๆตามแบบดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จแล้วจะได้อุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งในภาพจะเห็นว่า หน้าต่างจะถูกติดตั้งในตำแหน่งด้านบน และด้านล่างจะมีก้านจับ เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

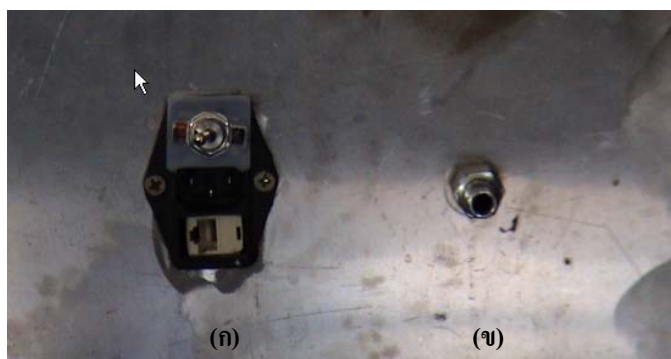


ภาพที่ 10 แสดงส่วนประกอบด้านข้างขวามือเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้ว

2.3 การประกอบวัสดุต่างๆเข้ากับโครงสร้างด้านซ้ายของอุปกรณ์ โดย เชื่อมแผ่นเหล็ก Stainless Steel และติดกระจก เข้ากับโครงสร้าง ในตำแหน่งต่างๆตามแบบ ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งด้านข้างฝั่งขวามือนี้จะใช้สำหรับต่อสายควบคุมอุปกรณ์ และเชื่อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งในภาพจะเห็นว่า ด้านล่างจะมีก้านจับ เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย เช่นเดียวกับ โครงสร้างฝั่งทางด้านขวามือ และแสดงจุดต่อของสายไฟดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 11 แสดงส่วนประกอบโครงสร้างด้านซ้าย และตำแหน่งการติดตั้งจุดต่อแก๊สเข้าห้องเผาไหม้ และจุดต่อสายควบคุมเชื้อเพลิงและระบบไฟฟ้าต่างๆของอุปกรณ์



ภาพที่ 12 แสดงการติดตั้ง (ก) ระบบสวิตช์ การเปิดปิดไฟฟ้าของระบบควบคุม และ (ข) ท่อแก๊สด้านข้าง

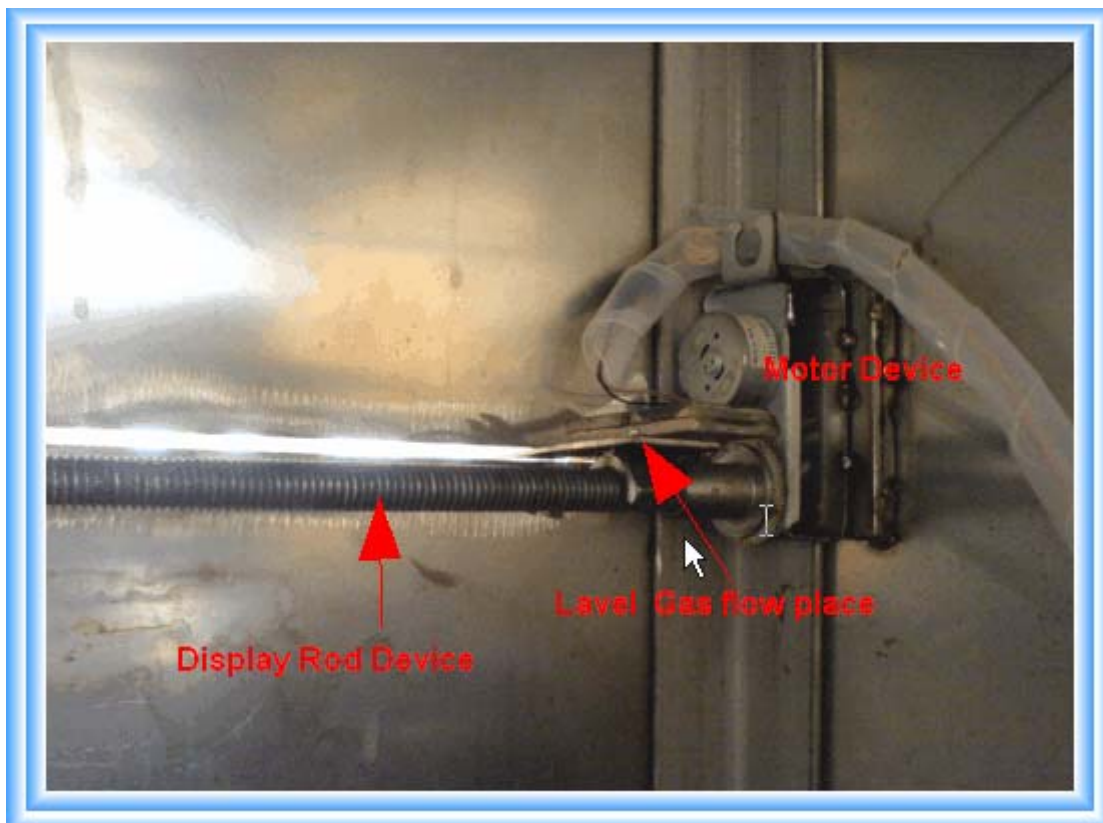
2.4 การประกอบวัสดุต่างๆเข้ากับโครงสร้างด้านหลัง สำหรับการประกอบอุปกรณ์ด้านหลัง ทั้งหมด ตามที่ออกแบบ โดยใช้แผ่นเหล็ก Stainless steel เชื่อมติดบานพับ และใส่ตัวคล็องกุญแจสำหรับปิด เพื่อป้องกันการปรับแต่งจากบุคคลภายนอก และเพื่อความสวยงาม และติดกระจก เข้ากับ โครงสร้าง ในตำแหน่งต่างๆตามแบบดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงส่วนประกอบโครงสร้างด้านหลังของอุปกรณ์

2.5 ชุดการแสดงผลการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อให้เห็นว่าปริมาณเชื้อเพลิงถูกปล่อยเข้าไปในห้องเผาไหม้มากน้อยเพียงใด จึงจำเป็นต้องมีชุดแสดงปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งหลักการวัดปริมาณของเชื้อเพลิงนั้นใช้กลไกการทำงานของชุดมอเตอร์ที่ติดตั้งไว้ภายใน ชุดมอเตอร์จะถูกต่อเข้ากับแกนวัด โดยผ่านเฟืองทดรอบ เมื่อมอเตอร์หมุนก็จะทำให้แกนตัววัด (Display rod device) หมุนตามไปด้วย และเมื่อ แกนวัดหมุน เกลียวของแกนวัดจะ

ไปทำหน้าที่ผลักดันแผ่นแสดงผลการวัด (Level gas flow place) ให้เคลื่อนที่ไปตามร่องเกลียวของก้านวัด ซึ่งเราจะเห็นแผ่นวัดเคลื่อนที่ผ่านไม้บรรทัดที่ด้านหน้าของตู้สาริตดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงกลไกการประกอบก้านวัดเข้ากับแกนวัด

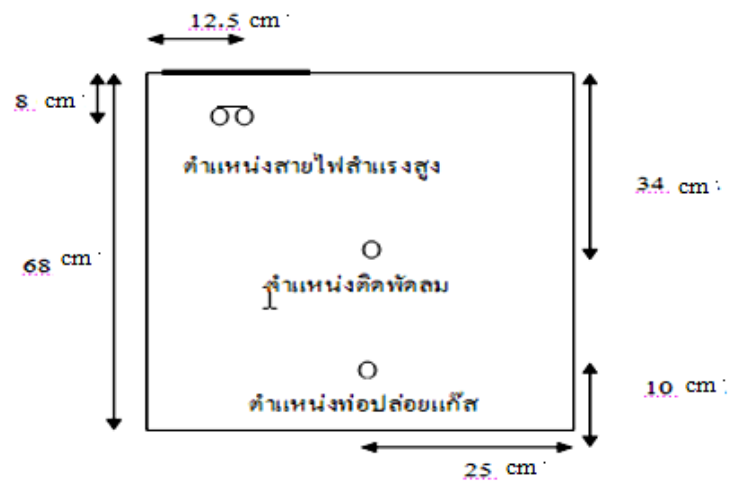
เพื่อให้การทำงานของตัวแสดงผลมีความสัมพันธ์กับปริมาตรการไหลของเชื้อเพลิง สวิตช์ควบคุมมอเตอร์จะถูกต่อพ่วงเข้ากับ solenoid valve เมื่อเมื่อสวิตช์มอเตอร์ถูกเปิด solenoid valve ก็จะทำงานพร้อมกันทันที เมื่อ solenoid ทำงานเชื้อเพลิงก็จะถูกปล่อยเข้าห้องเผาไหม้ไปจนกว่าจะ ปิดสวิตช์ มอเตอร์ เพราะเมื่อปิดสวิตช์มอเตอร์ solenoid valve ปิดตามไปด้วย หลักการนี้ก็จะทำให้เราสามารถทราบปริมาณของเชื้อเพลิงที่ปล่อยเข้าไปอยู่ในตู้สาริตได้ทันที และเมื่อเราต้องการวัดปริมาณเชื้อเพลิงรอบใหม่ ก็เพียงแค่เลื่อนเข็มกลับย้อนกลับไปสู่ตำแหน่ง เริ่มต้น และเปิดสวิตช์ใหม่ก็จะสามารถวัดปริมาณของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสู่ในตู้สาริตได้ค่อนข้างคงที่ และปลายอีกฝั่งหนึ่งของก้านวัดจะถูกถือไว้กับ โครงสร้างของตู้ดังแสดงในภาพที่ 15



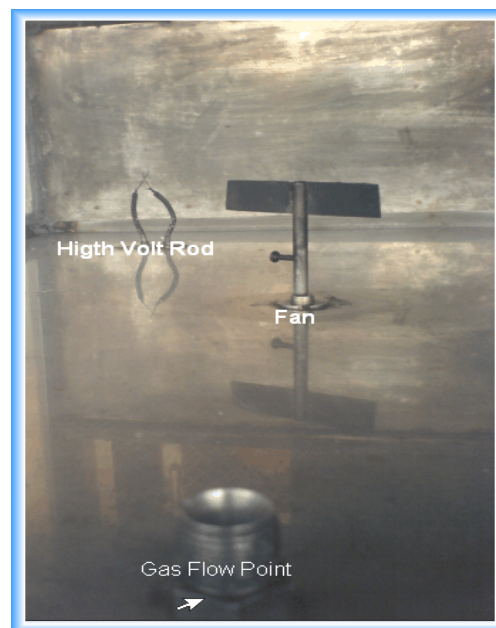
ภาพที่ 15 แสดงการติดตั้งแกนวัดอีกด้านหนึ่งของตู้

หลักการการทำงานของชุดตรวจวัดนี้ใช้หลัก การนับเวลาการไหลของเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวทำหน้าที่หมุนแกนเหล็ก และแผ่นแสดงผลซึ่งอยู่บนเกลียวของแกนเหล็กจะถูกบังคับให้ไหลผ่านไปตามเกลียวที่กำลังหมุน แต่ภายนอกการไหลดังกล่าวได้ผ่านไม้บรรทัด ซึ่งมีตัวเลขบอกระยะทาง เป็น เซนติเมตร เพื่อให้เราสามารถคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ปล่อยไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ สำหรับปริมาตรของตู้สาธิตมีขนาดห้องเผาไหม้ 50 cm x 68 cm x 50 cm ดังนั้นเมื่อคิดเป็นปริมาตรแล้ว เท่ากับ 170 ลิตร และได้ปรับตั้งอัตราการปล่อย แก๊สเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่อัตรา 0.7 ลิตร ต่อการเคลื่อนที่ของแผ่นเลื่อนแสดงตำแหน่ง 1 cm

2.6 การประกอบติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ ภายในห้องควบคุมการเผาไหม้  
เพื่อให้เห็นว่า ห้องเผาไหม้นี้เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง ดังนั้นก่อนที่จะประกอบโครงสร้างของอุปกรณ์เข้ากันนั้น ควรเจาะรู สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ ต่างๆก่อนดังแสดงใน ภาพที่ 16 และภาพที่ 17



ภาพที่ 16 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมภายในห้องเผาไหม้



ภาพที่ 17 แสดงตำแหน่งจุดปล่อยแก๊ส พัดลม และ Ignition source

สำหรับเหตุผลในการออกแบบให้ภายในห้องเผาไหม้มี จุดปล่อยแก๊ส อยู่ด้านขวาของพื้นที่ เพราะต้องการให้แก๊ส ค่อยๆ ไหลเข้าไปผสม กับอากาศ ซึ่งมีพัดลมอยู่กึ่งกลาง ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟ กับแก๊สที่ปล่อย และอีกเหตุผลหนึ่งในการออกแบบ ต้องการให้แหล่งกำเนิดไฟอยู่ใกล้กับ

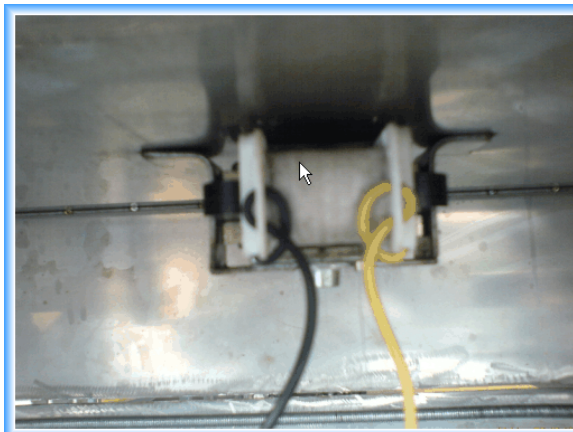
หน้าต่าง เพราะเมื่อเชื้อเพลิงอยู่ในสถานะที่เข้มข้นเกินจุดติดไฟแล้ว เมื่อเปิดหน้าต่าง อากาศจากภายนอก จะสามารถเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิง และจุดติดไฟได้ดียิ่งขึ้น

