



เทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรนความเร็วสูง  
 โดยใช้หลอดแฟลช  
 Fast Schlieren Photography Technique  
 Using Flashlamp

นิพนธ์ธรรม สถาพร  
 Nipittam Sathaporn

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 Master of Science Thesis in Physics  
 Prince of Songkla University  
 2538

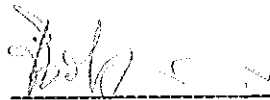
(1)

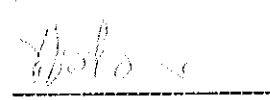
เลขหมู่	TR 219 463 0528 0 2
Bib Key	69653


ชื่อวิทยานิพนธ์                      เทคนิคการถ่ายภาพแบบซไโรเรนความเร็วสูงโดยใช้หลอดแฟลช  
ผู้เขียน                                      นายนิพัทธ์ธรรม สถาพร  
สาขาวิชา                                      ฟิสิกส์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

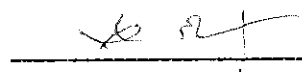
คณะกรรมการสอบ


  
ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไพบย)

  
ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไพบย)


  
กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา)

  
กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา)

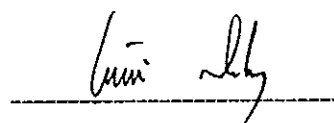
  
กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วณิชชาชาติ)

  
กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วณิชชาชาติ)

  
กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัช ชิตตระการ)

  
กรรมการ  
(ดร.ประการ ครูหงษา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

  
(ดร.ไพรัตน์ สงวนไทร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์    เทคนิคการถ่ายภาพแบบซไโรเรนความเร็วสูงโดยใช้หลอดแฟลช  
ผู้เขียน            นายนิพัทธ์ธรรม สถาพร  
สาขาวิชา          ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา        2537

### บทคัดย่อ

การศึกษาและถ่ายภาพปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหตามเวลา เช่น การไหลของก๊าซที่มีความดันสูง , การไหลของก๊าซร้อนหรือก๊าซร้อนที่ออกมาจากเปลวต่างๆ , ปรากฏการณ์ทางพลาสมาและปรากฏการณ์ฟองสบู่เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถจะศึกษาหรือถ่ายภาพได้ด้วยวิธีการทั่วๆ ไปได้ ดังนั้นจะต้องใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบพิเศษที่มีความไวสูง เพื่อช่วยในการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆของปรากฏการณ์ โดยทั่วไปเทคนิคที่นำมาใช้มักจะมียุ่งยากและลงทุนสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองใช้เทคนิคการถ่ายภาพที่เรียกว่า ซไโรเรน ซึ่งเป็นเทคนิคการถ่ายภาพวัตถุที่มีดัชนีหักเหเปลี่ยนไปตามเวลา เป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการติดตั้งและมีวิธีการศึกษาที่ง่ายกว่า โดยได้ผลใกล้เคียงหรือดีกว่าบางวิธี เพราะฉะนั้นจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาปรากฏการณ์เหล่านี้

จากการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของก๊าซที่ค่าความดันต่างๆกัน โดยใช้หลอดแฟลชที่มีค่าพัลส์แสงยาวประมาณ 20 ไมโครวินาที และมีความเข้มสูงเป็นแหล่งกำเนิดแสงจึงทำให้ได้การถ่ายภาพแบบซไโรเรนความเร็วสูง พบว่าเทคนิคนี้สามารถถ่ายภาพปรากฏการณ์ดังกล่าวและให้ผลออกมาอย่างชัดเจน จากผลการคำนวณค่าความเร็วของก๊าซ โดยใช้สมการเบอร์นูลลี พบว่าค่าความดันของก๊าซจะแปรผันตรงกับค่าความเร็วของก๊าซและอัตราการไหลของก๊าซ โดยที่เมื่อก๊าซมีค่าความเร็วเพิ่มขึ้นรูปแบบการอัดตัวและลักษณะการไหลของก๊าซจะเปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบเดิม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปถ่ายที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจะทำให้เราสามารถเห็นรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างชัดเจนและมีความสัมพันธ์กับผลการคำนวณที่ได้ นอกจากนี้ยังได้นำเทคนิคดังกล่าวถ่ายภาพปรากฏการณ์อื่นๆ เช่น ปรากฏการณ์ฟองสบู่ , เปลวพลาสมาเจ็ต , การอาร์คของหัวเทียน , การไหลของ

ก๊าซร้อน ได้อย่างเป็นผลสำเร็จและคาดว่าจะประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาด้านนี้ต่อไป  
ดังนั้นจึงเป็นการสมเหตุสมผลที่จะนำเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโร  
เรนาศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ โดยเฉพาะการไหลของก๊าซ และปรากฏการณ์อื่นๆ  
ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประโยชน์ในการนำผลที่ได้ไปประยุกต์ทางอุตสาหกรรม  
ต่อไป ( ภาพของผลการทดลองที่อยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จากการถ่ายซ้ำจาก  
ภาพโพลาไรออยด์ที่ได้จากผลการทดลอง )

Thesis Title      Fast Schlieren Photography Technique Using Flashlamp  
Author             Mr. Nipittam Sathaporn  
Major Program    Physics  
Academic Year    1994

### Abstract

Transient phenomena with change in refractive index such as high pressure gas flow , hot air flow , hot from flame , plasma phenomena and soap bubble can not be recorded by ordinary photography. Therefore a special photography with high sensitivity to change in refractive index is needed. Some technique are compleated or of high cost , thus a Schlieren photography is chosen. This technique is sensitive to charge in refractive index gradient , it is easy to install and yielding reasonable result.

On studying gas flow at different pressure using flashlamp of light pulse duration  $\sim 20 \mu\text{sec}$  and high intensity. The schlieren system is fast and is able to record various phenomena. By using Bernullie equation to calculate to gas flow , it is founded that the pressure varies directly with gas velocity and flow. As gas velocity increas , the gas compression and flow structure change in agreement with theory. Other phenomena recorded successfullly are soap bubble , plasma let , hot air etc. The technique to developed expected to be valuable to industrial use.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความสามารถจาก คณาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขต้นฉบับอย่างละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาว์ชนาโนย ผู้ได้มอบความเมตตากรุณา พร้อมกับให้คำสั่งสอนแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างมากและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า Dr. K.H. Kwek ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธนา ภิระวณิชกุล ผู้ซึ่งได้ชี้แนะแนวทางในการทดลองแก่ข้าพเจ้า อาจารย์ณรงค์ สุวรรณมณี ผู้ซึ่งได้แนะนำทางด้านไฟฟ้ากำลัง นายช่างวีระ ไทยสยามและพี่ห่อง work shop ที่ให้ความช่วยเหลือมาตลอด ซึ่งข้าพเจ้าขอโน้มขอบพระคุณคณาจารย์และท่านทั้งหลายไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้แล้วข้าพเจ้าขอโน้มกราบรำลึกถึงพระคุณของคุณพ่อและคุณแม่พร้อมทั้งญาติพี่น้องในครอบครัว ' สภาพร ' ทุกคน สุดท้ายที่จะลืมเสียไม่ได้ คือ เพื่อนๆและน้องๆที่น่ารักในภาควิชา ฟิสิกส์ ทุกคน

นิพัทธ์ธรรม    สภาพร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	( 3 )
Abstract .....	( 5 )
กิตติกรรมประกาศ .....	( 6 )
สารบัญ .....	( 7 )
รายการภาพประกอบ .....	( 8 )
บทที่	
1 บทนำ .....	1
บทนำต้นเรื่อง .....	1
วัตถุประสงค์ .....	3
2 ทฤษฎีและหลักการในการวิจัย .....	4
- ทฤษฎีและหลักการทั่วไปของเทคนิคการถ่ายภาพ	
แบบซไโรเรน .....	4
- ทฤษฎีและหลักการที่ใช้สำหรับศึกษาการไหลของก๊าซ	6
3 วิธีการวิจัย .....	10
- วัตถุประสงค์ .....	10
- อุปกรณ์ .....	11
- วิธีดำเนินการ .....	23
- หลักการและการออกแบบ สร้างหลอดฟลูออโรที่	
สามารถทริกเกอร์หรือควบคุมได้ .....	24
- คุณสมบัติและหลักการของเทคนิคการ	
ถ่ายภาพแบบซไโรเรน .....	35
4 ผลและการอภิปรายผล .....	51
5 บทสรุป .....	69
- วิเคราะห์ .....	69
- สรุป .....	75
- ข้อเสนอแนะ .....	77
บรรณานุกรม .....	78
ภาคผนวก .....	80
ประวัติผู้เขียน .....	83

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนโดยใช้กระจก 2 อัน ที่ใช้ในสถาบันวิจัย Cornell Aeronautical ประเทศสหรัฐอเมริกา	2
2 ภาพปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ถ่ายโดยเทคนิคซโรเรน ของสถาบันวิจัย Erust - Mach ประเทศเยอรมันนี	2
3 แสดงเทคนิคพื้นฐานของซโรเรนที่เรียกว่า ทูปเลอร์ซโรเรน	4
4 แสดงลักษณะการไหลของก๊าซและแรงที่กระทำต่อหัวฉีด	7
5 แสดงฟิล์มไพลาจรอยด์ที่ใช้ในงานวิจัย	10
6 ลักษณะของกระจกซโรเรนที่ใช้ในการวิจัยซึ่งมีขนาดโฟกัสเท่ากับ 45 นิ้ว	12
7 ลักษณะของคมมีดที่ดัดแปลงขึ้นใช้ในการทดลอง	12
8 ลักษณะของตลับฟิล์มที่ใช้ในการวิจัย	13
9 ลักษณะของกล่องใส่ตลับฟิล์มพร้อมท่อนำแสงที่ได้ทำขึ้นมา	13
10 ลักษณะของหอแสง ( Light Tower )	14
11 อุปกรณ์ควบคุมระยะใกล้ พัลส์แรงต่ำ	16
12 อุปกรณ์ควบคุมพัลส์แรงดันสูง	16
13 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับค่ากระแสไฟฟ้าแรงสูงที่เรียกว่า คอยล์โรโกวสกี ( Rogowski coil )	17
14 เครื่องมือวัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง	17
15 แสดงออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการวิจัย	18
16 แสดงเครื่องมือวัดแสง บีพีเอกซ์ 65	19
17 ลักษณะของ พีเอเค 45 ( PAK - 45 )	20
18 ลักษณะของส่วนควบคุมและตำแหน่งต่างๆ	20
19 ลักษณะหัวปืนเจ็ตพลาสมา	21
20 ภาพของหัวฉีดก๊าซขนาดเล็กที่ได้ทำขึ้นเพื่อต่อกับหัวเจ็ตพลาสมา	22
21 ภาพถ่ายหัวพ่นก๊าซ	22



22	หัวของปืนพ่นก๊าซที่ถอดออกมา	23
23	แสดงวงจร LCR ที่ต่ออนุกรมกับช่องว่างประกาย ( Spark gap )	25
24	แสดงรูปหลอดแฟลชที่สร้างขึ้นใช้ในการวิจัย	26
25	แสดงภาพถ่ายหลอดแฟลชที่ใช้ในการวิจัย	27
26	แสดงวงจร LCR ที่ต่ออนุกรมกับทริกเกอร์ ( Trigger sparkgap ) ของหลอดแฟลช และตำแหน่งที่ใช้วัดศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า	28
27	แสดงภาพถ่ายหลอดแฟลชพร้อมวงจร LCR	29
28	แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบของวงจร	30
29	ภาพส่วนประกอบตัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูงและคอยล์วัดกระแสไฟฟ้า	31
30	ลักษณะสัญญาณกระแสของวงจร LC ที่ถูกวัดโดยคอยล์วัดกระแส ( ตัวเก็บประจุขนาด 0.5 ไมโครฟารัด , ศักย์ขั้วประจุ 10 กิโลโวลต์ ค่าความต้านทาน 0 โอห์ม )	32
31	การวัดค่า คาบ และ ความถี่ ของสัญญาณ	33
32	ภาพสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าวงจร LC	34
33	แสดงชนิดของเทคนิคไซโรเรนที่ใช้กระจกโค้งอันเดียว	36
34	แสดงชนิดของเทคนิคไซโรเรนที่ใช้กระจกโค้งสองอัน	37
35	ลักษณะทัศนศาสตร์เมื่อวางแหล่งกำเนิดแสงในตำแหน่งโฟกัส	38
36	การทดสอบโดยใช้หอแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสง	39
37	แสดงการวางตำแหน่งของกระจกทั้งสองพร้อมกับคมมีด	40
38	แสดงการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ในการหาโฟกัสของวัตถุ	41
39	ด้านหน้าของท่อกำบังแสงและตำแหน่งของคมมีด	42
40	การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆของระบบทัศนศาสตร์	43
41	ภาพถ่ายของอุปกรณ์ต่างๆที่ได้จัดตำแหน่งไว้บนโต๊ะที่สร้างขึ้นสำหรับ งานวิจัยนี้	43
42	ภาพของหัวเจ็ดพลาสติกมาเมื่อเทียบกับหัวฉีดก๊าซที่ทำขึ้น	46
43	ลักษณะของท่อพลาสติกที่กรวยแหลมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่อง ปล่อยลมประมาณ 0.08 เซนติเมตร	47
44	ภาพของที่เปิดปิดที่ทำหน้าที่เป็นชัตเตอร์ที่ได้ประกอบขึ้น	49
45	การต่อหัวเทียนรถยนต์เข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง	50