2.7 การติดตั้งระบบไฟฟ้าแรงสูง สำหรับการประกอบติดตั้งนั้น โดยเชื่อมสายไฟฟ้าสองเส้นสอดผ่านท่อฉนวน ซึ่งสายไฟสองเส้นนั้นอยู่ห่างกัน 3 เซนติเมตร เมื่อใส่สายไฟเข้าไปแล้ว ให้ใช้กาวซิลิโคนทำการอุดปิดไว้อีกชั้นหนึ่งก็จะทำให้ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวยึดติดอยู่กับโครงสร้างที่อยู่ในห้องควบคุมได้ ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จก็ทำการต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายไฟและชุด รีโมทเพื่อต่อสวิทช์ ดังแสดงในภาพที่ 18



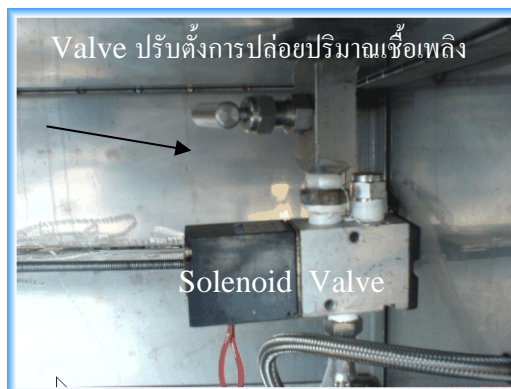
ภาพที่ 18 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

2.8 การประกอบติดตั้งพัดลมที่ใช้ทำหน้าที่ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศภายในตู้สาธิต สำหรับการประกอบพัฒมนั้นใช้พัดลม ขนาดเล็ก ใช้ไฟกระแสสลับ และสร้างใบพัดให้มีขนาด กว้าง 1 เซนติเมตร และความยาว 6 เซนติเมตร สำหรับทำหน้าที่ กวนหรือผสมเชื้อเพลิงเมื่อต้องการสามารถควบคุมได้จากกล่องควบคุมชุดเดียวกันกับตัวจุดประกายไฟดังแสดงในภาพที่ 19



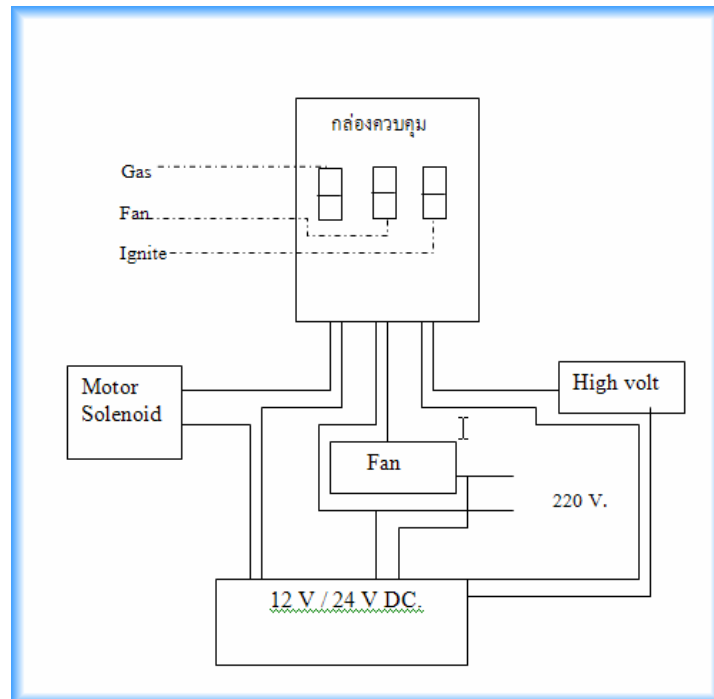
ภาพที่ 19 แสดงการติดตั้งพัดลมสำหรับกวนเพื่อผสมเชื้อเพลิงกับอากาศภายในตู้

2.9 การออกแบบและประกอบตัวปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ สำหรับการประกอบในส่วนนี้ใช้หลักการง่ายๆ กล่าวคือ ใช้ตัว solenoid valve เป็นตัวเปิด ปิด เชื้อเพลิงสำหรับปล่อยเข้าสู่สาริต แต่ตัวสาริตนี้ได้ออกแบบให้มีการควบคุมปริมาณการไหลของเชื้อเพลิงเข้าสู่ตู้อีกชั้นหนึ่ง คือ ใช้ตัวปรับแต่ง ที่อยู่ด้านบนของ สวิตช์ solenoid valve เป็นตัวกำหนดปริมาณการไหลเชื้อเพลิงเข้าสู่สาริต อีกทอดหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 20

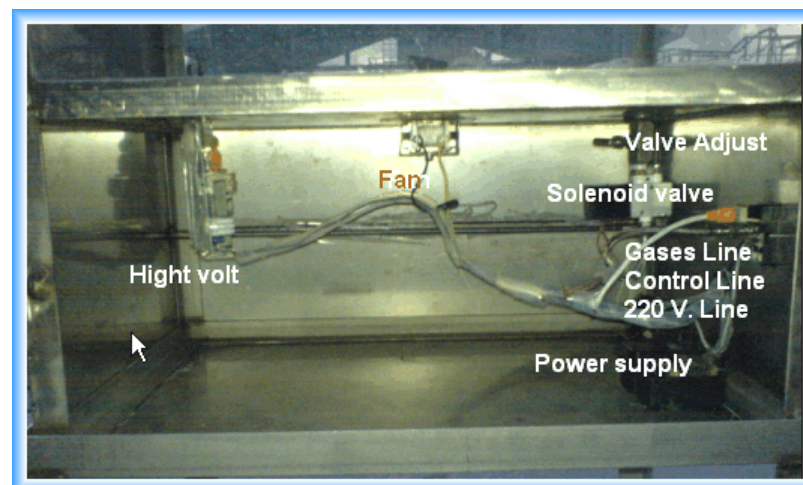


ภาพที่ 20 แสดงการติดตั้งตัวเปิดปิดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และตำแหน่งการปรับตั้ง

2.10 การประกอบระบบแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดภายในห้องควบคุม ห้องควบคุมทั้งหมดใช้ระบบไฟ 12 Volt และ 24 Volt ซึ่งต่อไปควบคุมอุปกรณ์ส่วนต่างๆทั้งหมดภายในตู้สาริต ซึ่งมีสวิตช์ควบคุมอยู่ภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 21 และ ภาพที่ 22



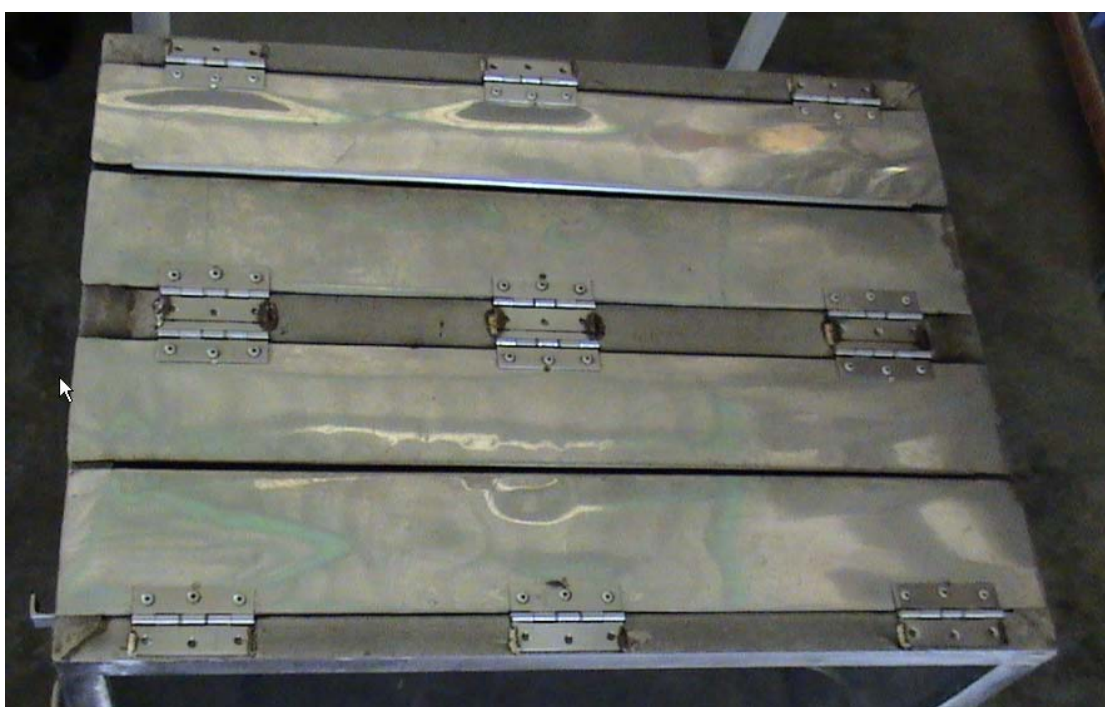
ภาพที่ 21 แสดงการติดตั้งระบบ แหล่งไฟฟ้า ควบคุมระบบภายในทั้งหมด



ภาพที่ 22 แสดงภาพรวมการติดตั้งระบบภายในของระบบไฟฟ้าควบคุมทั้งหมด

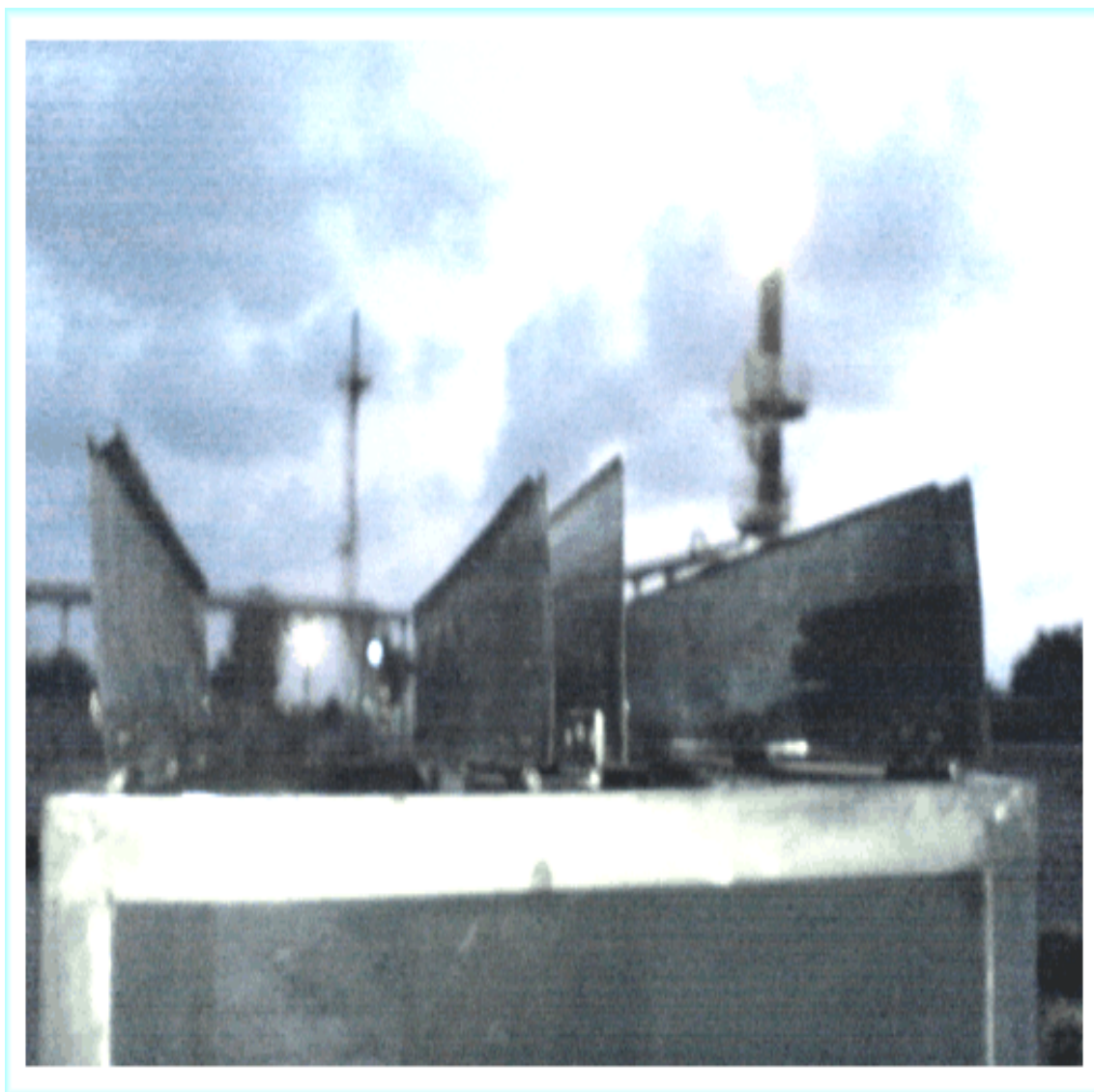
2.11 การประกอบระบบฝาเปิด ปิด ระบายความดัน หลักการทำงานของฝาเปิดระบาย (Ventilation cover) สำหรับตู้สารคดีนี้ การออกแบบระบบการระบายพลังงานและความร้อนเป็น ปัจจัยที่สำคัญสูงสุด เพราะถ้าระบบระบายไม่ดีพอแล้ว อุปกรณ์อาจได้รับความเสียหายได้ นอกจากนั้นอาจเกิดความปลอดภัย ดังนั้นเพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างปลอดภัยจึงมีหลักการ

ในการทำงานต่างๆคือ ด้านบนของอุปกรณ์สาริตนั้นได้ออกแบบให้สามารถเปิดได้พร้อมๆกันทั้งสี่บาน เพื่อป้องกันแรงอัดโดยถ้าอีกชั้นหนึ่งยกขึ้น ขึ้นต่อไปจะถูกลกตามไปด้วย อัด โนมัต การออกแบบในลักษณะนี้จะสามารถป้องกันการระเบิดแบบฉับพลันของอุปกรณ์สาริต และกระจกต่างๆ ก็จะคงรูปไม่แตกตัวด้วย สำหรับการออกแบบระบบฝาเปิดของอุปกรณ์สำหรับการระบายพลังงานความร้อนต่างๆออกได้อย่างรวดเร็ว นั้น ได้ออกแบบให้ฝาเปิดของอุปกรณ์ สามารถเปิดออกได้พร้อมกันเมื่อมีการระเบิดที่รุนแรงจากภายใน โดยได้ออกแบบฝาเปิดออกเป็นสี่บาน แบ่งออกเป็นสองฝั่ง ฝั่งละสองฝาเปิด รวมพื้นที่ระบายออกได้ทั้งสิ้น ขนาด 9.7 เซนติเมตร x 68 เซนติเมตร จำนวน 4 ฝา ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แสดงการประกอบ และ โครงสร้างการเปิดของฝาเปิด

หลักในการออกแบบเพื่อให้ฝาสามารถเปิดได้พร้อมๆกันได้นั้น เราต้องพับขอบฝาเปิดบานที่อยู่ด้านใน ให้เป็นรูปมุมฉาก รองรับ อีกบานหนึ่งซึ่งอยู่ด้านบนเมื่อเกิดการระเบิดหรือมีพลังงานเกิดขึ้น ฝาเปิดบานที่อยู่ด้านล่างก็จะทำหน้าที่ยก ฝาเปิดบานที่อยู่ด้านบนให้เปิดออกไปด้วยพร้อมกันอย่างอัด โนมัตทั้งสี่บาน ดังแสดงในภาพที่ 24 การเปิดระบายในลักษณะนี้ทำให้มั่นใจได้ว่า อุปกรณ์จะไม่เสียหายจากแรงอัด อย่างแน่นอน



ภาพที่ 24 แสดงฝาเปิดด้านบนที่สามารถทำงานได้พร้อมกันเมื่อเกิดแรงดันภายในตู้

2.12 การประกอบโครงสร้างและออกแบบระบบการควบคุมภายนอกอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมการเปิดปิด และสายต่อแก๊ส เข้าระบบ สำหรับตัวควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ นั้น ได้ประยุกต์ใช้โดเป่าลมเพราะมีสวิตช์หลายตัวและมีพัดลมภายในตัว สามารถนำมาใช้ในการระบายความร้อนอื่นๆ ได้อีกด้วย สำหรับสายไฟที่ใช้ในการควบคุมนั้นได้ใช้สาย Net work คอมพิวเตอร์ ความยาว 2 เมตร พร้อมข้อต่อตัวผู้ ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จแล้วก็จะได้อุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 25 และแสดงตำแหน่งการต่อสายจาก ตัวควบคุมและสายเชื่อเพลิงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 แสดงอุปกรณ์สวิตช์ควบคุมระบบการทำงานของอุปกรณ์ ทั้งหมด

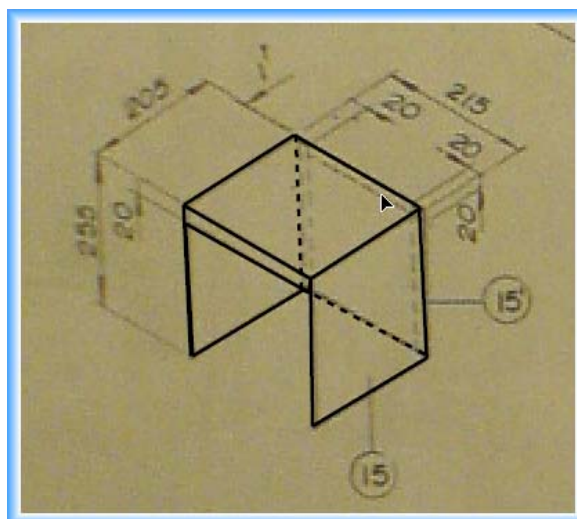


ภาพที่ 26 แสดงตำแหน่งการต่อสายจาก ตัวควบคุมและสายเชื่อมเพลิงเข้ากับตัวตู้สาริต

สำหรับสายแก๊สที่จะต่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้นได้ต่อการลดแรงดันเพื่อให้เกิดความปลอดภัย และตัวปรับตั้งแรงดันเพื่อให้เกิดแรงดันคงที่ พร้อมตัวกั้นกลับของเชื้อเพลิง และสายต่อต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงการต่อระบบลดแรงดันจากถังแก๊สหุงต้มและสายต่อต่างๆ



ภาพที่ 28 แสดงขนาดของกล่องที่ออกแบบเพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดไฟฟรณีพิเศษอื่นๆ

### 3. ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์

การทดลองได้ดำเนินการทั้งสิ้น 10 กรณี โดยปริมาตรเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปจำนวนครั้งที่ทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่ตำแหน่งความเข้มข้นต่างๆ

กรณีที่	จำนวนการทดลองซ้ำ	ปริมาตรของเชื้อเพลิง (ลิตร)	% โดยปริมาตร	ระดับความเข้มข้นเชื้อเพลิง	หมายเหตุ ตัวเลขบน Scale ของเครื่องอุปกรณ์ (cm)
1	4	2.80	1.6	Too-lean	4
2	4	3.50	1.82	LFL	4.5
3	4	6.30	2.8		7
4	4	7.70	3.6	Stoic	9
5	4	9.10	4.0		10
6	4	11.20	4.7		12
7	4	13.30	8.0		21
8	4	15.40	8.3		22
9	4	16.10	8.7	UFL	23
10	4	16.80	9.0	Rich	24

3.1 สำหรับการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์นั้น จะทำการทดสอบการทำงานต่างๆของอุปกรณ์จำนวน 10 กรณีด้วยกัน เพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยครั้งแรกจะปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ประมาณ 1.6 % โดยปริมาตร หรือช่วงที่เข็มเลื่อนไปจำนวน 4 cm ของไม้มบรรทัด และ กดสวิตซ์ Ignition เพื่อสังเกตการทำงานของอุปกรณ์

3.2 การทดสอบการทำงาน ครั้งที่ 2 ก็ใช้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับครั้งแรก แต่จะทำการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น โดยจะปล่อยให้เชื้อเพลิงมีความเข้มข้น 1.82 % โดยปริมาตร หรือประมาณ 5 cm ของไม้บรรทัด และกดสวิตช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

3.3 การทดสอบในครั้งที่ 3 จะเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงให้ไหลเข้าห้องเผาไหม้มากขึ้นอีก โดยในครั้งนี้จะปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 2.8 % โดยปริมาตร และกดสวิตช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงานอีกครั้ง

3.4 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 4 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 3.6 % โดยปริมาตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุดตามทฤษฎี เพื่อสังเกตดูผลการเผาไหม้ว่าสีของการเผาไหม้ในสภาวะที่สมบูรณ์จะเป็นอย่างไร ซึ่งจะต้องปล่อยให้เข็มแสดงปริมาณเชื้อเพลิงเลื่อนไปจำนวน 9 cm ก่อน แล้วจึงกดสวิตช์เผาไหม้

3.5 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 5 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ประมาณ 4.0 % โดยปริมาตร ซึ่งถ้าผลเป็นไปตามคาด สีการเผาไหม้จะต้องเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดง และปริมาตรของเชื้อเพลิงที่จะต้องปล่อยเข้าห้องเผาไหม้ให้ได้ 4% โดยปริมาตรก็คือ ต้องให้เข็มวัดเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 10 cm แล้วจึงกดสวิตช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงานของอุปกรณ์และสีเปลวไฟ

3.6 การทดสอบการทำงานในครั้งที่ 6 จะปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 4.7 % โดยปริมาตร เพื่อดูความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ว่าจะมีลักษณะการเผาไหม้แตกต่างกันกับช่วงที่ปล่อยเชื้อเพลิงในข้อที่ 3.5 มากน้อยเพียงใด และสีของเปลวไฟแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งในครั้งนี้จะปล่อยให้เข็มแสดงผลเลื่อนไปเป็นจำนวน 12 cm ก่อนแล้วจึงกดสวิตช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

3.7 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 7 จะปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้สูงขึ้น กล่าวคือ จะปล่อยเชื้อเพลิงให้เข้าห้องเผาไหม้จำนวน 8 % โดยปริมาตรซึ่งใกล้ถึงจุด UFL เพื่อจะดูว่า ผลการเผาไหม้ในช่วงที่มีสภาวะใกล้เกินจุดติดไฟนั้น สีและลักษณะการเผาไหม้เป็นอย่างไร ซึ่งจะต้องปล่อยให้เข็มวัดเลื่อนไปเป็นจำนวน 21 cm แล้วจึงกดสวิตช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

3.8 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 8 จะปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นอีก คือเพิ่มให้ห้องเผาไหม้มีเชื้อเพลิงจำนวน 8.3 % โดยปริมาตรเป้าหมายเพื่อดูว่าอุปกรณ์ยังสามารถทำงานเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ โดยจะต้องปล่อยให้เข็มวัดเลื่อนไปเป็นจำนวน 22 cm แล้วจึงกดสวิตซ์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

3.9 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 9 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 8.7 % โดยปริมาตร เพื่อดูว่าเชื้อเพลิงจะยังสามารถเผาไหม้ได้อยู่หรือไม่ เพราะค่าที่ได้จากการคำนวณ ถ้าความเข้มข้น 8.9 จะไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งต้องปล่อยให้เข็มวัดเลื่อนไปจำนวน 23 cm ของไม้บรรทัด กดสวิตซ์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน ว่าสามารถเผาไหม้ได้หรือไม่ ถ้าเผาไหม้ไม่ได้ ให้เปิดหน้าต่างเพื่อให้อากาศไหลเข้าและทำการ Ignition อีกครั้ง สังเกตการณ์ทำงานซึ่งในตำแหน่งนี้จะสามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับเรื่องการเกิด Back draft ได้

3.10 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 10 จะทำการปล่อยเชื้อเพลิงให้สูงเกินจุดติดไฟแบบครั้งที่ 9 แต่ก่อนปล่อยให้เชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้นั้น จะเอากล่องที่ออกแบบ (ภาพที่ 21) ทำการครอบแหล่ง Ignition เอาไว้ก่อน และปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 9 % โดยปริมาตร และ กดสวิตซ์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน เป้าหมายเพื่อดูว่าจะมีการเผาไหม้ภายในกล่องเล็กได้อีกหรือไม่เป้าหมายจุดนี้เพื่อต้องการไว้สาริตเกี่ยวกับการเกิด Back draft ในอีกรูปแบบหนึ่ง

## ผลและวิจารณ์

### ผล

1. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 1 โดยการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้จำนวน 4 cm. และ กด สวิตซ์ Ignition เพื่อสังเกตการทำงาน

1.1 ผลการทดสอบการทำงานในครั้งที่ หนึ่ง ซึ่งปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้จำนวน 4 cm. เมื่อจุด แหล่ง Ignition ปรากฏว่าไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้น ถ้าคิดความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มต่อ ปริมาตร จากสมการที่ (5) แล้วจะได้ว่า

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 4_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 4_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ จะ ได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 1.62 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

เมื่อ  $X$  เป็นความเข้มข้นตำแหน่งใดๆ ของ เข้มแสดงผลที่เคลื่อนตัวไปในแต่ละ cm. ซึ่ง ถ้าเปรียบเทียบ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดจากทฤษฎีของ แก๊ส LPG ที่  $X_L$  มีค่าเท่ากับ 1.96 % โดย ปริมาตร ดังนั้น ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (Fuel lean) จึงไม่เพียงพอต่อการจุดติดได้ เมื่อ Pilot Ignition ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์สาริตทำงาน ได้ถูกต้องตามที่ออกแบบ

2. ผลทดสอบการทำงาน ครั้งที่ 2 เมื่อปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 4.5 cm. กดสวิตซ์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