46	แสดงสัญญาณกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้	52
47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้าของหลอดแฟลช	54
48	แสดงสัญญาณแล่งและกระแสที่ได้จากหลอดแฟลช	55
49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแสงของหลอดแฟลช	56
50	ภาพของหัวฉีดเครื่องปั๊มลมที่วางเป็นวัตถุเพื่อทดสอบความเปรียบต่างระหว่างแสงจากหลอดแฟลชกับวัตถุที่ตกกระทบบนฟิล์ม	58
51	ภาพของลมที่มีอุณหภูมิสูง ( ประมาณ 500 องศาเซลเซียส ) ที่พุ่งออกจากเครื่องพ่นลมเพื่อดูประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายภาพโรเรน	58
52	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกจากหัวเจ็ทพลาสมาที่ต่อหัวส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	59
53	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกจากหัวเจ็ทพลาสมาที่ต่อหัวส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	60
54	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกจากหัวเจ็ทพลาสมาที่ต่อหัวส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	60
55	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกจากหัวเจ็ทพลาสมาที่ต่อหัวส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	61
56	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซอาร์กอนที่พุ่งออกจากหัวเจ็ทพลาสมาแบบปกติ ( ค่าความดันประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	61
57	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวท่อปั๊มลมแรงดันสูง ( ค่าความดันประมาณ 7.8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	62
58	ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากท่อพลาสติกกกรวยแหลม ( ค่าความดันประมาณ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	63
59	ภาพถ่ายการแหวกตัวของก๊าซเมื่อผ่านวัตถุปลายแหลม ( ค่าความดันประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	64
60	ภาพถ่ายฟองสบู่แบบทรงกลม	65
61	ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มฟองสบู่ที่กำลังเริ่มจะสลายตัวลงด้านล่างระยะที่ 1	65
62	ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มฟองสบู่ที่กำลังเริ่มจะสลายตัวลงด้านล่างระยะที่ 2	66
63	ภาพถ่ายเปลวเจ็ทพลาสมาที่ความดัน 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กระแสประมาณ 50 แอมแปร์	67

64	ภาพถ่ายการอาร์คของหัวเทียนรถยนต์	68
65	รูปลักษณะขนาดของหัวฉีดเครื่องปั๊มลมความดันสูงและหัวฉีดที่ต่อกับหัวเจ็ทพลาสมา	70
66	ลักษณะการเกิดการอัดตัวของก๊าซเมื่อความดันภายในมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ	71
67	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซกับค่าความเร็วก๊าซที่ออกจากหัวฉีด	76
68	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซกับค่าอัตราการไหลของก๊าซ	76
69	วงจรไบแอสของไดโอดวัดแสง ( BPX - 65 PIN diode biasing circuit )	81
70	ภาพถ่ายที่เกิดจากการจัดระบบขั้วโรเนนชนิดวิธี	82
71	ภาพของวัตถุที่มีความเข้มของแสงสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงเมื่อถ่ายโดยใช้เทคนิคขั้วโรเนน	83

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ปรากฏการณ์ในทางฟิสิกส์หลายอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห ( refractive index ) ตามเวลาที่ไม่สามารถจะถูกบันทึกได้โดยวิธีการถ่ายภาพทั่วไปได้ หรือแม้แต่จะมองเหตุการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นด้วยตาเปล่า เนื่องจากว่าปรากฏการณ์เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว เช่น การไหลของก๊าซที่มีความดันสูง , การไหลของก๊าซร้อนหรือไอความร้อนที่พุ่งออกมาจากเปลวต่าง ๆ , การแหวกตัวของก๊าซเมื่อมีวัตถุมาขวางทิศของการไหล เป็นต้น ซึ่งอาจมีบางปรากฏการณ์ที่เรามองเห็นด้วยตาเปล่าเพียงแค่ว่าภาพเท่านั้นแต่โครงสร้างและรายละเอียดไม่อาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือการถ่ายภาพแบบปกติ เช่น ปรากฏการณ์ฟองสบู่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและคิดค้นระบบการถ่ายภาพในรูปแบบวิธีต่างๆเพื่อที่จะนำมาศึกษาปรากฏการณ์เหล่านี้ ซึ่งวิธีหลักๆที่ได้นำมาใช้ มีอยู่ 3 วิธี คือ 1. การถ่ายภาพแบบเงา 2. การถ่ายภาพแบบชไรเรน 3. การถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรี ( Interferometry ) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปแต่วิธีที่มีการนำมาใช้มากและแพร่หลาย คือ เทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรน ( Schlieren photography ) เพราะง่ายต่อการติดตั้งและเทคนิคไม่ยุ่งยากเหมือนกับเทคนิค Interferometry และความไวดีกว่าเทคนิคการถ่ายภาพแบบเงา ( Shadow photography ) ดังที่ สถาบันวิจัย Cornell Aeronautical Lab ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพชไรเรนในการศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ

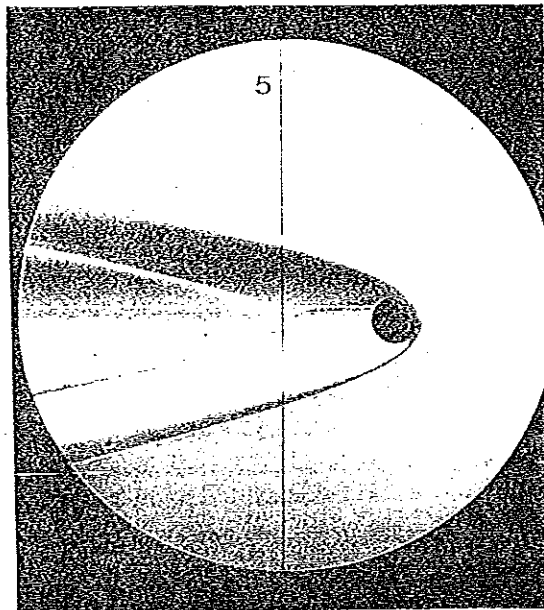
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้จะเห็นว่าเทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรนเป็นเทคนิคการถ่ายภาพวัตถุหรือปรากฏการณ์ที่มีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคนี้มาศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและการที่จะถ่ายภาพปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนแปลงโดยเร็วนั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเร็วสูงในระดับไมโครวินาที

ภาพประกอบ 1 เทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรนโดยใช้กระจก 2 อัน (Two-mirror schlieren) ที่ใช้ในสถาบันวิจัย Cornell Aeronautical



( ที่มา : Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren photography. ,  
U.S.A. )

ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างภาพปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ถ่ายโดยเทคนิคชไรเรน  
ของ สถาบันวิจัย Erust - Mach ประเทศเยอรมันนี



( ที่มา : หนังสือ Flow Visualization. New York : Acamic Press )

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบการถ่ายภาพแบบซโรเรนที่มีความไวสูงซึ่งใช้ในการถ่ายภาพของปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์รูปแบบต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและปรากฏการณ์ฟองสบู่
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบหลอดแฟลชเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการถ่ายภาพแบบซโรเรนความไวสูง
3. เพื่อศึกษาลักษณะทางพลศาสตร์ของก๊าซ เมื่อไหลผ่านวัตถุและก๊าซที่ไหลได้อย่างอิสระในสภาวะก๊าซปกติและก๊าซร้อน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของทฤษฎีและหลักการทั่วไปที่ใช้ในงานวิจัย โดยแบ่งเป็นตอนๆ ดังนี้

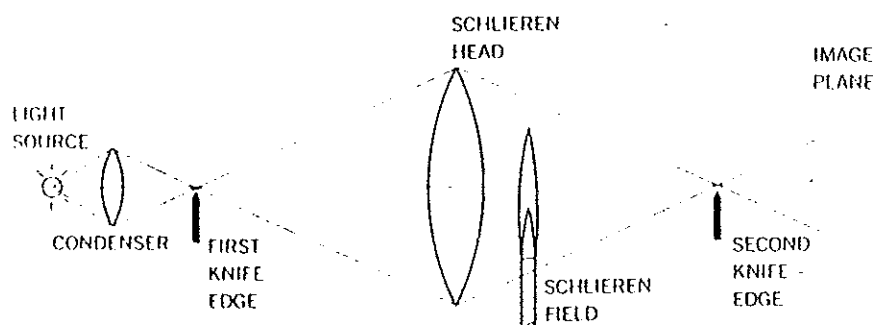
ตอนที่ 1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไปของเทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรน

ตอนที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้สำหรับศึกษาการไหลของก๊าซ

#### ตอนที่ 1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไปของเทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรน

เทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรนเป็นวิธีทางทัศนศาสตร์อีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้สำหรับศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเหของวัตถุนั้น

ภาพประกอบ 3 แสดงเทคนิคพื้นฐานของชไรเรนที่เรียกว่า ชุดเลอริชไรเรน



( ที่มา : Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren Photography, .  
U.S.A. )

ซึ่งวัตถุนั้นจะต้องไปรังแสง โดยหลักการทั่วไปและ ทฤษฎีนั้นจะถูกอธิบายโดยนาย Toepler , A. และได้ถูกเผยแพร่และนำไปใช้อย่าง กว้างขวางโดย Schardin , H. เทคนิคนี้จะขึ้นอยู่กับการหักเหของแสง โดยเกรเดียนท์ ( Gradient ) ของดัชนีหักเห ของวัตถุที่ลำแสงนั้นผ่านจากภาพแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ต้องขนาดเล็ก ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด (Point light source ) โดยที่จะถูกวางไว้ที่ตำแหน่งโฟกัสของเลนส์ อันที่ 1 ( L1 ) ดังนั้นตามหลักของทัศนศาสตร์จะทำให้เกิดเป็นลำแสงขนาน ผ่านส่วนทดสอบหรือ สนามชโรเรน ( Schlieren field ) ( ซึ่งเป็นตำแหน่งของปรากฏการณ์ที่ต้องการที่จะ ถ่ายภาพ ) ไปยังเลนส์อันที่ 2 ( L2 ) โดยที่เลนส์อันที่ 2 นี้จะทำหน้าที่รวมแสงที่ ตำแหน่งโฟกัสแล้วลำแสงจะผ่านไปยังเลนส์ของ กล้องถ่ายรูป และภาพก็จะปรากฏบนฟิล์มของกล้องถ่ายรูปที่ตำแหน่งโฟกัสของกล้องอันที่ 2 นั้นจะมีคมมีด ( Knife edge ) เพื่อเป็นอุปกรณ์ในการช่วยตัดความเปรี้ยวของภาพ และช่วยลดความ เข้มแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยทำให้ภาพที่ปรากฏขึ้นบนฟิล์มเกิดความคมชัดยิ่งขึ้นนั่นหมายความว่า ลำแสงที่ผ่านส่วนทดลองจะถูกเบี่ยงเบนโดยไม่เป็น เอกพันธ์ ( Inhomogeneous ) กับค่าดัชนีหักเห ภาพที่ปรากฏบนฉากจะมีดีกว่าหรือสว่างกว่าแสงส่วนอื่นขึ้นอยู่กับทิศทางของการเบี่ยงเบน ( Deviation ) และสัมพัทธ์ ( Relative ) ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่อยู่บนฉาก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบเชิงมุมของการเบี่ยงเบน ในส่วนความสัมพันธ์ของความเข้มแสง โดยแสดงได้ดัง สมการ

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\mathcal{E} \times f}{\Delta x} \frac{\Delta I}{I} = \frac{\mathcal{E} \times f}{\Delta x} \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่  $I$  = ความเข้มแสงที่ตกบนฉาก

$\mathcal{E}$  = ผลรวมของค่าเบี่ยงเบนเชิงมุม

$f$  = ความยาวโฟกัสของเลนส์อันที่ 2

$\Delta x$  = ขนาดความกว้างของภาพในแนวแกนอนที่ไมถูกบดบัง

และผลรวมค่าเบี่ยงเบนในแนวแกน  $x$  จะมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบเกรเดียนท์ของดัชนีหักเหในแนวแกน  $x$  ดังสมการ



$$\mathcal{E}_x = \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} \ln n(x,y,z) dz \dots\dots\dots(2)$$

$$\mathcal{E}_x = \int_0^L \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่  $n$  เป็นค่าดัชนีหักเหและอินทิเกรตตามความยาวของปรากฏการณ์  
ในแนวแกน  $z$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเทคนิคนี้จะเหมาะสมกับปรากฏการณ์  
ทางฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ( First derivative )  
ของดัชนีหักเหและพบว่ามุมที่เบี่ยงเบนไปนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าของดัชนีหักเหด้วยเช่นกัน  
ดังสมการ

$$\theta = \frac{d}{dy} \int N dl ; N \text{ คือค่าดัชนีหักเห } \dots\dots\dots(4)$$

ถึงอย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้จะเหมาะสมกับปรากฏการณ์ที่มีค่าดัชนีหักเหภายในที่  
แตกต่างกับดัชนีหักเหภายนอกมาก ๆ