2.1 เมื่อปล่อยเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นในตำแหน่งนี้และทำการกว้นพัดลมเล็กน้อย และทำ การกดสวิตซ์ Ignition ปรากฏว่า มีการเผาไหม้เกิดขึ้น อย่างเบาบาง ซึ่งจากการถ่ายภาพวิดีโอที่ ระยะเวลา 30 เฟรมต่อวินาที (NTSC) และเลือก capture เอามาแสดงจำนวน 6 ภาพ ที่เริ่มมีการเผา ไหม้ ผลปรากฏว่าการทดสอบในครั้งที่ 2 มีการเผาไหม้เกิดขึ้น แต่การเผาไหม้ไม่รุนแรง และสีของ เปลวเพลิงเป็นสีฟ้าอ่อนๆ ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่ 2 นี้ เชื้อเพลิงถูกปล่อยเข้าห้องเผา ไหม้จำนวน 4.5 cm. เมื่อ Pilot Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างเบาบาง ถ้าคิดความ เข้มข้นของ แก๊สหุงต้มต่อปริมาตรในจุดนี้ตามสมการที่ (5) ได้ว่า

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 4.5_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 4.5_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ ได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 1.82 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

ซึ่งค่าความเข้มข้นต่ำสุดจากทฤษฎีของ LPG ( $X_L$ ) เท่ากับ 1.96 % โดยปริมาตร แต่สำหรับตู้ทดสอบนี้การเผาไหม้จะเริ่มที่ 1.82 % โดยปริมาตร ซึ่งสาเหตุที่สามารถเผาไหม้ได้ก่อนนั้น คิดว่าเนื่องจากแก๊สมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ และห้องเผาไหม้มีขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อปล่อยแก๊สเข้าห้องเผาไหม้แล้ว ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ จะมีค่าความเข้มข้น มากกว่าด้านบน ดังแสดงในภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 34



ภาพที่ 29 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง กรณีที่ 2  $X = 1.82 \%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 30 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 2  $X = 1.82\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 31 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 2  $X = 1.82\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 32 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง กรณีที่ 2  $X = 1.82\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 33 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง กรณีที่ 2  $X = 1.82\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 34 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 2  $X = 1.82\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

### 3 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 3 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 7 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการทำงาน

3.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่สาม โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้จำนวน 7 cm. เมื่อจุด แหล่ง Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สีของเปลวไฟ ก็ยังคงเป็นสีฟ้าอยู่ ซึ่งการที่เปลวไฟยังเป็นสีฟ้าแสดงว่าเชื้อเพลิงยังคงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์อยู่ เพราะยังให้พลังงานได้สูงอยู่ ดังแสดงผลในภาพที่ 35 ซึ่งในจุดนี้ถ้าคิดความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มต่อปริมาตรในตำแหน่งที่ 7 cm จะได้ว่า

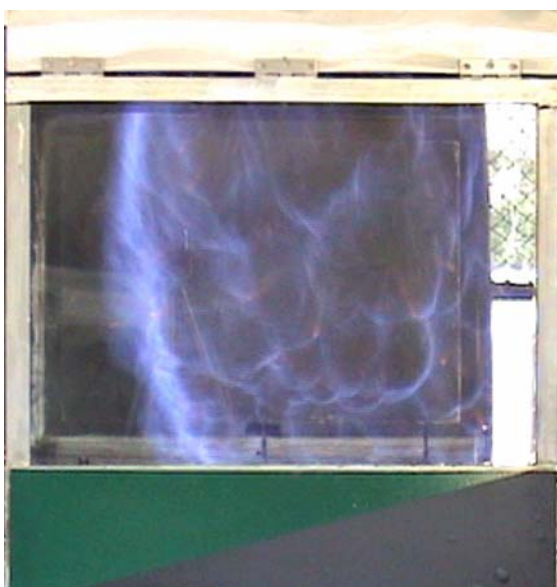
$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 7.0_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 7.0_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ ได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 2.8\% \text{ โดยปริมาตร}$$

จากผลการทดสอบ จะเห็นว่าการเผาไหม้ จะมีความรุนแรงมากขึ้นและแก๊สหุงต้มที่มีการเผาไหม้ยังคงอยู่ สีของเปลวไฟจะยังคงเป็นสีฟ้าอยู่ (ภาพที่ 35 ถึง 38) แต่ถ้าเราสังเกตอัตราการลามไฟของ

เชื้อเพลิง จะเห็นว่า มีอัตราการลามไฟได้เร็วกว่าเดิม การทดสอบครั้งที่ 2 เพราะใช้เวลาเพียงเฟรม  
ก็เผาไหม้หมดแล้วดังแสดงในภาพที่ 39 ถึง 40



ภาพที่ 35 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 36 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 37 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 38 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 39 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 40 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 3  $X=2.8\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

4 ทดสอบการทำงานครั้งที่ 4 ปลดปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 9 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

4.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่ 4 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้จำนวน 9 cm. เมื่อจุดแหล่ง Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความรุนแรง ซึ่งใช้เวลาในการเผาไหม้เพียง 3 เฟรมเท่านั้น (30เฟรมต่อวินาที) แต่สีของเปลวไฟก็เริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงบ้างเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าบางจุดอาจเริ่มมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์บ้างแต่น้อยมาก (แสงสีแดงบ่งบอกถึงพลังงานจากการเผาไหม้มีน้อย) แต่ส่วนใหญ่อะกี่ยังคงเป็นสีฟ้า หรือยังสมบูรณ์อยู่ ถ้าคิดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มต่อปริมาตรในห้องเผาไหม้ในตำแหน่ง 9 cm ก็จะได้ว่า

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 9.0_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 9.0_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ จะได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 3.56 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

ค่าที่ได้จากการคิดจากทฤษฎีตาม สมการที่ 2 ก็จะได้ค่าความเข้มข้นของแก๊สผสมในช่วงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เท่ากับ 3.56 % โดยปริมาตรเช่นเดียวกัน เพื่อจะดูว่า ในช่วงที่ความเข้มข้นในสภาวะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะมีลักษณะเป็นอย่างไรการทดสอบมุ่งต้องการเปรียบเทียบความใกล้เคียงในสีของเปลวไฟ และผลที่ปรากฏ (ภาพ 41ถึง46) พบว่ายังคงเป็นสีฟ้าอยู่



ภาพที่ 41 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56 \%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



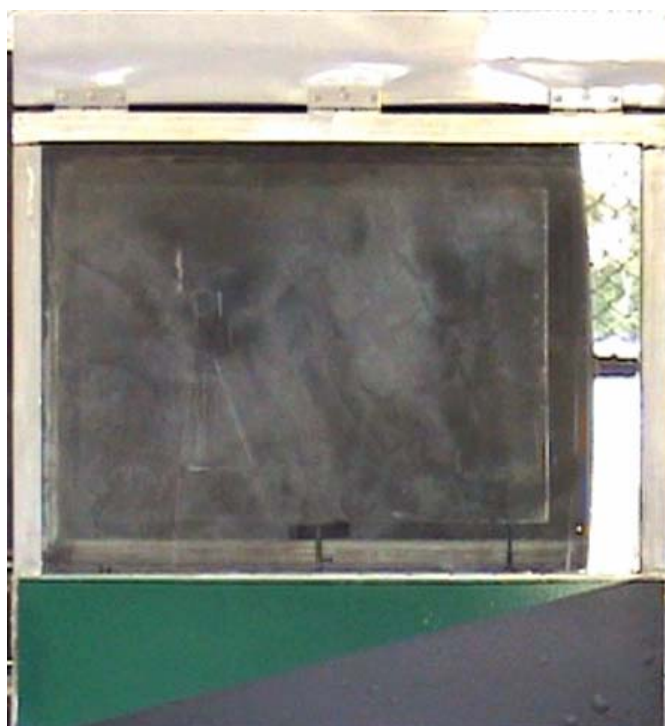
ภาพที่ 42 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



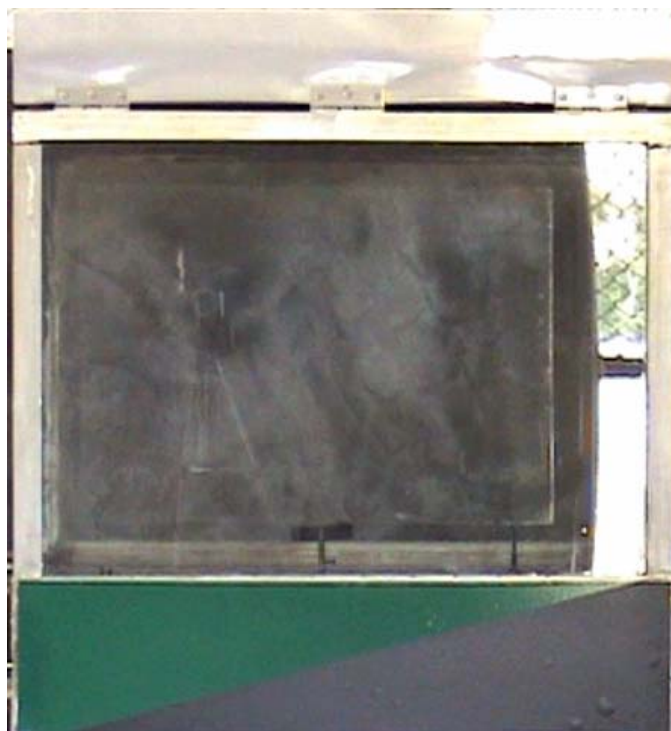
ภาพที่ 43 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 44 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 45 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 46 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 4  $X = 3.56\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

### 5. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 5 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 10 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

5.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่ห้า โดยการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ จำนวน 10 cm. เมื่อจุด Pilot Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความรุนแรงมากกว่าครั้งที่สี่เล็กน้อย แต่เปลวไฟจะออกไปในลักษณะออกสีแดงมากขึ้นและถ้าคิดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มต่อปริมาตรในห้องเผาไหม้ก็จะได้ว่า

$$X = \left[ \frac{0.7 \text{ (l/cm)} \times 10 \text{ cm}}{170 \text{ (l)} + (0.7 \text{ (l/cm)} \times 10 \text{ (cm)})} \right] \times 100 \text{ ได้รับความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 4.0\% \text{ โดยปริมาตร}$$

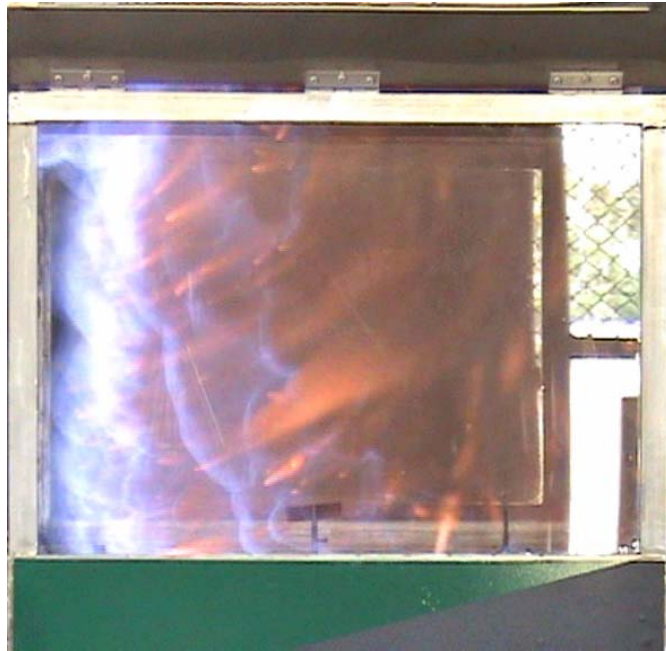
การเผาไหม้ที่สภาวะความเข้มข้นที่สูงขึ้นเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้จะมีลักษณะออกสีแดง แสดงว่าอุปกรณ์สารพัดสามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับเรื่องการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้โดยดูจากสีการเผาไหม้ได้ (ภาพที่ 47 ถึง 51)



ภาพที่ 47 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 48 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 49 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 50 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 51 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 52 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 5  $X = 4.0\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

**6. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 6 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 12 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน**

6.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่หก เมื่อจุด Pilot Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความรุนแรง ใกล้เคียงกันกับครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 แต่ สีของเปลวไฟก็จะเป็นสีแดงมากขึ้นกว่าเดิมอีก (ภาพที่ 53 ถึง 58) ซึ่งแสดงว่าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น พลังงานในการเผาไหม้ลดลง และ ถ้าคิดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สสูงสุดต่อปริมาตรในห้องเผาไหม้ก็จะได้

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 12_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 12_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ ได้รับความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 4.3 \% \text{ โดยปริมาตร}$$



ภาพที่ 53 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3 \%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 54 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 55 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 56 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 57 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 58 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 6  $X = 4.3\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

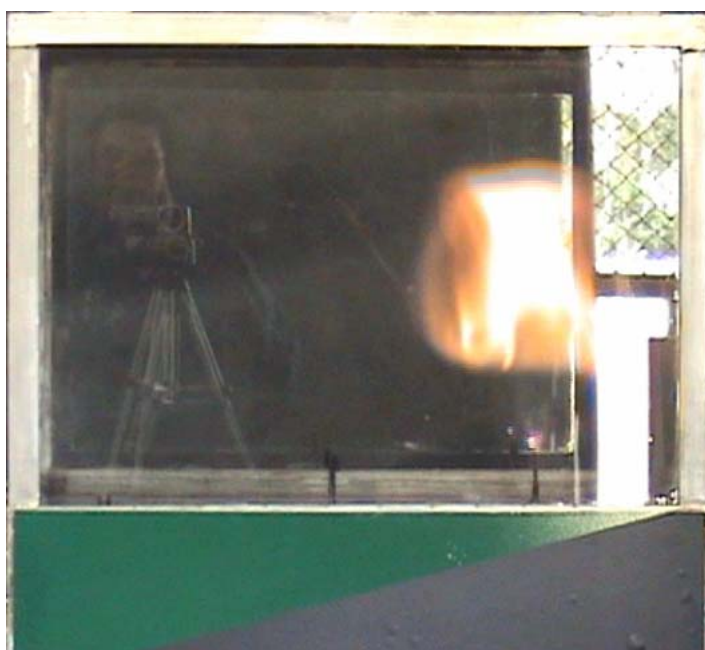
### 7. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 7 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้จำนวน 21 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

7.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่เจ็ด โดยการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้จำนวน 21 cm. เมื่อจุด แหล่ง Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นช้ากว่า การทดสอบในครั้งที่หก อย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นว่า เปลวไฟจะเป็นสีแดงแสดมากยิ่งขึ้น ช่วงกว้างการเผาไหม้จะยาวนาน และการลุกลามของเปลวไฟจะเคลื่อนตัวจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้แบบ Diffusion flame (ภาพที่ 59 ถึง 64) ถ้าคิดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สพุ่งตัมต่อปริมาตรในห้องเผาไหม้จะได้ว่า

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 21_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 21_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ ได้ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง } 8.0\% \text{ โดยปริมาตร}$$



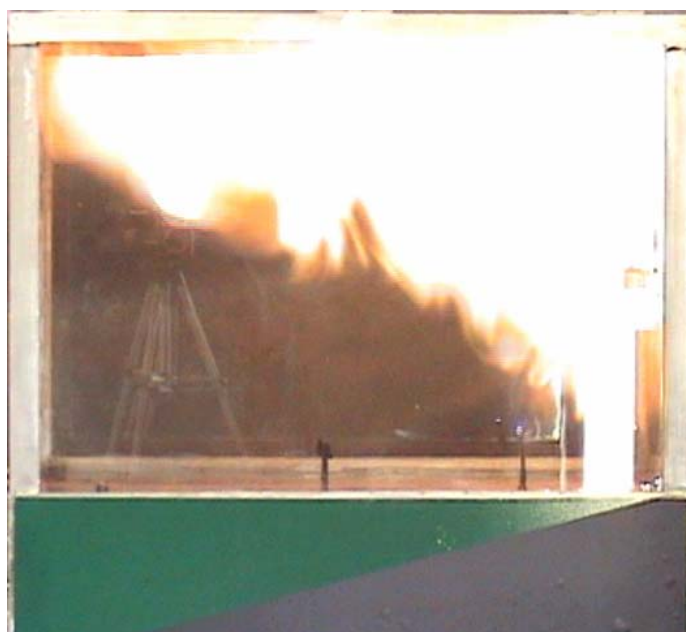
ภาพที่ 59 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 60 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 61 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 62 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 63 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 64 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 7  $X = 8.0\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

## 8. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 8 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 22 cm. กดสวิดซ์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน

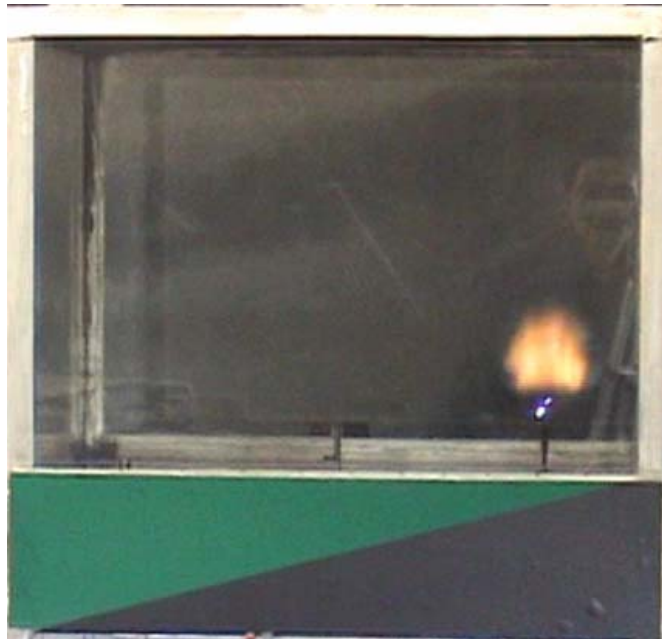
8.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่แปด โดยการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 22 cm. เมื่อ Pilot Ignition ปรากฏว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นช้ากว่า การทดสอบในครั้งที่เจ็ด อย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นว่า เปลวไฟจะเป็นสีแดงสดเหมือนเดิม ช่วงกว้างการเผาไหม้จะยาวนานกว่าครั้งที่เจ็ด (ดูภาพทั้งหมดในภาคผนวก) และการลุกลามของเปลวไฟในการจุดครั้งแรกจะลอยตัวขึ้นสูงเหมือนฟองอากาศและเมื่อลอยขึ้นถึงฝ้าด้านบนแล้วจะลุกลามลงสู่ด้านล่าง เช่นเดียวกันกับครั้งที่เจ็ด (ภาพที่ 65 ถึง 70) ถ้าคิดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สพุ่งตัมต่อปริมาตรในห้องเผาไหม้ก็จะได้

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 22_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 22_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ จะได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 8.3\% \text{ โดยปริมาตร}$$

จะเห็นว่าตำแหน่งที่เริ่มติดของครั้งที่ เจ็ด (ภาพที่ 59) กับภาพที่เริ่มติดของการทดลองครั้งที่แปดนั้น จะมีลักษณะที่ต่างกัน คือครั้งที่แปดติดไฟได้ยากยิ่งขึ้น (ภาพที่ 65)



ภาพที่ 65 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 66 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



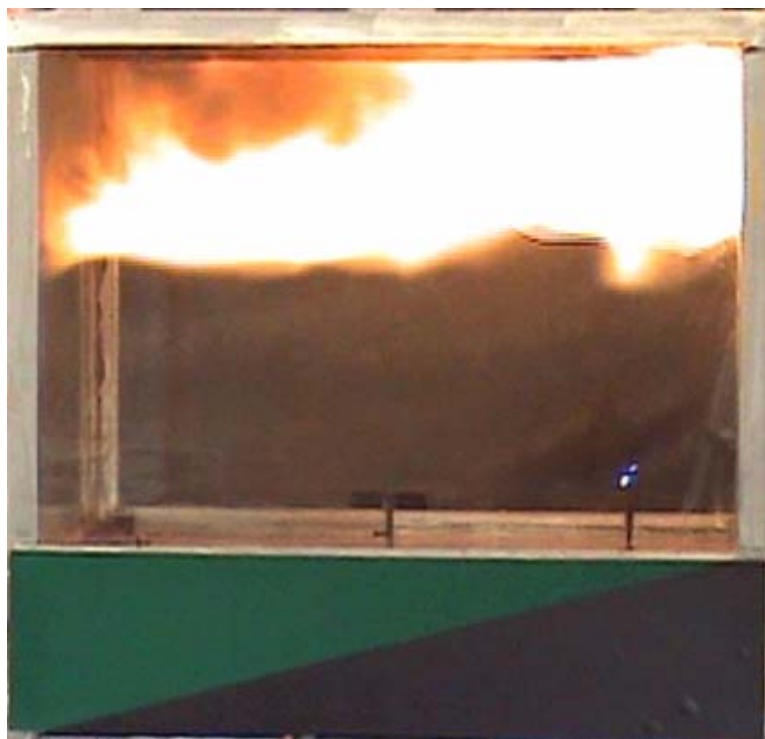
ภาพที่ 67 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 68 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 4/30 นาที



ภาพที่ 69 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



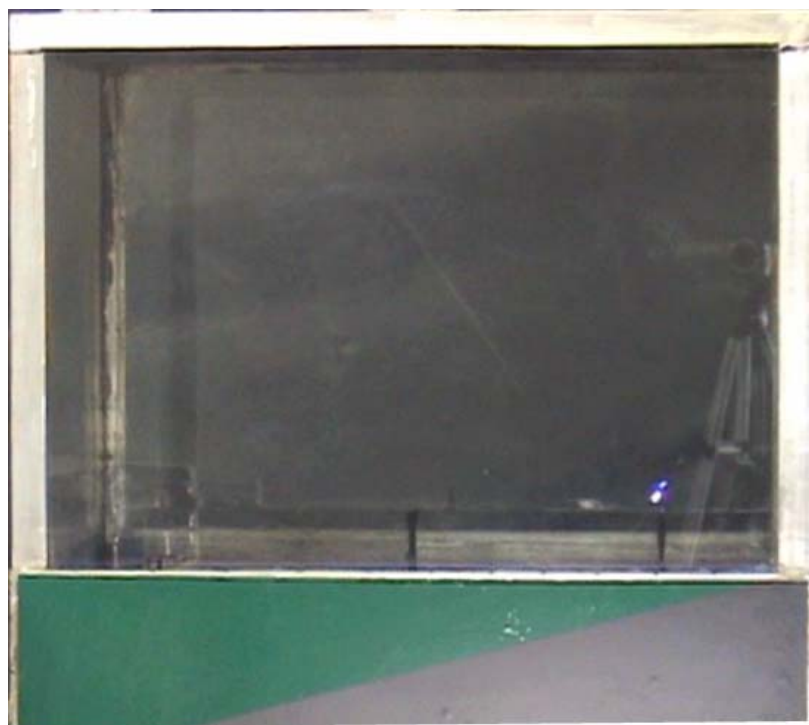
ภาพที่ 70 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 8  $X = 8.3\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

9. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 9 โดยปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 23 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ ว่าสามารถเผาไหม้ได้หรือไม่ ถ้าเผาไหม้ไม่ได้ ให้เปิดหน้าต่างเพื่อให้อากาศไหลเข้าและทำการ Ignition อีกครั้ง สังเกตการณ์ทำงาน

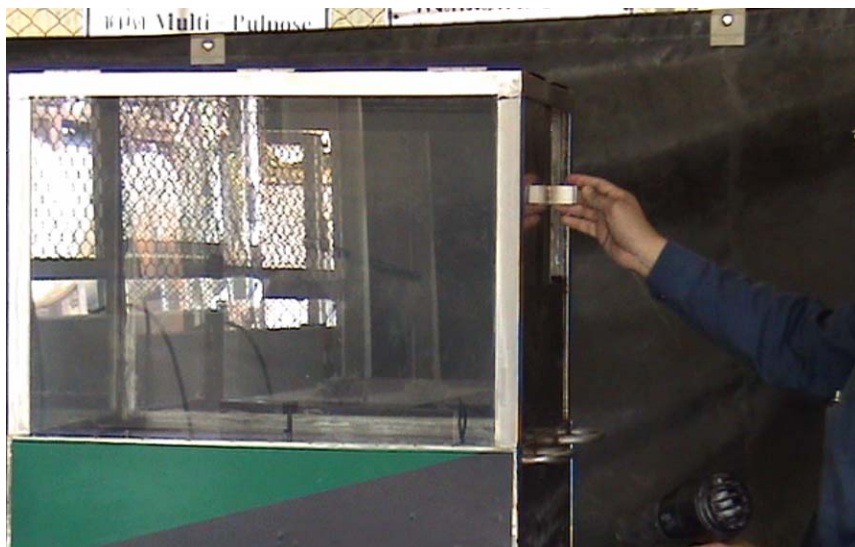
9.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่ 9 เมื่อปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 23 cm. เมื่อจุด แหล่ง Ignition ปรากฏว่าไม่สามารถเผาไหม้ได้ (ภาพที่ 71) แต่ถ้าเปิดหน้าต่าง แล้วปล่อยให้อากาศเข้าไป (ภาพที่ 72) จะเกิดการระเบิดได้อย่างรุนแรงผ่านหน้าต่างออกไป (ภาพที่ 73 ถึง 78) โดยปกติในสถานะที่ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงเกินจุดติดไฟนั้น เชื้อเพลิงจะไม่สามารถเผาไหม้ได้ แต่เมื่อมีการเติมอากาศ(ออกซิเจน)เข้าไปซึ่งภายในห้องเผาไหม้มีความร้อน(Ignition) อยู่ เมื่อเปิดหน้าต่างก็ทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกัน เมื่อความเข้มข้นที่ผสมกันอยู่ในช่วงกว้างการติดไฟ จะเกิดการเผาไหม้ที่เป็นลักษณะเกิดการระเบิดออกนอกหน้าต่าง ซึ่งสถานะนี้เราเรียกว่า Back Draft ซึ่งผู้สาธิตสามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการ ดังกล่าวได้ตามวัตถุประสงค์ เมื่อคิดปริมาณของเชื้อเพลิง ที่ปล่อยเข้าห้องเผาไหม้จะได้ปริมาณเท่ากับ

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 23_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 23_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ จะได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 8.7 \% \text{ โดยปริมาตร}$$

ซึ่งถ้าเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นสูงสุด  $X_U$  จากสมการที่ (3) หน้าที่ 12 จะได้ค่า ของจุดติดไฟ สูงสุดเท่ากับ 8.9 % โดยปริมาตร ซึ่งก็ใกล้เคียงกันกับผลจากการทดลอง และเหตุผลที่ค่าต่างๆ ไม่ละเอียดเพียงพอเนื่องจากว่า ขนาดของตู้ทดสอบมีขนาดใหญ่ และอุปกรณ์ที่ประกอบต่างๆยังไม่ละเอียดเพียงพอ แต่ก็สามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ตามวัตถุประสงค์ รูปภาพทั้งหมดได้ในภาคผนวก