## ตอนที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้สำหรับศึกษาการไหลของก๊าซ

เพื่อที่จะได้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย  
เทคนิคไหนตรงกับค่าความเร็วก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาว่ามีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน  
หรือไม่ โดยการนำค่าต่างๆของการทดลองมาคำนวณหาความเร็วของก๊าซหลังจาก  
ที่ออกมาจากหัวฉีดในที่นี้ได้ใช้สมการพลังงานของ แบร์นูลลี ( Bernoulli equation )  
ในการคำนวณหาความเร็วก๊าซ ซึ่งมีสมการมีดังนี้

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \dots\dots\dots(5)$$

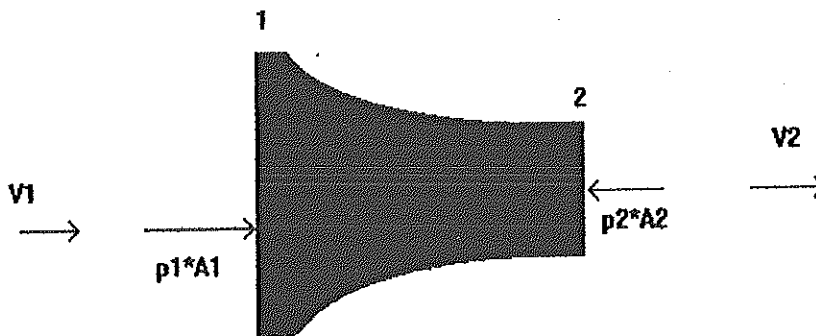
โดยที่  $p$  คือ ความดันก๊าซ หน่วย นิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

( $kg/m^3$ )

$v$  คือ ความเร็วของก๊าซ หน่วย เมตรต่อวินาที ( $m/s$ )

ภาพประกอบ 4 รูปแสดงลักษณะของการไหลของก๊าซและแรงที่กระทำต่อหัวฉีด



จากรูปถ้าให้เส้นระดับอ้างอิงผ่านเส้นแกนกลาง ( $Z_1 = Z_2 = 0$ ) และค่า  $p_2$  เป็น ศูนย์  
ดังนั้นจากสมการ 5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} \dots\dots\dots(6)$$

จากสมการที่ 6 ถ้าของไหลในท่อมีความต่อเนื่อง สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเร็วของสองตำแหน่งใด ๆ ได้จากสมการสภาพต่อเนื่องดังนี้

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\left[ \frac{\pi d_1^2}{4} \right] V_1 = \left[ \frac{\pi d_2^2}{4} \right] V_2 \dots\dots\dots (8)$$

$$V_1 = \left[ \frac{d_2}{d_1} \right]^2 V_2 \dots\dots\dots (9)$$

โดยที่  $V_1$  คือ ความเร็วของก๊าซที่ตำแหน่งแรก หน่วย เมตรต่อวินาที

$V_2$  คือ ความเร็วของก๊าซที่ตำแหน่งสอง หน่วย เมตรต่อวินาที

$d$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด หน่วย เมตร

ดังนั้นสมมติว่าแรงที่กระทำกับหัวฉีด ( $F = PA$ ) ณ ตำแหน่งใดๆมีค่าเท่ากัน  
 ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดน้อยมากและตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง  
 คือ ค่าเรโนลด์ (Renold number,  $R_e$ ) ได้ดังสมการ

$$R_e = \frac{U_d}{\nu} \dots\dots\dots (10)$$

เมื่อค่าเรโนลด์ต่ำกว่า  $10^5$  ก๊าซจะเคลื่อนที่แบบราบเรียบ (Laminar flow)  
 ถ้าค่าเรโนลด์มากกว่า  $10^5$  ก๊าซจะเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulent flow)  
 จากสมการที่ 9 เมื่อนำค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่แสดงดังรูปที่ 65  
 มาแทนค่าในสมการแล้วจะได้สมการดังนี้

$$v_1 = \frac{v_2}{4} \dots\dots\dots (11)$$

$$V_1 = 0.3402 * V_2 \dots\dots\dots (12)$$

โดยที่  $v_1$  คือ ความเร็วของก๊าซก่อนออกจากหัวฉีดปั๊มลมแรงดันสูง  
 $v_2$  คือ ความเร็วของก๊าซหลังออกจากหัวฉีดปั๊มลมแรงดันสูง  
 $V_1$  คือ ความเร็วของก๊าซก่อนออกจากหัวฉีดที่ต่อกับหัวเจ็ต  
 พลาสมา  
 $V_2$  คือ ความเร็วของก๊าซหลังออกจากหัวฉีดที่ต่อกับหัวเจ็ต  
 พลาสมา

นอกจากการหาค่าความเร็วแล้วนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาค่าอัตราการไหลในสภาพต่อเนื่องของก๊าซได้โดยใช้สมการ

$$Q = V * A \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของก๊าซ หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที  
 (  $m^3/sec$  )  
 $V$  คือ ความเร็วก๊าซ หน่วย เมตรต่อวินาที  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ หน่วย ตารางเมตร

ค่าของความเร็วสามารถหาได้จากสมการที่ 11 และ 12

### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงลักษณะของปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงรูปแบบและคุณสมบัติ ของเทคนิคที่จะนำมาใช้ดังที่กล่าวมาแล้วในบทนำต้นเรื่อง ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยดัง แสดงในรายการต่อไปนี้

#### วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงได้ดังรายการต่อไปนี้ คือ

1.1 फिल्मโพลารอยด์ (Polaroid) ชนิดขาวดำ หมายเลข 667 ค่าความไวแสง 3000 แสดงได้ดังภาพที่ 3 ซึ่งมีขนาดของฟิล์ม 8.5 x 10.8 เซนติเมตร (cm) เพื่อใช้บันทึกภาพปรากฏการณ์ ที่ถ่ายโดยเทคนิคซโรเรนและสาเหตุที่ใช้ฟิล์มความไวแสงสูง เพราะว่าแสงที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการถ่ายภาพเป็นลักษณะพัลส์ (Pulse) ที่มีความไวในระดับไมโครวินาที ( $\mu\text{sec}$ )

ภาพประกอบ 5 แสดงฟิล์มโพลารอยด์ ที่ใช้ในการวิจัย



1.2 ก๊าซอาร์กอน ( Argon ) 99.997 % ใช้สำหรับเครื่องกำเนิด เจ็ตพลาสมา ( Plasma jet ) ในการกำเนิดเจ็ตพลาสมาแบบก๊าซอาร์กอน

1.3 โลหะไร้สนิม ( Stainless steel ) เพื่อใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า

## อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ แยกตามประเภทของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถแยกเป็นตอนๆได้ดังนี้

ตอนที่ 1 อุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์, อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบการถ่ายภาพแบบซีโรเรนและระบบการบันทึกภาพ

ตอนที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ,สร้างและศึกษาแหล่งกำเนิดแสง

ตอนที่ 3 อุปกรณ์สำหรับใช้เป็นวัตถุ ( Object ) เพื่อใช้ศึกษาปรากฏการณ์

ตอนที่ 1 อุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์, อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบการถ่ายภาพแบบซีโรเรนและระบบการบันทึกภาพ

1 กระจกซีโรเรน ( Schlieren mirrors ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.25 นิ้ว ความยาวโฟกัส 45 นิ้ว หมายเลข 71,014 สามารถปรับทิศทางได้ ( ยี่ห้อ EDMUND SCIENTIFIC )

2 คมมีด ( Knife edge ) เพื่อช่วยในการตัดทอนแสงที่ตำแหน่งโฟกัสของภาพช่วยให้ภาพเกิดความคมชัดขึ้น

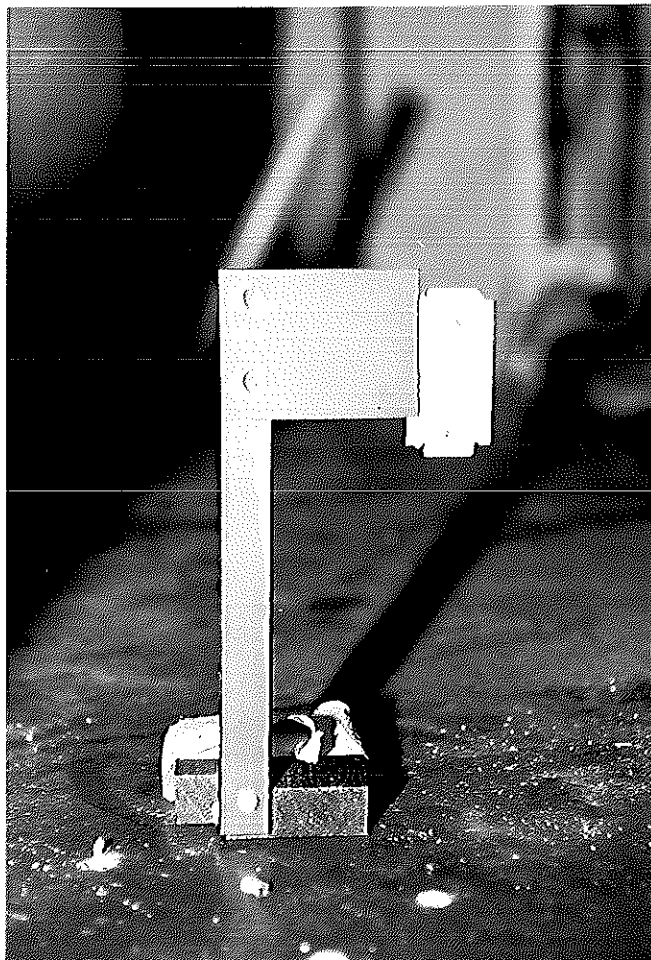
3 ตลับใส่ฟิล์มโพลาไรด์ ขนาด  $3(1/4) \times 4(1/4)$  นิ้ว (ยี่ห้อ POLAROID)

4 กล่องใส่ตลับฟิล์มพร้อมท่อกำบังแสง ซึ่งได้ทำขึ้นเอง โดยใช้พลาสติกทำเป็นที่ใส่ตลับฟิล์มและติดเข้ากับท่อกำบังแสงซึ่งทำโดยใช้แผ่นสังกะสีตัดเป็นทรงกระบอกสี่เหลี่ยม ที่มีขนาด  $10.5 \times 90 \times 11.4$  เซนติเมตร

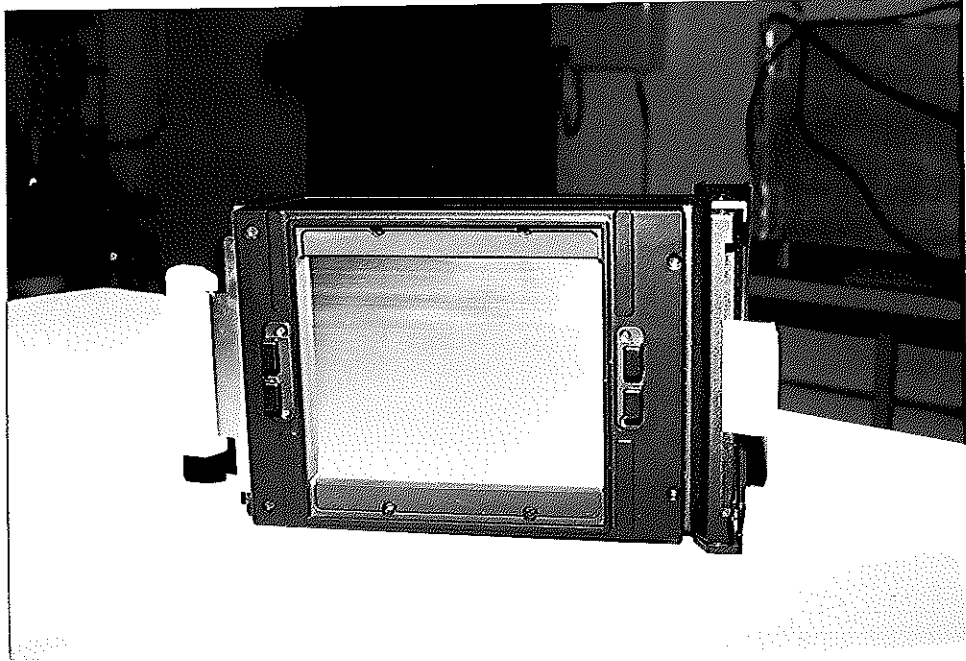
ภาพประกอบ 6 ลักษณะของกระจกไซเรนซึ่งมีขนาดไฟกัลเท่ากับ 45 นิ้ว



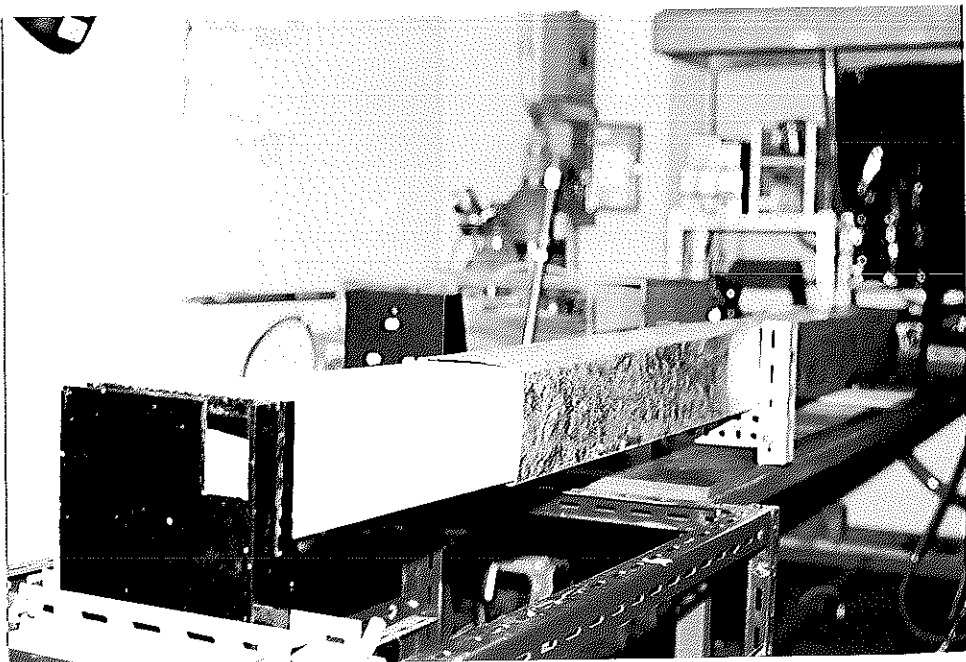
ภาพประกอบ 7 ลักษณะของคมมีด ( Knife edge ) ที่ดัดแปลงขึ้นใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะของตลับใส่ฟิล์มที่ใช้ในการวิจัย



ภาพประกอบ 9 ลักษณะของกล่องใส่ตลับฟิล์มพร้อมท่อนำแสงที่ได้ทำขึ้นมา





5 หอแสง ( Light tower ) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในระบบ ทัศนศาสตร์ เพื่อจัดวางตำแหน่งของกระจกไซเรนและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงหาจุดโฟกัสของกระจกไซเรนด้วย ( ยี่ห้อ EDMUND SCIENTIFIC )

ภาพประกอบ 10 ลักษณะของหอแสง ( Light tower )



ตอนที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ,สร้างและศึกษาแหล่งกำเนิดแสง

- 1 ตัวเก็บประจุ ( Capacitor ) ขนาด 0.5 ไมโครฟารัด (  $\mu\text{F}$  ) 30 กิโลโวลต์ ( KV ) 0.02 ไมโครเฮนรี่ (  $\mu\text{H}$  ) ชนิดพลังงานสูง ( ยี่ห้อ MAXWELL )
- 2 ตัวต้านทาน ( Resistor ) ชนิดขดลวด แบบปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 100 โอห์ม (  $\Omega$  ) เรียกว่า ตัวต้านทานแบบหน่วง ( Damping resistor )

3 คอยล์จุดระเบิดรถยนต์ ( Car ignition coil ) ขนาด 20 กิโลโวลต์ ( ยี่ห้อ YOKOGAWA )

4 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ( Transformer ) กระแสตรง ( D.C. ) สำหรับหลอดนีออนขนาด 15 กิโลโวลต์ 30 มิลลิแอมแปร์ ( mA ) ( ยี่ห้อ LASER )

5 เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนค่าได้ ( Variac ) ตั้งแต่ 0 ถึง 220 โวลต์ ( ยี่ห้อ VOLTAC ) กระแสตรง

6 สายเคเบิล ( Cable ) ไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 10 กิโลโวลต์ รหัส RG - 8 A/U ( ยี่ห้อ AMPHENOL )

7 ตัวเก็บประจุแบบไอโซเลท ( Isolate ) ขนาด 100 พิโกฟารัด ( pF ) ซึ่งทำขึ้นโดยใช้สายเคเบิล UR - 67 ยาว 1 เมตร ( m )

8 ชุดอุปกรณ์ ทริกเกอร์พัลส์ ( Pulse trigger ) เพื่อใช้สำหรับควบคุมการเกิดการอาร์คในหลอดแฟลช ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนย่อยดังนี้

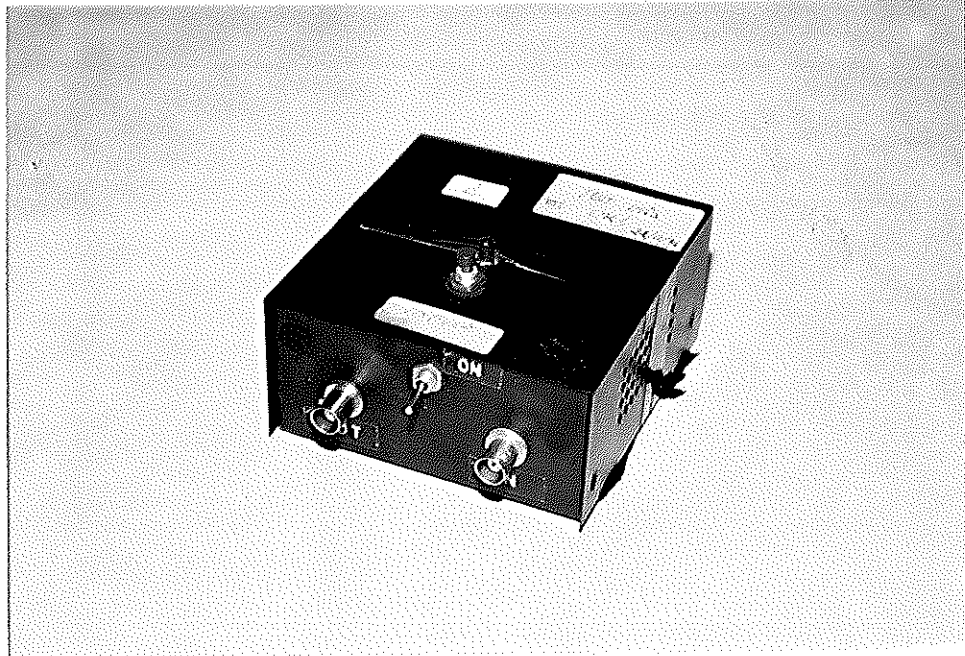
8.1 อุปกรณ์ควบคุมระยะใกล้พัลส์แรงดันต่ำที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 โวลต์ เพื่อไปกระตุ้นอุปกรณ์ควบคุมพัลส์แรงดันสูงอีกทีหนึ่ง

8.2 อุปกรณ์ควบคุมพัลส์แรงดันสูง มีค่าศักย์ไฟฟ้ากระตุ้นออกมาสูงสุด 600 โวลต์

9 คอยล์โรโกวสกี ( Rogowski coil ) เพื่อใช้วัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีค่าคงที่การเทียบมาตรฐาน ( Calibrating constant ) เท่ากับ 1.53 กิโลแอมป์ต่อโวลต์ ( kA / V ) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในส่วนของ วิธีดำเนินการวิจัย

10 ตัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ( Hight voltage probe ) ซึ่งมีค่าตัวหารความต้านทานเท่ากับ 100 : 1 ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในส่วนของ วิธีดำเนินการ วิจัย

ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์ควบคุมระยะใกล้ พัลส์แรงดันต่ำ



ภาพประกอบ 12 อุปกรณ์ควบคุมพัลส์แรงดันสูง



ภาพประกอบ 13 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าแรงสูง ที่เรียกว่า  
คอยล์โรโกวสกี ( Rogowski coil )



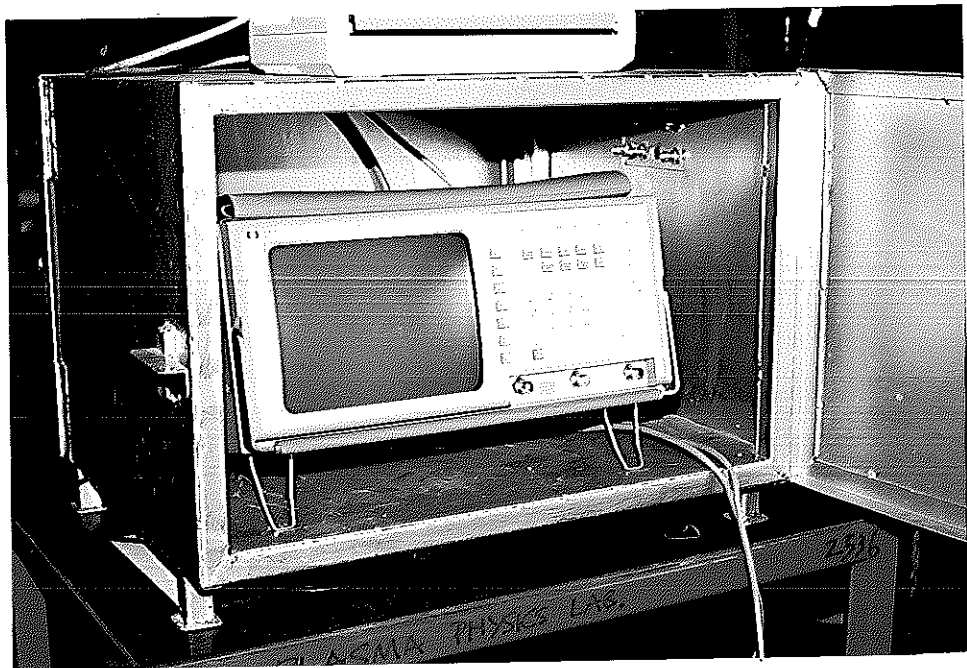
ภาพประกอบ 14 เครื่องมือวัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ( High voltage probe )



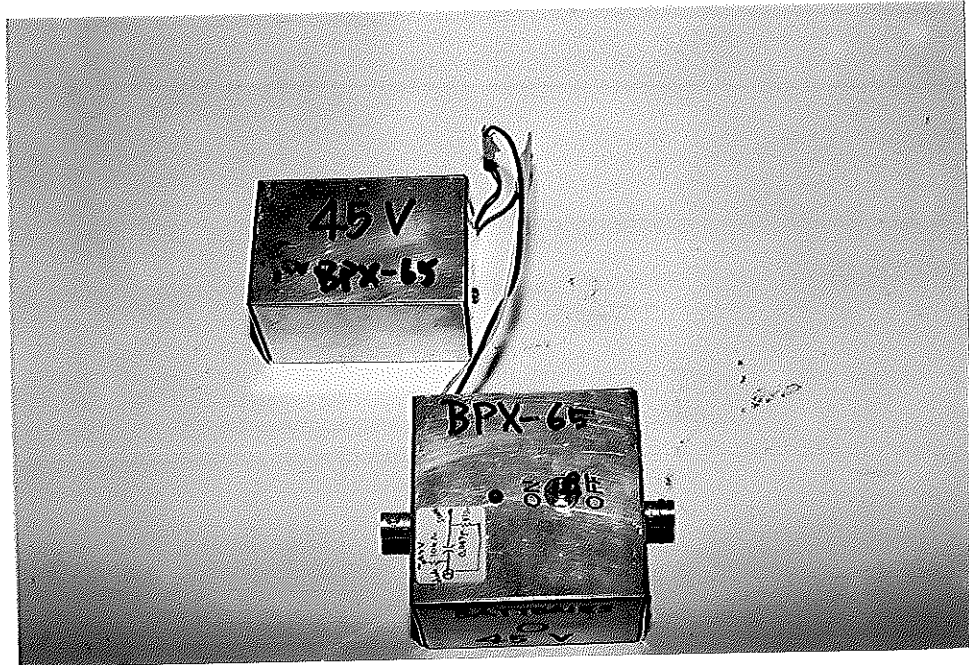
11 ออสซิลโลสโคปเชิงตัวเลข ( Digital Oscilloscope ) รุ่น HP 54502 ที่สามารถเก็บข้อมูลได้ ซึ่งสามารถแยกแยะคลื่นที่ระดับความถี่ 400 เมกกะเฮิรตซ์ ( MHz ) ความไว 250 เมกกะแอมป์เปิดต่อวินาที ( MSa / s ) ( ยี่ห้อ HEWLETT PACKARD ) เพื่อให้เก็บข้อมูลสัญญาณพัลส์ที่ส่งมาจากเครื่องมือ วัดกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

12 เครื่องตรวจวัดแสง ชนิด พินไดโอด ( PIN diode ) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า บีพีเอ็กซ์ 65 ( BPX - 65 ) ตอบสนองช่วงความกว้างคลื่นสูงสุดที่ 850 นาโนเมตร ( nm ) และความไวของช่วงเวลาประมาณ 0.5 ไมโครวินาที (  $\mu$ sec )

ภาพประกอบ 15 แสดงออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการวิจัย



ภาพประกอบ 16 แสดงเครื่องตรวจวัดแสง บีพีเอกซ์ 65 ( BPX - 65 )