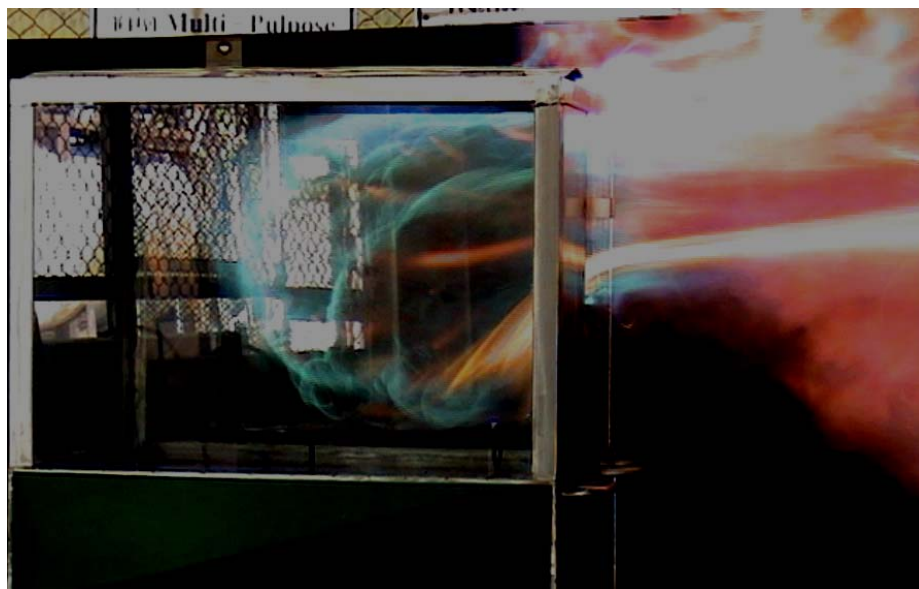
ภาพที่ 71 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในช่วง 23 cm (8.7 %) เมื่อมีการจุดประกายไฟก็แก๊ส หุงต้มไม่สามารถเผาไหม้ได้



ภาพที่ 72 แสดงการเปิดหน้าต่างเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้



ภาพที่ 73 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 1/30 วินาที



ภาพที่ 74 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 75 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 76 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที



ภาพที่ 77 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 78 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 9  $X = 8.7\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

**10. ทดสอบการทำงานครั้งที่ 10 โดยเอากล่องที่ออกแบบ (ภาพที่ 21) ทำการครอบแหล่ง Ignition และปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จำนวน 24 cm. กดสวิทช์ Ignition และสังเกตการณ์ทำงาน**

10.1 ผลจากการทดสอบการทำงานในครั้งที่สิบ เป็นการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 24 cm. เท่าเดิม การทดสอบในหัวข้อนี้ เพื่อต้องการดูพฤติกรรมของไฟเกี่ยวกับเรื่องการเกิด Back Draft ในอีกรูปแบบหนึ่ง นอกเหนือจากที่เกิดในกรณีที่ ค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงเกินจุดติดไฟแต่แหล่งความร้อนที่เกินจุดติดไฟ แต่ขาดออกซิเจน และเมื่อมีนักดับเพลิงหรือผู้ที่ไม่รู้เท่าทันไปเปิดประตูหรือหน้าต่าง หรือเติมอากาศในกรณีใดๆก็ตาม ผลที่ตามมาคือ การเกิดการระเบิดขึ้นได้ (ภาพที่ 79 ถึง 84) ในหัวข้อนี้ จะเป็นการสาธิต การเกิด Back Draft ในรูปแบบที่สอง โดยการนำกล่อง เหล็กที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ มีขนาด 25 x 20 x 21 เซนติเมตร ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ 1:16 เท่าของพื้นที่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด นำไปครอบแหล่งกำเนิดเพลิง และปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ทดสอบให้เกิดขีดพิคัดบนและทดลองการจุดประไฟอีกครั้งซึ่ง จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ขณะที่ปล่อยให้เชื้อเพลิงไหลเข้าไปในห้องเผาไหม้เกินค่า upper flammable limit แล้วก็ตาม แต่ถ้ามีกล่องเล็กๆ ที่บรรจุอากาศซึ่งอยู่ภายใน และเมื่อเชื้อเพลิงจากภายนอกกล่องเล็ก ไหลเข้าไปสู่ภายใน ซึ่งมีแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่พร้อม ก็จะสามารทำให้เกิดการระเบิดจากภายในห้องนั้น เพราะมีอากาศ

ที่ถูกเก็บในกล่องเล็กเป็นการเผาไหม้ที่เกิดจากภายในกล่องเล็กและลูกกลมออกสู่ภายนอก อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งถ้าพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จากในกล่องเล็กสูงมากขึ้น ก็สามารถส่งผลให้กล่องใหญ่(ห้องเผาไหม้ทั้งหมด)ได้อยู่ถึงแม้ว่าจะ มีความเข้มข้นเกินจุด UFL ก็ตาม ซึ่งจะเป็นไปตามการทดลอง ของ Zabetakis ที่ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงกว้างการติดไฟก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3 หน้าที่ 6 ซึ่งถ้าคิดความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้ก็จะมีค่าเท่ากับ

$$X = \left[ \frac{0.7_{(l/cm)} \times 24_{cm}}{170_{(l)} + (0.7_{(l/cm)} \times 24_{(cm)})} \right] \times 100 \text{ จะได้ความเข้มข้นเชื้อเพลิง } 9.1 \% \text{ โดยปริมาตร}$$



ภาพที่ 79 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกรณีที่ 10  $X = 9.1 \%$  ที่เวลา  $1/30$  วินาที



ภาพที่ 80 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 10  $X = 9.1\%$  ที่เวลา 2/30 วินาที



ภาพที่ 81 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 10  $X = 9.1\%$  ที่เวลา 3/30 วินาที



ภาพที่ 82 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 10  $X = 9.1\%$  ที่เวลา 4/30 วินาที

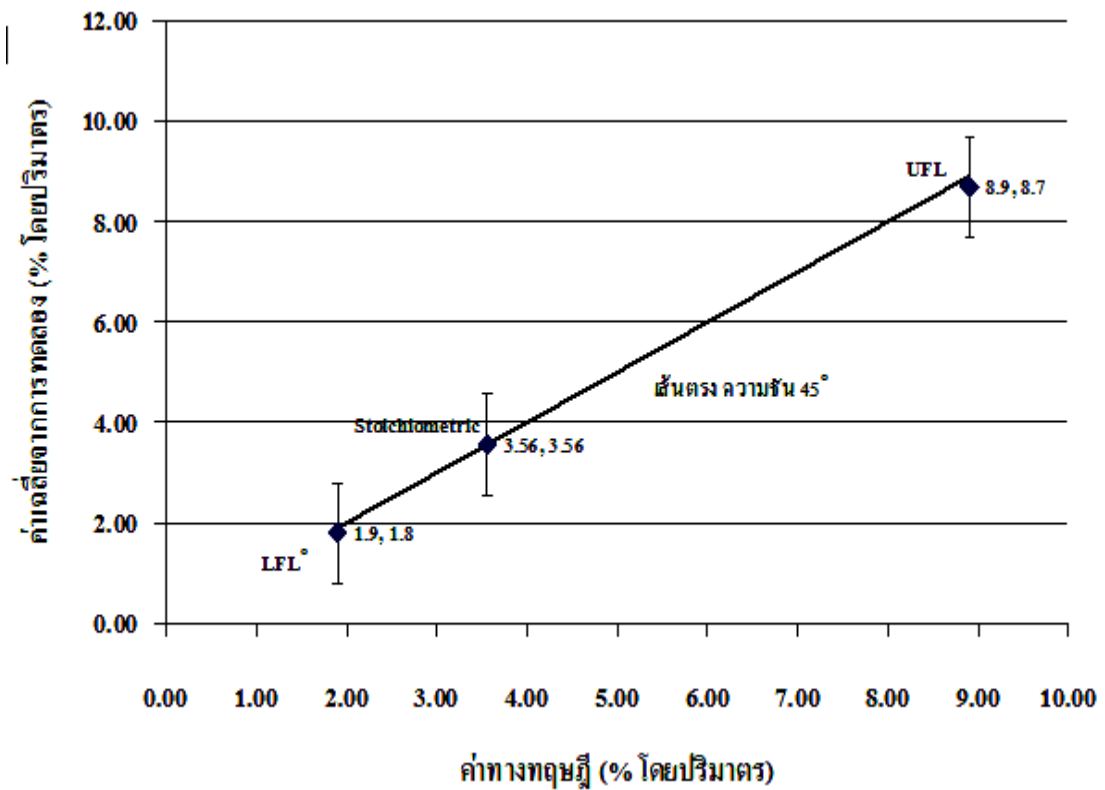


ภาพที่ 83 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 10  $X = 9.1\%$  ที่เวลา 5/30 วินาที



ภาพที่ 84 แสดงผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดที่ 10  $X = 9.1\%$  ที่เวลา 6/30 วินาที

ผลจากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สาธิตในแต่ละช่วงการทดสอบนั้น ทำให้ทราบว่า อุปกรณ์มีศักยภาพ ที่จะนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับเรื่องพฤติกรรมของไฟต่างๆ ได้หลายอย่าง ซึ่งถ้าเปรียบเทียบผลการเผาไหม้ ของแก๊สผสมที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จาก ทฤษฎีแล้ว จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน และถ้าลองเอาผลการทำงานของอุปกรณ์ในช่วงต่างๆ จากการ ทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ตามทฤษฎี นำมา plot เป็นกราฟ ก็จะได้ Slope เท่ากับ 0.98 ซึ่ง ใกล้เคียงกันกับทางทฤษฎี ดังแสดงในภาพที่ 85



ภาพที่ 85 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงโดยปริมาตร ระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าเฉลี่ยจากการทดลอง (Error บวกลบ 1%)

### วิจารณ์

จากการทดสอบและการทำงานของอุปกรณ์สาธิตดังกล่าวนั้น ถึงแม้ว่าจะสามารถนำไปสาธิตประกอบการเรียนการสอนได้ก็จริงอยู่ แต่จะพบข้อควรปรับปรุงอยู่หลายส่วนด้วย เช่นเดียวกัน ซึ่งเท่าที่พบปัญหาและอุปสรรคเกี่ยวกับอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย

1. ระบบควบคุมการปล่อยปริมาณของเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ยังไม่มีความละเอียดเพียงพอ เพราะถ้ากดสวิทช์ ปิดเชื้อเพลิง แล้ว จะเพิ่มปริมาณการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้อีกครั้ง ไม่สามารถทำได้ เพราะปริมาตร ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้จะมีค่าผิดไป เนื่องจากกลไกการทำงานของ Solenoid มีการหน่วงเวลาการเปิดปิดบ้างเล็กน้อย ทำให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ขาดช่วงไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการควบคุมต้องแม่นยำเพียงครั้งเดียว

2. ผู้ทดสอบมีขนาดใหญ่ อาจทำให้การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปได้ไม่ทั่วถึง อาจทำให้ค่าการทดลองเบี่ยงเบนบ้างเล็กน้อย
3. ระบบฝาเปิดปิดด้านบน ความละเอียดไปบ้างอาจทำให้มีการเล็ดลอดของอากาศและเชื้อเพลิงออกนอกระบบได้บ้างเล็กน้อย การผลิตจริงควรให้มีความละเอียดไม่ให้อากาศและเชื้อเพลิงไหลออกได้
4. ผู้สาธิตไม่สามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับเรื่อง จุด Auto ignition ของเชื้อเพลิงได้ ซึ่งควรมีการพัฒนาต่อไปให้สามารถปรับและเพิ่มอุณหภูมิของตัวจุด (Ignition) และควรถีจะบอกปริมาณของอุณหภูมิได้ด้วย
5. จุดของสายไฟแรงสูงสำหรับก่อให้เกิดประกายไฟ เป็นสายไฟธรรมดา ถ้าผลิตจริง ควรทำเป็นแบบเซรามิกซ์ ห่อหุ้มจะสามารถป้องกันการเผาไหม้ของขดลวด และไฟฟ้าลัดวงจรได้ดียิ่งขึ้นสรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ผู้สาธิตที่ผลิตออกมานั้นสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นจริงในทางทฤษฎี และผลจากการทดลองนั้นยังทำให้ได้เห็นพฤติกรรม การเผาไหม้ และเห็นสีของเปลวไฟแต่ละช่วงความเข้มข้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นภาพที่หาดูได้ยาก การทดลองการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถใช้อธิบาย พฤติกรรมของไฟ ว่ามีการพัฒนาไปในแต่ละช่วงความเข้มข้นต่างๆอย่างไร นอกจากนั้น ยังสามารถสรุปให้เห็นว่า ถ้าแก๊สหุงต้มมีการติดไฟ และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เราจะมองเห็น สีของเปลวไฟแก๊สหุงต้ม เป็นน้ำทะเล และถ้า การเผาไหม้ที่ไม่ค่อยสมบูรณ์ เราจะมองเห็นสีของเปลวไฟออกไปทางสีแดงอิฐ และถ้าบางช่วงของการเผาไหม้ที่ไม่ค่อยสมบูรณ์ก็จะมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มาก ซึ่งการเผาไหม้ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะมองเห็นแสงเป็นลักษณะสีเขียวมรกต นอกจากนั้นยังทำให้เราเห็นว่า อุปกรณ์ในการเรียนรู้เกี่ยวกับเรื่องของไฟเป็นสิ่งที่สำคัญ และยังคงมีความท้าทายให้ประดิษฐ์สื่อเรียนรู้ใหม่อยู่ตลอดเวลาและอุปกรณ์ที่ออกแบบมานี้ สามารถทำงานได้เที่ยงตรงพอสมควร เพราะ