ตอนที่ 3 อุปกรณ์สำหรับใช้เป็นวัตถุ ( Object ) เพื่อใช้ศึกษาปรากฏการณ์

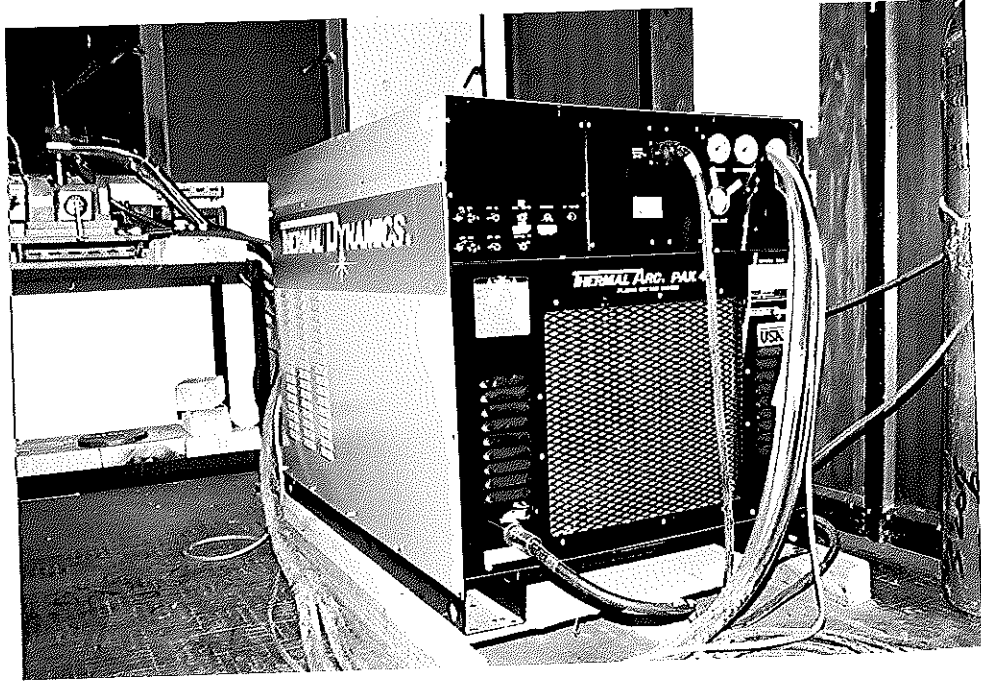
1 เครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมา โดยได้ดัดแปลงมาจากเครื่องตัดโลหะแบบ พลาสมาอาร์ค ( Arc plasma ) ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักดังนี้

1.1 เครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าและเจ็ตพลาสมารุ่นพีเอเค 45 ( PAK 45 ) ขนาดกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ( Power input ) 80 กิโลแอมป์ ( kVA ) ความถี่ 50/60 เฮิรตซ์ ( Hz ) ชนิดไฟฟ้า 3 เฟส

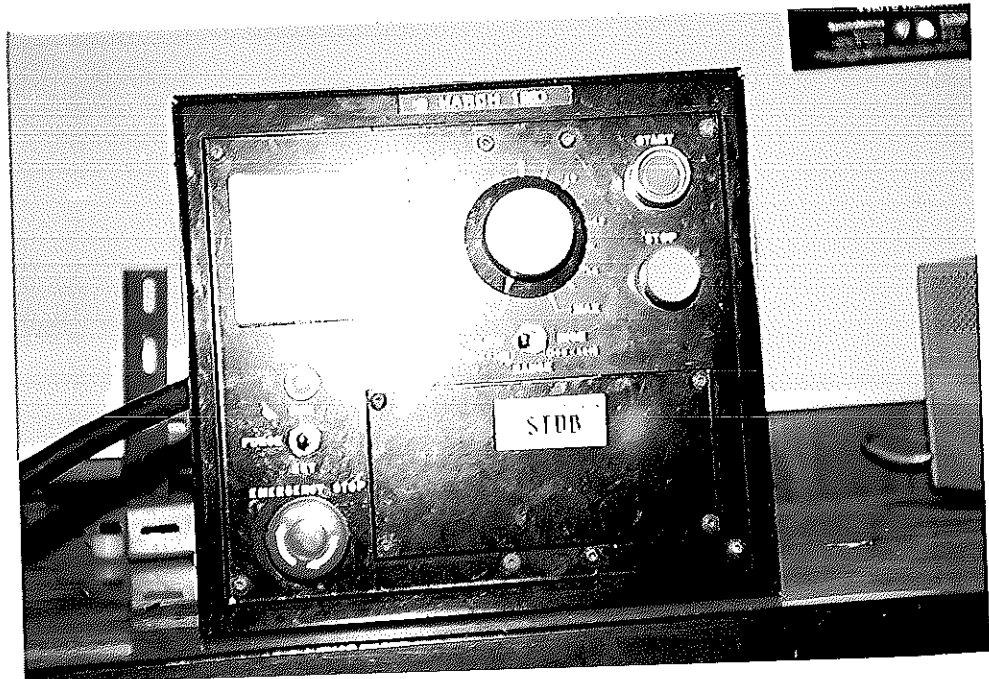
1.2 ส่วนควบคุม ( Control panel ) ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดเจ็ตได้ตั้งแต่ 0 ถึง 400 แอมแปร์ ( A )

1.3 หัวปืนเจ็ตพลาสมา ( Plasma torch ) ประกอบไปด้วยหัวไฟฟ้าบวกและลบ รวมถึงท่อหล่อเย็น ( Colling )

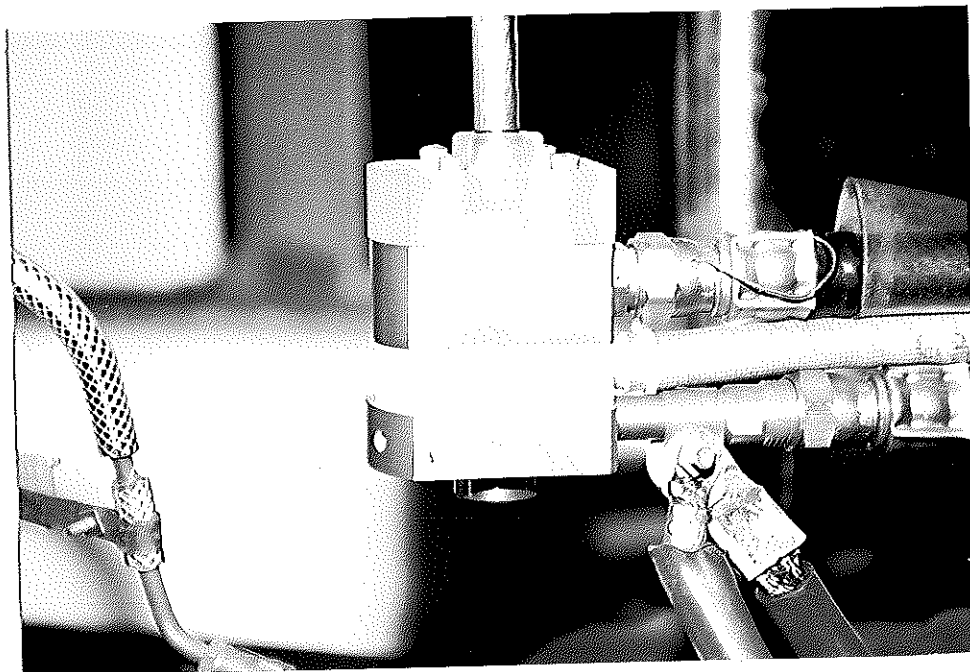
ภาพประกอบ 17 แสดงลักษณะของ พีเอเค 45 (PAK 45)



ภาพประกอบ 18 แสดงลักษณะของส่วนควบคุมและตำแหน่งต่าง ๆ



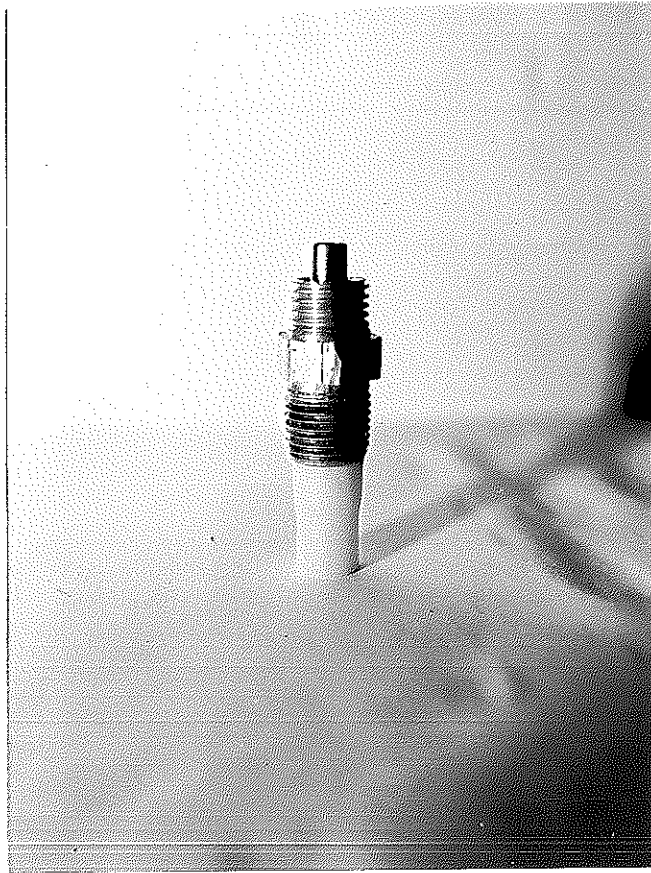
ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะหัวปืนเจ็ตพลาสมา



2. ท่อปล่อยก๊าซขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ต่อเข้ากับหัวปืนเจ็ตพลาสมา
3. ท่อพลาสติกกาวยแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านเล็กสุด เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร
4. เครื่องปั๊มลมแรงดันสูงพร้อมหัวปืน โดยสามารถปล่อยแรงดันได้สูงสุด เท่ากับ 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ) ( ยี่ห้อ CT รุ่น CS-51 )
5. น้ำยาละลายผสมเกลือโซเดียม เพื่อใช้ทำฟองสบู่สำหรับใช้เป็นวัสดุในการทดลองของระบบขโรเรน
6. หัวเทียนรถจักรยานยนต์ ( Spark plugs ) ( ยี่ห้อ NGK )



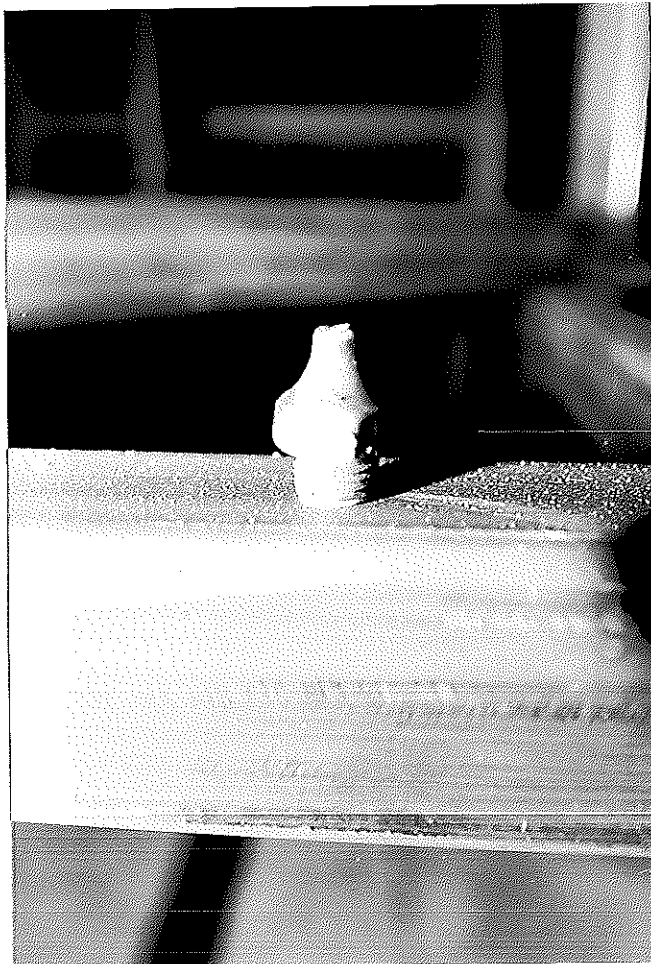
ภาพประกอบ 20 แสดงหัวฉีดก๊าซขนาดเล็กที่ได้ทำขึ้นเพื่อต่อกับหัวเจ็ดพลาสมา



ภาพประกอบ 21 รูปถ่ายหัวพ่นก๊าซ



ภาพประกอบ 22 หัวของปืนพ่นก๊าซที่ถอดออกมา



### วิธีดำเนินการ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งแยกกลุ่มการศึกษาออกเป็นตามลำดับ  
ขั้นตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาหลักการ , ออกแบบและสร้างหลอดแฟลชที่สามารถ  
ทริกเกอร์ ( trigger ) หรือควบคุมได้

ตอนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติและหลักการของ เทคนิคการถ่ายภาพแบบ  
ซไวเรน

## ตอนที่ 1 หลักการและการออกแบบ สร้างหลอดแฟลชที่สามารถทริกเกอร์หรือควบคุมได้

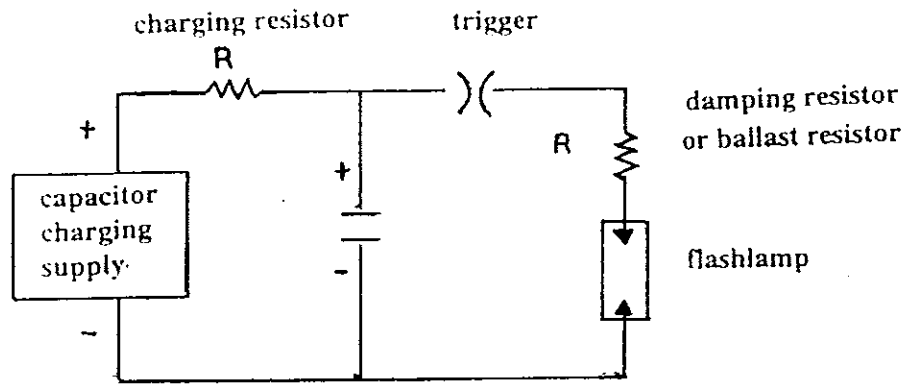
ในตอนนี้จะได้ศึกษาหลักการของหลอดแฟลช รวมไปถึงการออกแบบและสร้างหลอดแฟลชที่สามารถทริกเกอร์หรือควบคุมได้ เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบ ทัศนศาสตร์ ทั้งนี้ได้แบ่งส่วนที่ศึกษาออกเป็นดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของหลอดแฟลช
2. ศึกษาวัสดุที่ใช้และวิธีการของหลอดแฟลช
3. ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรหลอดแฟลช

### 1. ทฤษฎีและหลักการ

หลอดแฟลชเป็นรูปแบบหนึ่งของ หลอดอาร์ค ( Arc lamp ) ที่มีสัญญาณเป็นลักษณะพัลส์ที่จะสามารถให้รังสีในย่านเหนือม่วง ( Ultraviolet ) แสงที่เกิดขึ้นเกิดโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในก๊าซ โดยที่กระแสไฟฟ้าจะถูกกำเนิดจากตัวเก็บประจุที่ถูกอัดประจุ โดยทั่วไปแล้ววงจรที่ใช้สำหรับหลอดแฟลช คือ วงจรแอลซีอาร์ ( LCR circuit ) ซึ่งลักษณะพื้นฐานของวงจรประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ( Inductance ), ตัวเก็บประจุ ( Capacitor ) และตัวต้านทาน ( Resistor ) เป็นหลัก โดยที่วงจรนี้ต่ออนุกรมกับช่องว่างประกาย ( Spark gap ) ที่สามารถทำการทริกเกอร์ได้ , ตัวต้านทานแบบหน่วง , หลอดแฟลชและตัวเก็บประจุ ถ้าหากวงจรเป็นลักษณะ หน่วงวิกฤติ ( Critical damp ) จะมีค่าแฟกเตอร์ของการหน่วง ( Damping factor ) เท่ากับ 0.8 แต่ถ้าวงจรเป็นลักษณะ หน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤติ จะมีค่าแฟกเตอร์ของการ หน่วงน้อยกว่า 0.8 ซึ่งรูปแบบของหลอด แฟลชที่ใช้นั้นเป็นแบบอาร์คสั้น ( Short arc ) เนื่องจากการถ่ายภาพแบบชโรเรนนั้นจะต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแบบจุดหรือมีขนาดของแสงที่จุดกำเนิดแสงเล็กๆ แต่ต้องมีความเข้มของแสงสูง ดังนั้นหลอดแฟลชชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ เป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบ

ภาพประกอบ 23 แสดงวงจร LCR ที่ต่อแบบอนุกรมกับช่องว่างประกาย ( Spark gap )



**หลอดแฟลชแบบตัวอาร์คสั้น ( Short arc bulb flash lamp )**

หลอดแฟลชชนิดนี้อาร์คไม่ถูกจำกัดบริเวณและพลาสมา ( Plasma ) ไม่สัมผัสผนังของหลอดแก้ว โดย มีขนาดอาร์คสั้นซึ่งประมาณน้อยกว่า 1 เซนติเมตร โดยที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ความต้านทานเชิงซ้อนของอาร์ค ( Arc impedance ) มีค่าต่ำ ๆ ซึ่งค่าพัลส์น้อยกว่า 20 ไมโครวินาที การจัดวางวงจรและระบบเหมือนกับหลอดแฟลชแบบเชิงเส้น ซึ่งค่าพลังงานหาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \dots\dots\dots(14)$$

เนื่องจากค่าความต้านทานเชิงซ้อนของอาร์คต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าจึงเป็นลักษณะค่าความหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤติ ( Underdamp ) ซึ่งสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดได้จากสมการ

$$I_p = V\sqrt{C/L} \dots\dots\dots(15)$$

$$I_p = \pi VC/t_{1/3} \dots\dots\dots(16)$$

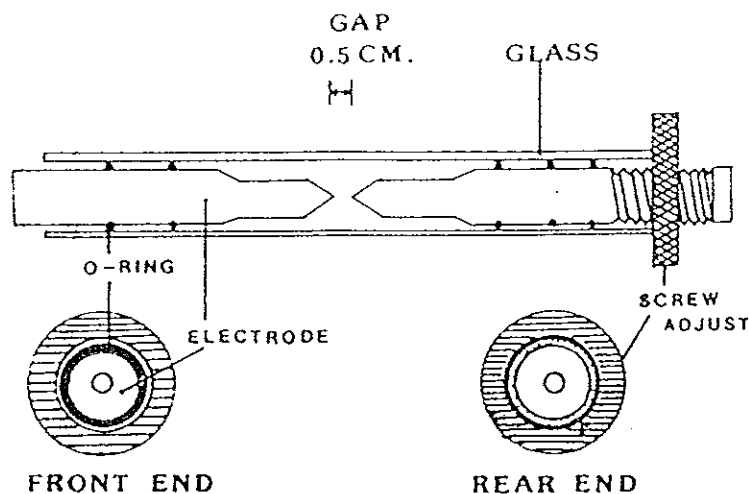
$$\text{เมื่อ } t_{1/3} = \pi\sqrt{LC}$$

ขณะที่ ค่าของกระแสเพิ่มขึ้นตามเวลา ( Current rise time )

$$\tau \approx \pi/2\sqrt{LC}$$

ค่าพัลส์ของแสงจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น พลังงานในการอัดประจุของตัวเก็บประจุ , ความยาวของอาร์ค, ชนิดของตัวเก็บประจุและก๊าซที่ใช้ เป็นต้น ซึ่งหลอดแฟลชชนิดนี้ได้นำมาเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับงานวิจัยนี้ เพราะว่า เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด , มีความเข้มแสงที่มากพอ และ วงจรเป็นแบบพัลส์

ภาพประกอบ 24 แสดงรูปหลอดแฟลชที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัย



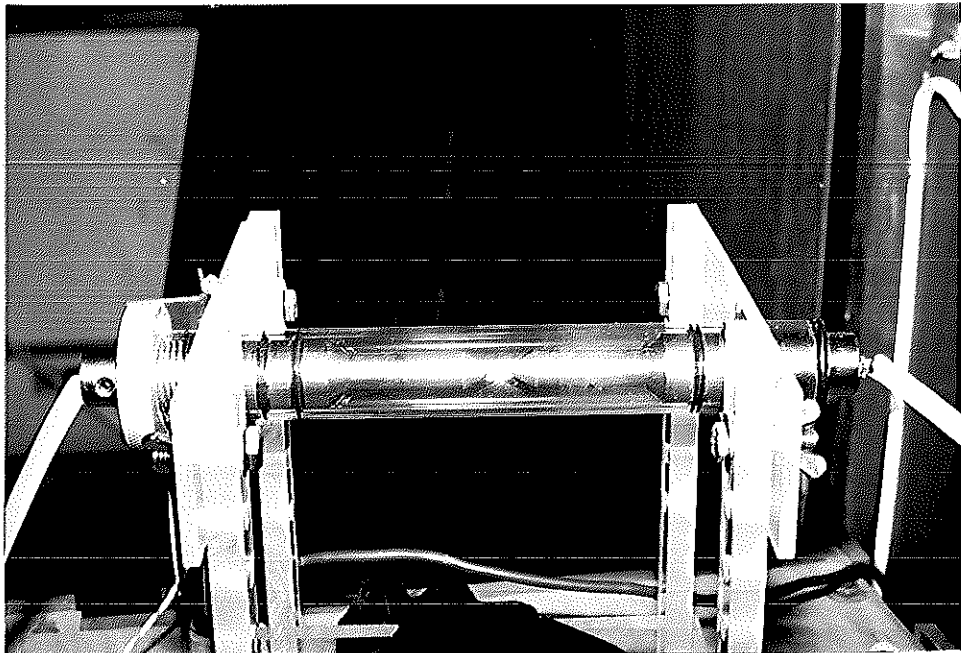
( ที่มา : Songklanakarin J. Sci. Technol. 16(1994) , 93-105. )

## 2. วัสดุและวิธีการ

### 2.1 หลอดแฟลช ( Flash lamp )

จากภาพที่ 21 นั้นจะพบว่าตัวหลอดแฟลชภายในจะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 อัน ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าทนสนิม ที่มีลักษณะเป็นรูปกรวย ทรงกระบอกปลายแหลม วางห่างกันประมาณ 0.5 เซนติเมตร โดยมีสายไฟฟ้าแรงดันสูงต่อตรงปลายสายขั้วทั้ง 2 ซึ่งปลายขั้วด้านหนึ่งสามารถปรับเลื่อนระยะห่างระหว่างขั้วได้ภายในหลอดแก้วเป็นก๊าซที่มีความดันบรรยากาศปกติแต่อาจดัดแปลงโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นใส่แทนที่ก็ได้

ภาพประกอบ 25 แสดงภาพถ่ายของหลอดแฟลชที่ใช้ในห้องวิจัย



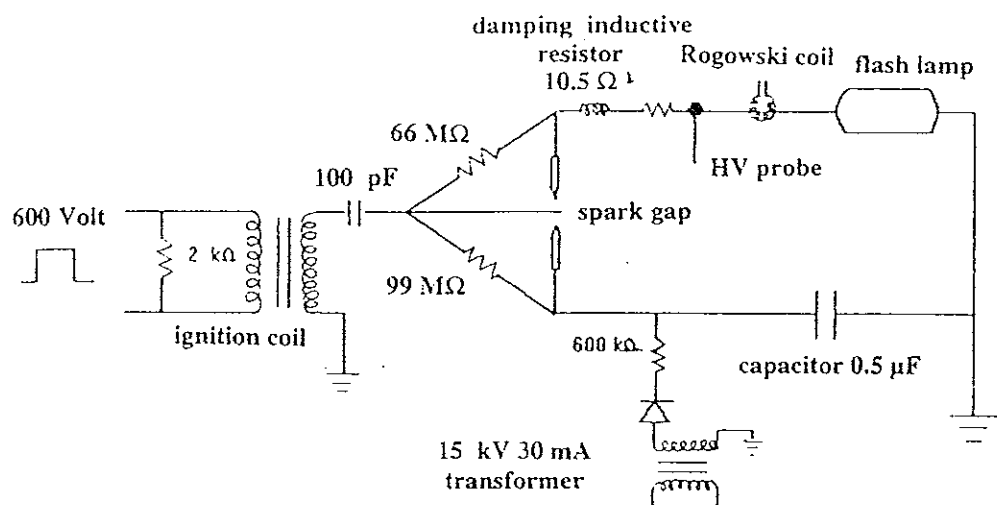
จากภาพจะเห็นว่า ขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการให้มีการระบายความร้อนด้วยตัวของมันเองและหลอดแฟลชติดตั้งกับอุปกรณ์ที่สามารถปรับสูงต่ำได้เพื่อที่จะสะดวกเมื่อใช้กับระบบการทดลองของงานวิจัยต่อไป

## 2.2 วงจรแอลซีอาร์ ( LCR circuit )

รายละเอียดของวงจรที่ถูกใช้ แสดงได้ดังภาพ .

ภาพประกอบ 26 แสดงวงจร แอล ซี อาร์ ( LCR circuit ) ที่ต่ออนุกรมกับทริกเกอร์

( trigger sparkgap ) ของหลอดแฟลช และตำแหน่งที่ใช้วัดศักย์ไฟฟ้า กับกระแสไฟฟ้า

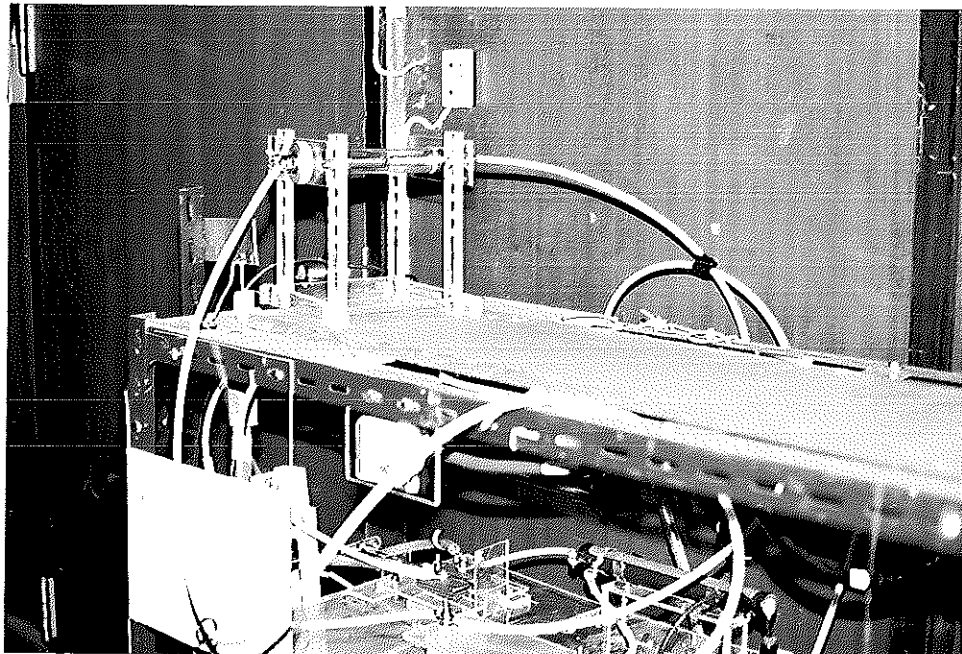


( ที่มา : Songklanakarin J. Sci. Technol. 16(1994) , 93-105 )