ถ้าเรานำค่าจากทางทฤษฎี มา ทำเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ กับ กราฟค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 85 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลอง กับค่าในทางทฤษฎี ใกล้เคียงกันมาก สรุปว่า อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ตามวัตถุประสงค์

### ข้อเสนอแนะ

สำหรับผู้ที่คิดจะลองทำอุปกรณ์ชิ้นนี้เพื่อประกอบการเรียนการสอน ขอแนะนำว่า ควรออกแบบให้ขนาดของห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กกว่านี้อีก และการผลิตต่างๆ ต้องมีความละเอียด เพื่อที่จะให้สามารถทำงานได้ดี และก่อนที่จะทำการสาธิต ควรเตรียมความปลอดภัยต่างๆ ไว้ ด้วย ไม่ว่าจะเป็นถังดับเพลิง หรืออุปกรณ์ความปลอดภัยอื่นๆก่อนสาธิต ซึ่งขั้นตอนการสาธิตขึ้นอยู่กับเป้าหมายว่าเราต้องการจะบอกหรือแนะนำเรื่องอะไร ให้กับผู้เข้ารับการอบรม แต่ก่อนที่จะทำการสาธิตนั้น ต้อง ตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ทั้งหมดให้พร้อมใช้งาน เช่น ต่อสายแก๊สเข้ากับตู้ทดสอบ และเปิด valve ที่ถังแก๊ส ปรับอัตราแรงดันให้คงที่ในตำแหน่งที่ตั้งเอาไว้ทุกครั้ง ต่อสายไฟต่างๆและระบบควบคุมเข้ากับตู้สาธิต ทดสอบการทำงานของ ระบบตัว Ignition ตัวปล่อยแก๊สเข้าสู่ตู้สาธิต ว่าทำงานหรือไม่ โดยการลองเปิดสวิทช์ อุปกรณ์แต่ละตัว ถ้าอุปกรณ์ทั้งหมดทำงาน แล้วจึงเริ่มสาธิตได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Beyler, C. L. (1995). **Chapter 2-9 Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames.**

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. P. J. DiNenno. Quincy, MA, National Fire Protection Association.

National Institute for Occupational Safety and Health. 1995. **Documentation for Immediately**

**Dangerous to Life or Health Concentrations.** Available Source :

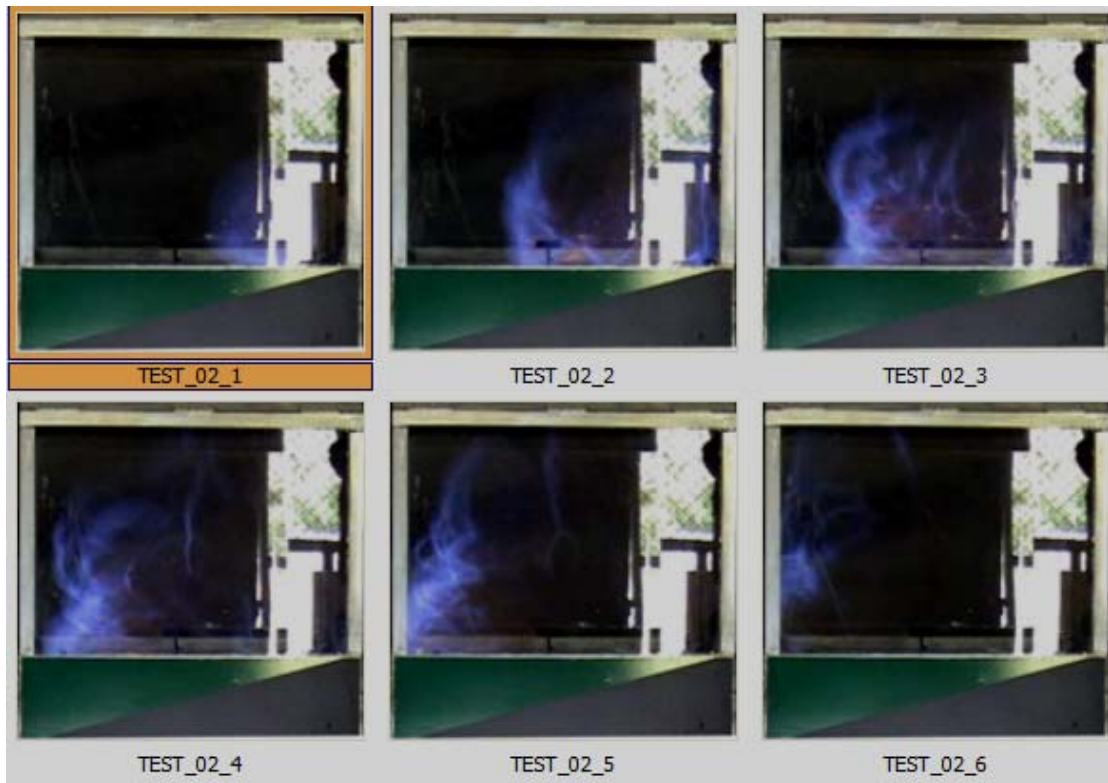
<http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>

Quintiere, J. G. (2005). **Fundamentals of Fire Phenomena.** Chichester, UK, John Wiley & Sons.

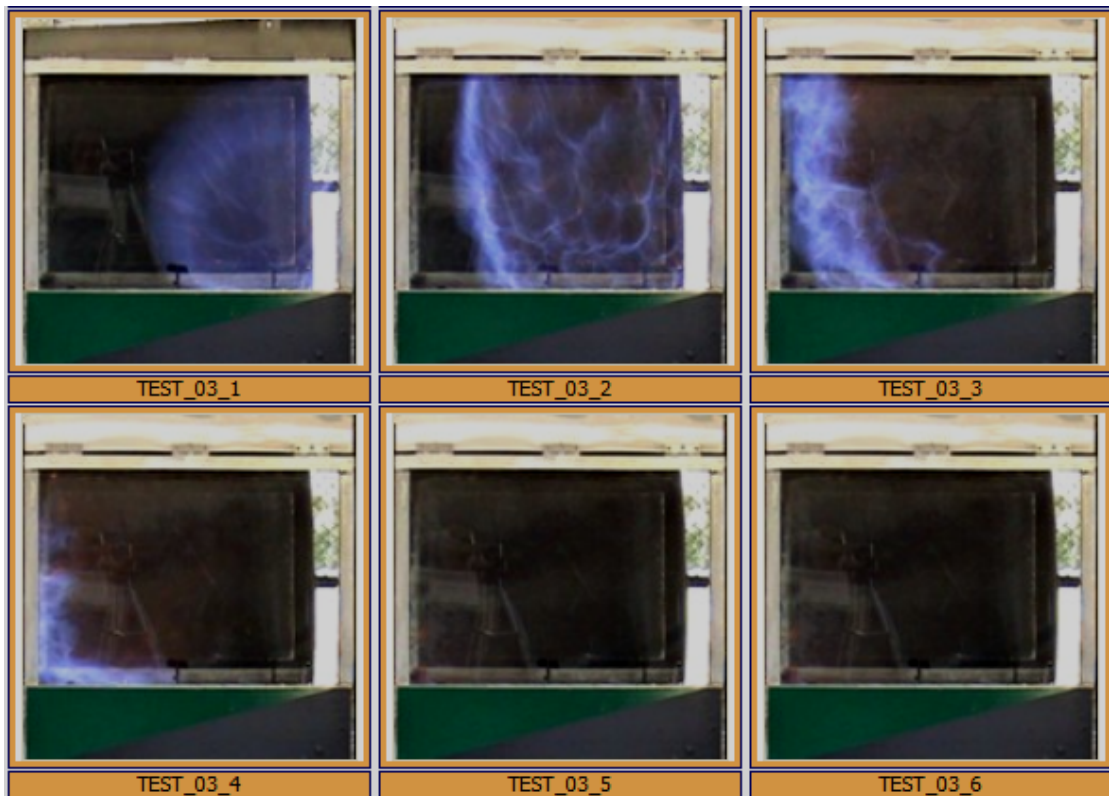
Zabetakis, M. G. (1965). **Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors.**

Washington DC, Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior.

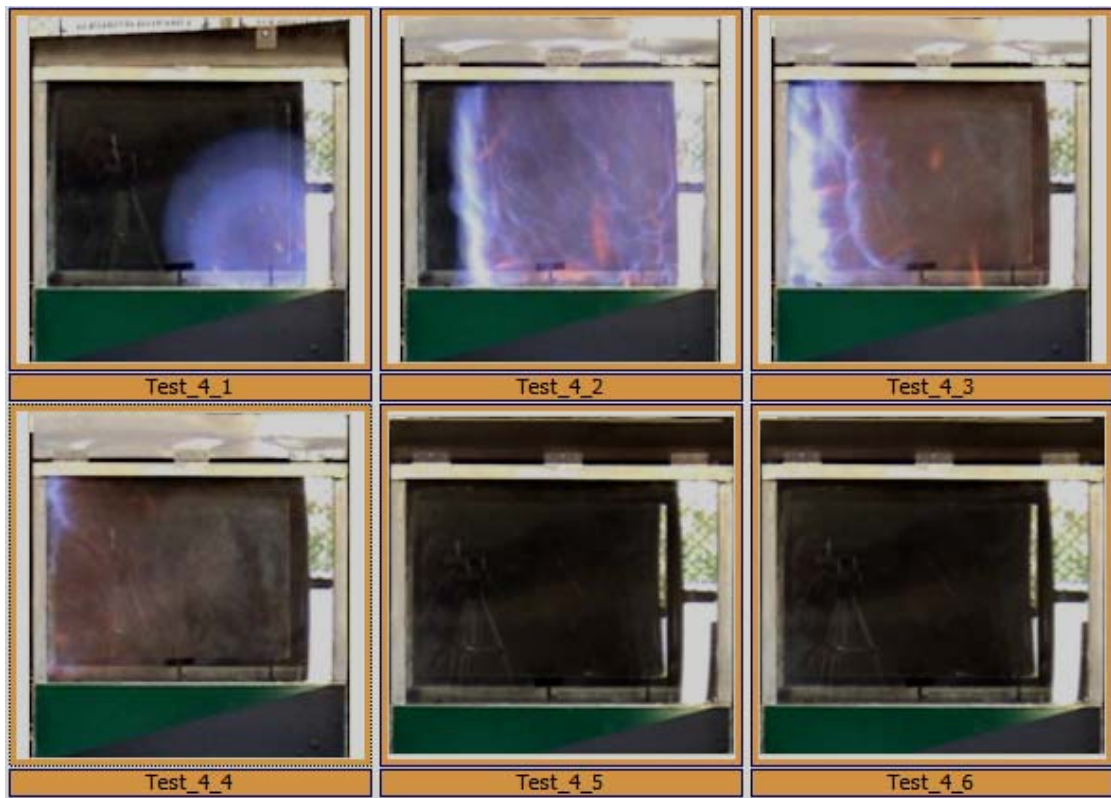
**ภาคผนวก**



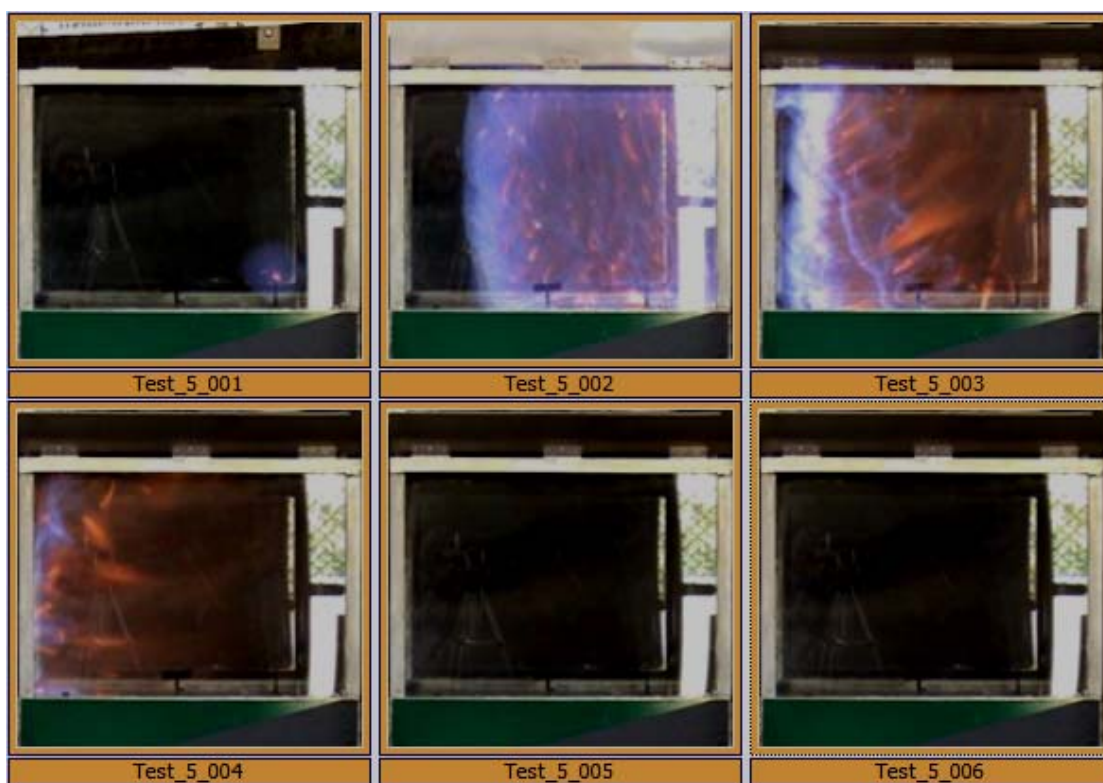
ภาพผนวกที่ 1 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 1.82 % โดย ปริมาตร (1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 2 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 2.8 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 3 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 3.6 % โดย ปริมาตร (1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