ในวงจรนี้จะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุขนาด 0.5 ไมโครฟารัด (  $\mu\text{F}$  ) ทนค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 30 กิโลโวลต์ ( kV ) ค่าความเหนี่ยวนำภายใน 0.02 ไมโครเฮนรี่ (  $\mu\text{H}$  ) ซึ่งถูกอัดประจุในลักษณะคลื่นครึ่งสัญญาณ ( Half - wave ) โดยตัวแปลงกระแส

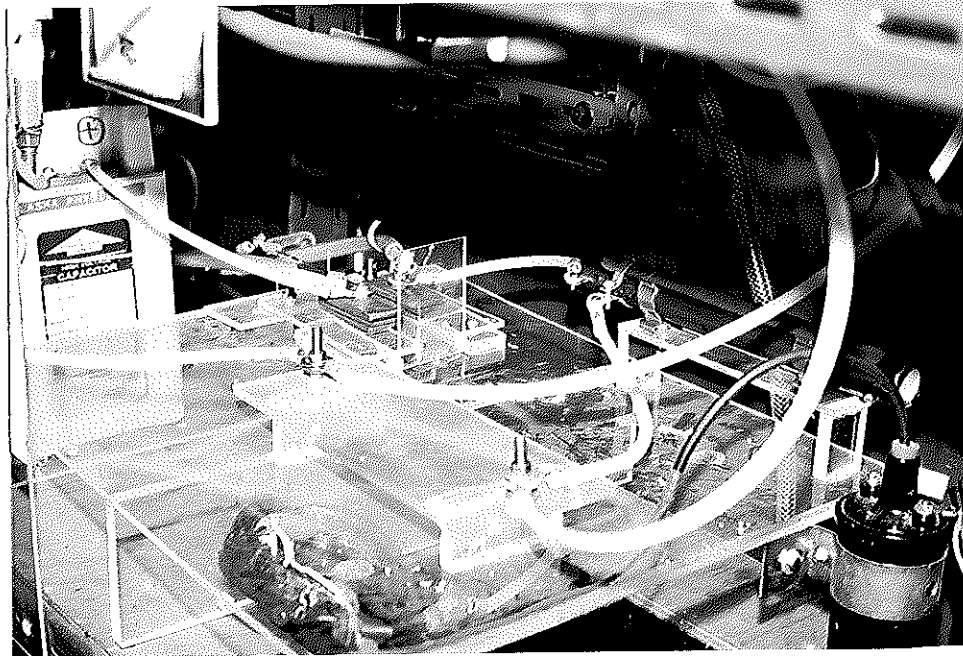
ตรงแบบครึ่งคลื่น ( Half - wave rectifier ) ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งจะต่อกับตัวต้านทานขนาด 600 กิโลโอห์ม (  $k\Omega$  ) เพื่อเป็นตัวต้านทานการอัดประจุและใช้ป้องกันกระแสที่ไหลกลับมายังหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความต้านทานของตัวต้านทานแบบหน่วงที่ปรับค่าได้ปรับไว้ที่ 10.5 โอห์ม และได้ใช้ช่องว่างประกาย ( Sparkgap ) แบบแกว่งไกวขนาดเล็ก ( Small swinging cascade ) เป็นสวิตช์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะถูกระตุ้นโดย พัลส์ไฟฟ้าแรงสูงขนาด 600 โวลต์ โดยที่ต่อเข้ากับตัวจุดระเบิดรถยนต์ที่ทุติยภูมิคอยล์ เพื่อป้องกันการลัดวงจรของสวิตช์ไฟฟ้า 600 โวลต์ จากพัลส์แรงสูงนั้นจะต้องต่อตัวต้านทานขนาด 2 กิโลโอห์ม ครอบที่ตำแหน่งทุติยภูมิของคอยล์ ในวงจรนี้จะใช้ตัวเก็บประจุแบบไอโซเลท ขนาด 100 พิโคฟารัด ( pF ) เพื่อไอโซเลท ( Isolate ) วงจรทริกเกอร์จากกระแสของวงจรแอลซีอาร์ ( LCR circuit ) และค่าอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างช่องว่างของช่องว่างประกาย ( Sparkgap ) จาก ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 2 ต่อ 3

ภาพประกอบ 27 แสดงภาพถ่ายรูปหลอดแฟลช พร้อมวงจร LCR





ภาพประกอบ 28 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบของวงจร



จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าหลอดแฟลชนี้สามารถที่จะควบคุมการทำงานได้ว่าจะให้เกิดแสงขึ้นเมื่อใดขึ้นอยู่กับว่าจะทรiggerเมื่อใด โดยควบคุมชุดพัลส์ไฟฟ้าแรงสูง 600 โวลต์ และชุดควบคุมทางไกลพัลส์ไฟฟ้าแรงต่ำ 15 โวลต์ ควบคุมชุดพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงอีกต่อหนึ่ง

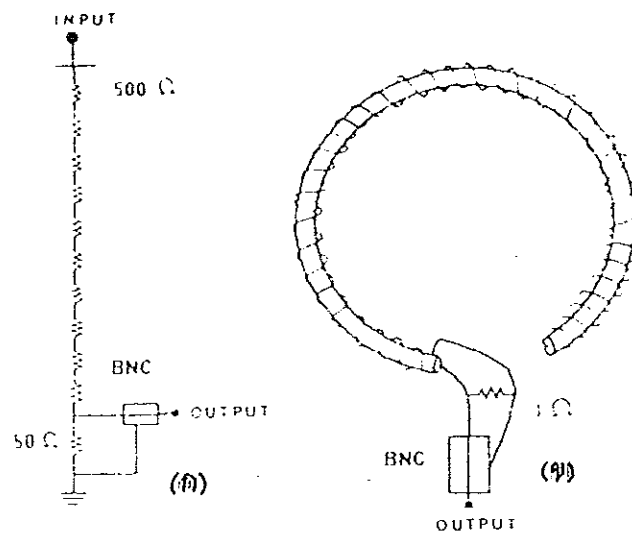
### 3. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหลอดแฟลช

เนื่องจากวงจรที่ใช้กับหลอดแฟลชนี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงมากดังนั้นจึงต้องทำการสร้างตัววัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการ สร้างตัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ( High voltage probe ) กับคอยล์วัดกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า โรโกวสกีคอยล์ ( Rogowski coil ) เพื่อใช้งานดังกล่าว โดยที่ตัววัดกระแสไฟฟ้า แรงสูงมีอัตราส่วนในการลดทอน 1 : 100 ( ลดลง 100 เท่าของ สัญญาณจริง ) และต่อกับตัวลดทอน ( Attenuater ) ที่ลดทอนได้ 10 เท่า ดังนั้น เมื่อรวมหมดแล้วจะได้อัตราส่วนในการลดทอน 1 : 1000

ซึ่งตำแหน่งที่ใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 23 ตัววัดศักย์ไฟฟ้าจะต่อเข้ากับ ออสซิลโลสโคปที่สามารถบันทึกค่า ได้แบบเชิงตัวเลข รุ่น HP 54502 ( Digital storage oscilloscope ) เพื่ออ่านและบันทึกค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ถูกส่งเข้ามาในการ วัดกระแส นั้น ได้ใช้คอยล์วัดกระแสที่ทำตัวเป็นลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้า ( Transformer rogowski coil ) ซึ่งได้พันขดลวด จำนวน 500 รอบ รอบสายไฟฟ้าแรงสูง และใช้ตัวต้านทานค่า 1 โอห์ม ต่อเชื่อม ระหว่างสัญญาณเข้าและกราวด์ ( Ground ) สัญญาณที่ได้จากคอยล์วัดกระแส นี้จะ ถูกลดทอนลงอีก 5 เท่า เพื่อป้องกันสัญญาณ ที่เกินกว่าออสซิลโลสโคปจะรับได้

ภาพประกอบ 29 ก. ภาพส่วนประกอบของตัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง

ข. ภาพส่วนประกอบของคอยล์วัดกระแสไฟฟ้า

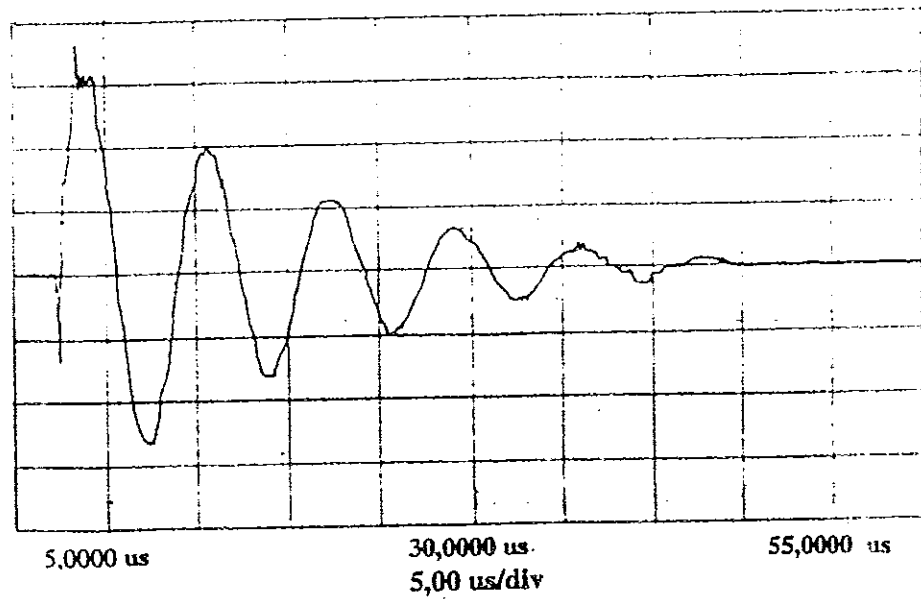


ในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการเทียบค่ามาตรฐาน ( Calibrate ) คอยล์วัดกระแสที่ได้สร้างขึ้นมา เพื่อจะนำไปหาค่าคงที่ ของการเทียบมาตรฐาน ( Calibrating constant,  $k$  ) โดย

การนำมาทดสอบกับวงจรแอลซี ( LC circuit ) ซึ่งเป็นวงจรเดิมของหลอดแฟลช แต่ได้นำเอาตัวหลอดแฟลชออกและได้เอาหลอดเหนี่ยวนำ ( ค่าประมาณ 2 ไมโครเฮนรี่ ) มาแทนที่แล้วก็นำตัวต้านทานแบบห่วงออกเช่นกัน ดังนั้นจะเปรียบเสมือนว่าไม่มีค่าความต้านทานในวงจร

ภาพประกอบ 30 ลักษณะสัญญาณกระแสของวงจร แอล ซี ที่ถูกวัดโดยคอยส์วัด

กระแส ( ตัวเก็บประจุขนาด 0.5 ไมโครฟารัด , ศักย์อัดประจุ 10 กิโลโวลต์ ค่าความต้านทาน 0 โอห์ม )



( ที่มา : Songklanakarin J. Sci. Technol. 16(1994) , 93-105. )

จากสัญญาณกระแสที่วัดได้นี้สามารถนำมาหาค่ากระแสสูงสุดของวงจรและค่าคงที่ของการเทียบมาตรฐานได้ โดยหาได้จากสมการ

$$I_p = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T} \dots\dots\dots (17)$$

โดยที่  $f = \frac{V_2}{V_1}$

$C_0$  คือ ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร หน่วย ฟารัด

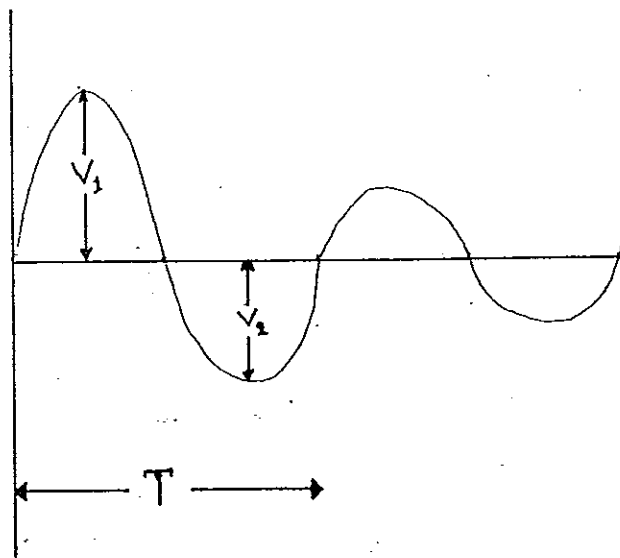
$V_0$  คือ ศักย์เริ่มต้นในการอัดประจุ หน่วย โวลต์

$T$  คือ ช่วงคาบเวลาในหนึ่งคาบ หน่วย วินาที

$I_p$  คือ ค่ากระแสสูงสุดของวงจร หน่วย แอมแปร์

จากสมการข้างต้นในการหาค่า  $T$  และ  $f$  นั้นสามารถวัดได้จากสัญญาณดังกล่าว

ภาพประกอบ 31 แสดงการวัดค่า  $T$  และ  $f$  จากสัญญาณ



ภาพประกอบ 32 ภาพสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของ  
วงจรถ่วง