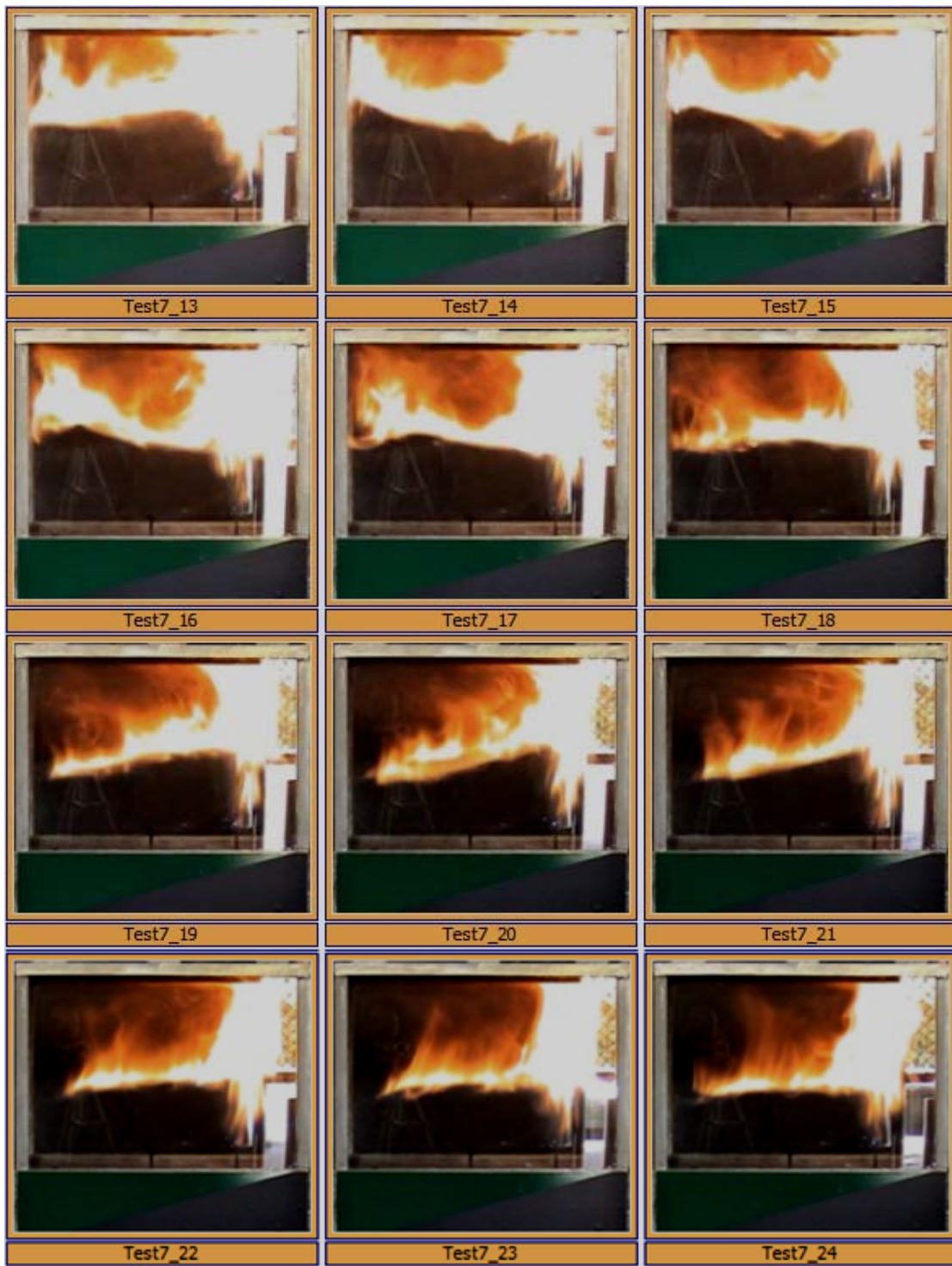
ภาพผนวกที่ 4 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 5 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 4.0 % โดย ปริมาตร( 1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 5 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 6 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 4.7 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 6 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 7 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.0 % โดย ปริมาตร( 1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 6 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 6 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 6 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 7 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 8 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.3 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 7 (ต่อ)



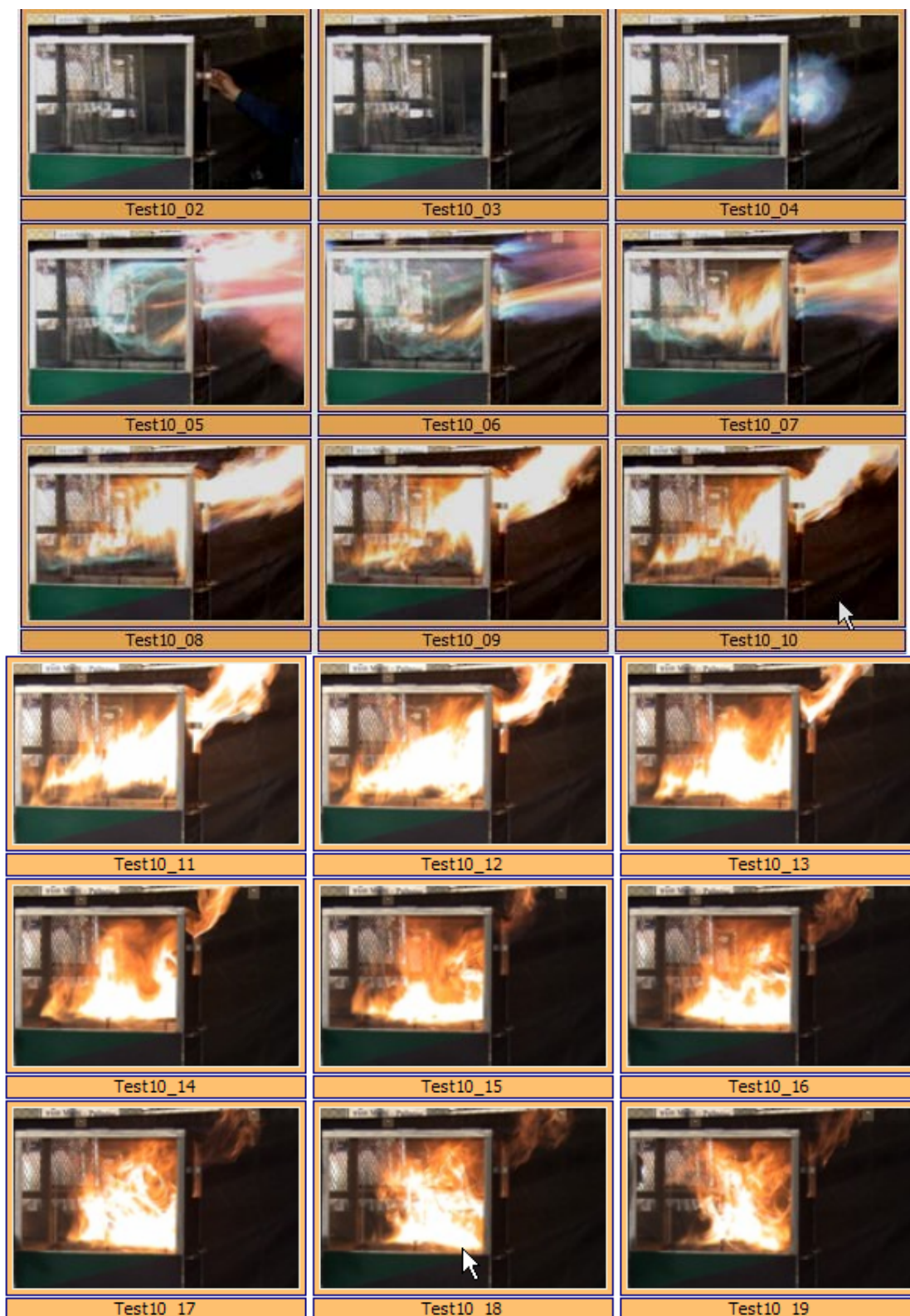
ภาพผนวกที่ 7 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 7 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 7 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 8 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 9 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 8.7 % โดยปริมาตร (1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



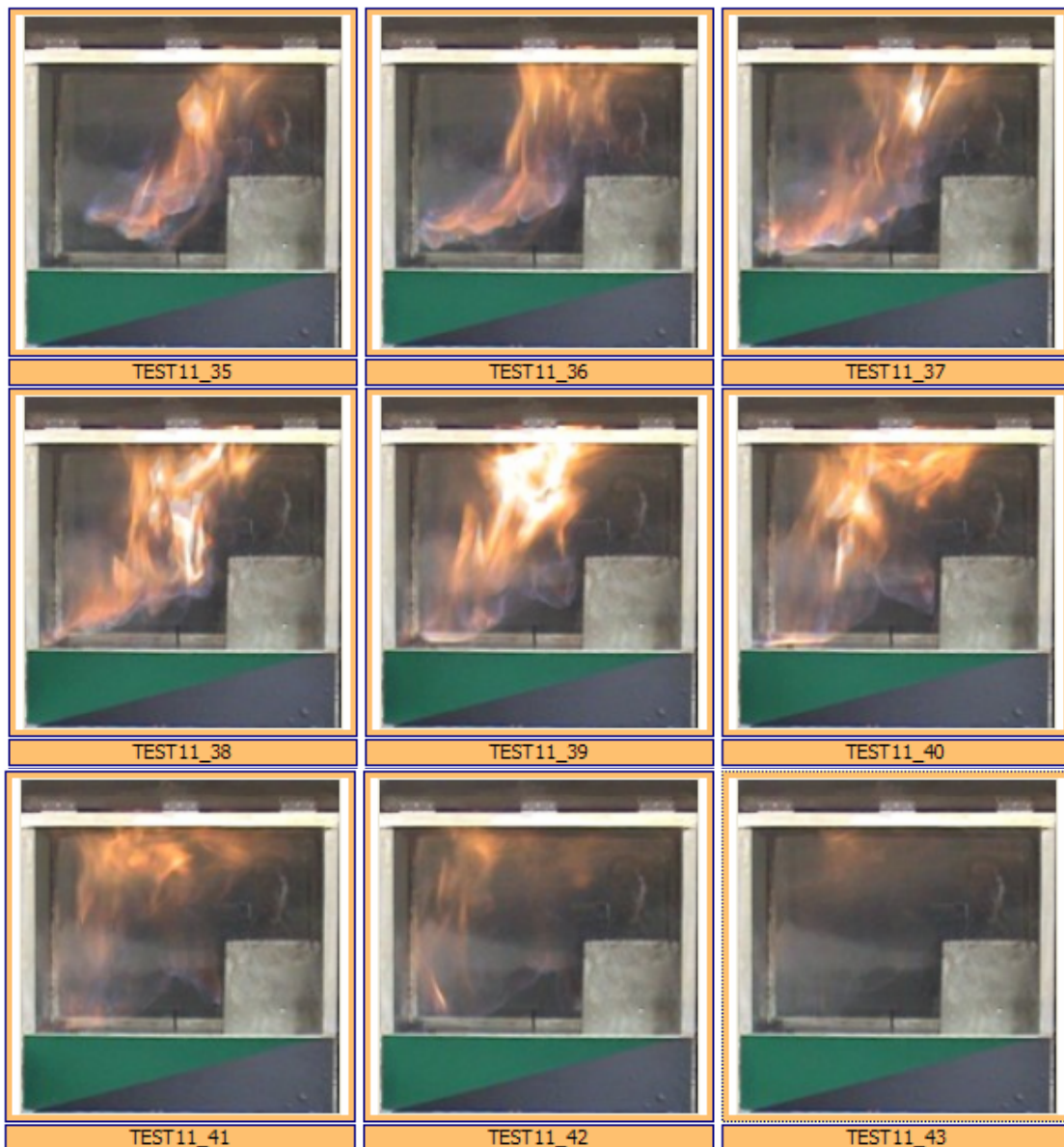
ภาพผนวกที่ 9 ประมวลภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 10 ความเข้มข้นเชื้อเพลิง 9.0 % โดย ปริมาตร(1 เฟรมห่างกัน 1/30 วินาที)



ภาพผนวกที่ 9 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 9 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ 9 (ต่อ)

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายณัฐชัย ละอองทอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 ตุลาคม 2512
สถานที่เกิด	จ.นครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	-โรงเรียนตำรวจนครบาลรุ่น 62 กองบัญชาการศึกษา กรมตำรวจ ( 2532)
	- DIPLOMA: Instructors course . RADDNINGS VETKET ,Sweden . (1996)
	- Diploma: Qualifying Hazmat Course for the Police Fire Brigade of Bangkok. RADDNINGS VETKET , Sweden ( 1997)
	- Diploma: Operation & Maintenance of Fire automotive modelTLF,NT,BAV,ACV,MSRT,HazMat,RIV1200,GV Rosenbauer. Germany (1998)
	- Skills Competition for Fighter , Singapore Civil Defence Force., Singapore (2001)
	- Incident Commander and Incident Command System for Hazardous Materials Incidents ,EPA USA ( 2004 )
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	Structural Fire & Hazmat Manager
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทเอ็นพีซีเซฟตี้
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-