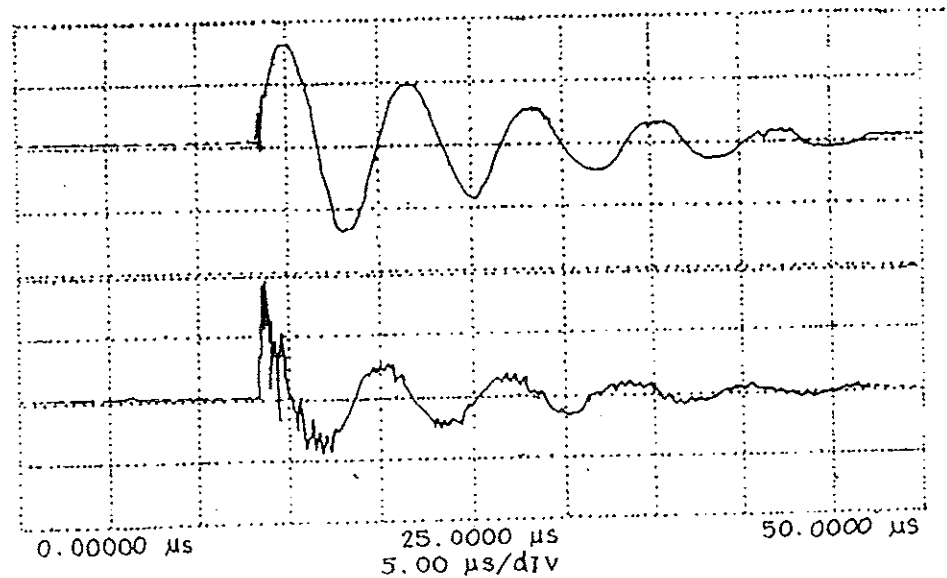
บน : ภาพสัญญาณกระแส

ล่าง : ภาพสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดยหัววัดเทคโนนิค รุ่น Tek

6015

( ศักย์ในการอัดประจุ 10 กิโลโวลต์ , ค่าความต้านทาน 0 โอห์ม

โดยไม่มีหลอดแฟลช )



( ที่มา : Songklanakar J. Sci. Technol. 16(1994) , 93-105 )

จากสมการที่ 17 นำมาหาค่าคงที่การเทียบมาตรฐานได้จากสมการ

$$k = \frac{I_p}{V_i} \dots\dots\dots ( 18 )$$

ซึ่งจะได้ค่าคงที่ของคอยส์วัดกระแสที่ได้สร้างขึ้นเท่ากับ 1.53 กิโลแอมแปร์ต่อโวลต์  
ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้าพร้อมๆกัน เพื่อจะดูว่าความสัมพันธ์

ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ โดยที่จะได้นำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยที่ใช้วงจรลักษณะเดิมเหมือนกับที่ได้ใช้ทดสอบหาค่าคงที่ของคอยล์วัดกระแสในที่นี่ทำให้ทราบค่าของความเหนี่ยวนำตัวเองของคอยล์ที่มีค่าประมาณ 2.5 ไมโครเฮนรี

## ตอนที่ 2 คุณสมบัติและหลักการของเทคนิคการเกิดภาพแบบ ซีโรเรน

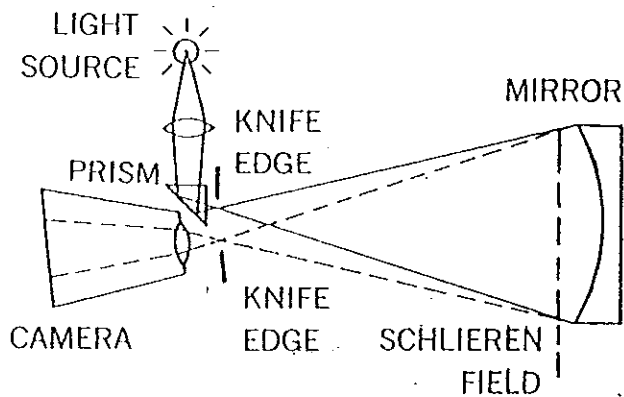
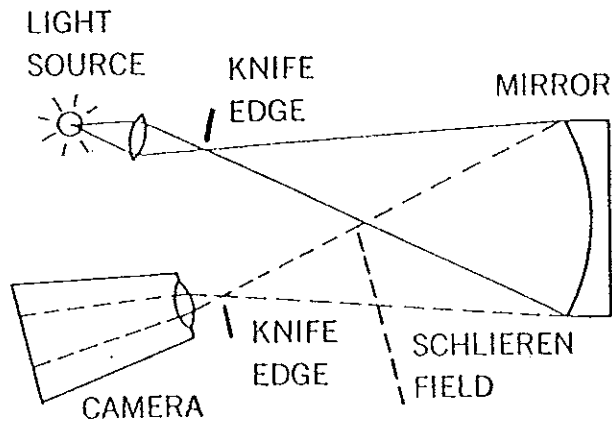
ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติและหลักการโดยทั่วไปของเทคนิคซีโรเรน รวมถึงการจัดระบบทางทัศนศาสตร์ของเทคนิคนี้และการทดสอบเทคนิคดังกล่าวกับแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ คือ หลอดแฟลชและไนโตรเจนเลเซอร์ ดังนั้นจึงได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็นลำดับดังนี้

1. ศึกษารูปแบบโดยทั่วไปของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรน
2. ศึกษาขั้นตอนการจัดวางระบบทัศนศาสตร์ ของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรน
3. ศึกษาและทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรนกับแหล่งกำเนิดแสงพัลส์กำลังชนิดต่าง ๆ
4. ศึกษาการถ่ายภาพปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลากับเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรน

### 1. รูปแบบทั่วไปของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรน

เนื่องจากเทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรนในแต่ก่อนยังใช้เลนส์เป็นอุปกรณ์ซึ่งมีขอบเขตจำกัด คือต้องใช้เลนส์คุณภาพดีเช่น เลนส์ควอทซ์ เป็นต้น , เลนส์มักจะมีปัญหาในเรื่องการเพี้ยน ( Distortion ) ของภาพ และเลนส์มีขนาดจำกัด จึงทำให้ถ่ายภาพได้เฉพาะปรากฏการณ์ที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงได้มีการหาอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ที่เหมาะสมมาทดแทนเลนส์นั้น คือ ใช้กระจกโค้ง ซึ่งทำให้มีพื้นที่การใช้งานเพิ่มขึ้นตามต้องการแล้วแต่ขนาดของกระจกโค้งที่นำมาใช้

ภาพประกอบ 33 แสดงชนิดของเทคนิคชโรเรน ที่ใช้กระจกโค้งอันเดียว

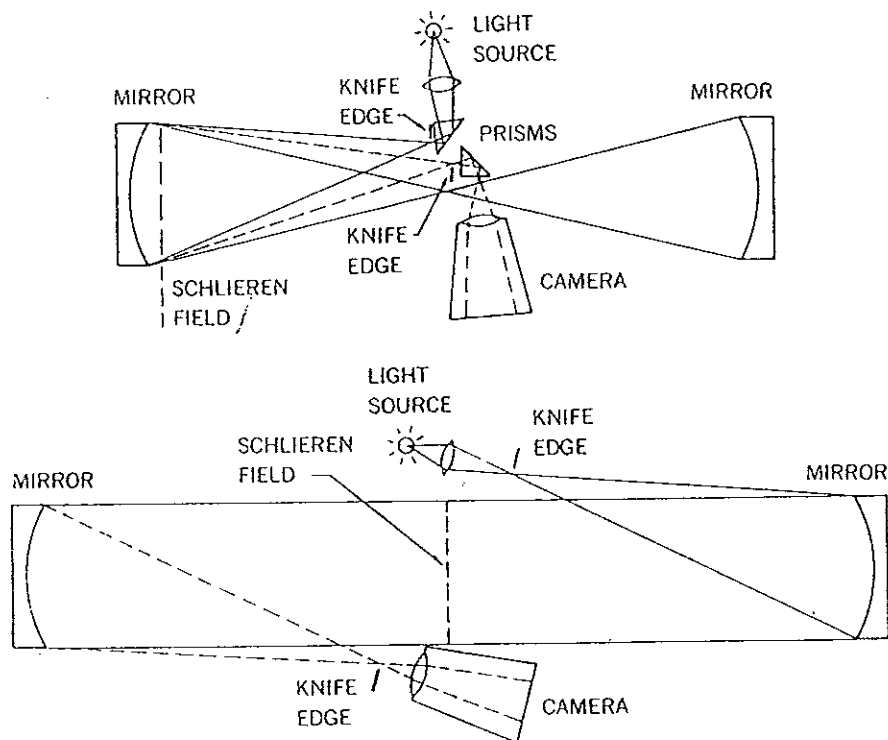


( ที่มา : Eastman Kodak Company, 1960. Schlieren Photography, .  
U.S.A. )

หลักการสำคัญต่างๆของเทคนิคชโรเรนที่ใช้กระจกโค้ง ที่เรียกว่ากระจกชโรเรน ( Mirror schlieren system ) มีลักษณะเหมือนกับการที่ใช้เลนส์ทุกประการแต่สะดวกกว่าและตัดปัญหาต่างๆที่เกิดจากการใช้เลนส์ได้ จากภาพที่ 33 เราจะเห็นว่าแหล่งกำเนิดแสงจะวางไว้ที่ตำแหน่งที่ไม่ใช่โฟกัสของกระจก ซึ่งแสงที่กระทบกับกระจกจะลู่เข้า ( Converge ) แล้วเกิดเป็นสนามชโรเรนหรือพื้นที่ของส่วนทอดสอดดังภาพและ

ส่วนนี้จะถูกจำกัดโดยขนาดของกระจกโค้งแต่ถึงอย่างไรก็ตามระบบกระจกโค้งอันเดียวยังให้คุณภาพของภาพออกมาไม่ดีดังนั้นจึงได้มีการใช้เทคนิคขีโรเรนกระจกที่มีกระจกโค้ง 2 อัน

ภาพประกอบ 34 แสดงชนิดของเทคนิคขีโรเรนกระจกโค้ง 2 อัน



( ที่มา : Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren Photography. .

U.S.A. )

เทคนิคของการใช้กระจกโค้ง 2 อัน เป็นรูปแบบที่มีความนิยมมาก เพราะขอบเขตของการใช้งานกว้างมากขึ้นและยาวกว่ารูปแบบอื่น ทั้งนี้ลำแสงที่ขนานระหว่างกระจกอันที่ 1 และกระจกอันที่ 2 จะขยายให้ไกลเท่าไรก็ได้ โดยที่ขนาดของส่วน



ทดสอบมีมากกว่าแบบกระจกโค้งเดี่ยว ซึ่งลำแสงขนานนั้นเกิดจากการนำแหล่งกำเนิดแสงวางไว้ที่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของกระจกอื่นที่ 1 และเทคนิคการใช้กระจกโค้ง 2 อันนี้เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาเรื่องของอุโมงค์ลมสำหรับทดสอบเรื่องอากาศพลศาสตร์ ( Aerodynamics ) ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรน โดยใช้กระจก 2 อันเพราะมีประสิทธิภาพดีและประโยชน์การใช้งานมีมากกว่าแบบกระจกโค้งอันเดียวและเหมาะสมกับการใช้งานในการวิจัยนี้

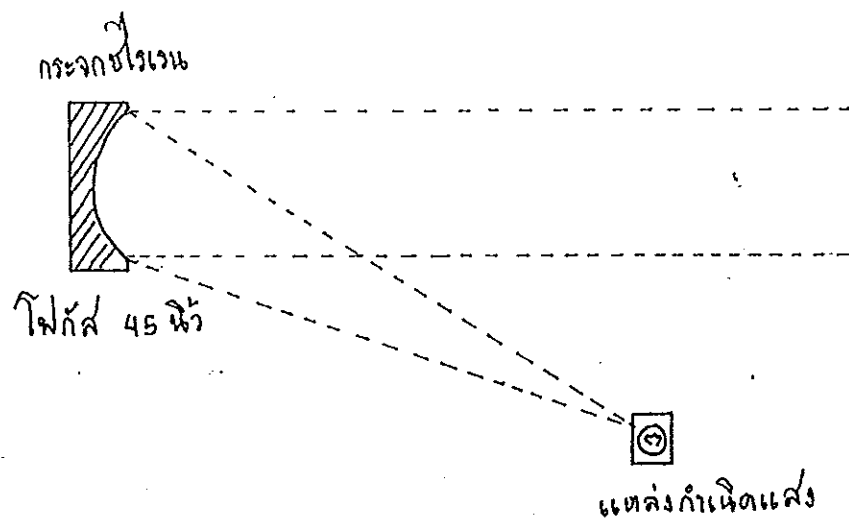
## 2. ขั้นตอนการจัดวางระบบทัศนศาสตร์ของเทคนิคการถ่ายภาพแบบชไรเรน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าได้เลือกใช้ระบบการถ่ายภาพแบบชไรเรนที่ใช้กระจกโค้งสองอันเพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมระบบทัศนศาสตร์ของเทคนิคนี้ได้ทำการวิจัย ซึ่งจะได้แบ่งเป็นลำดับ ดังนี้

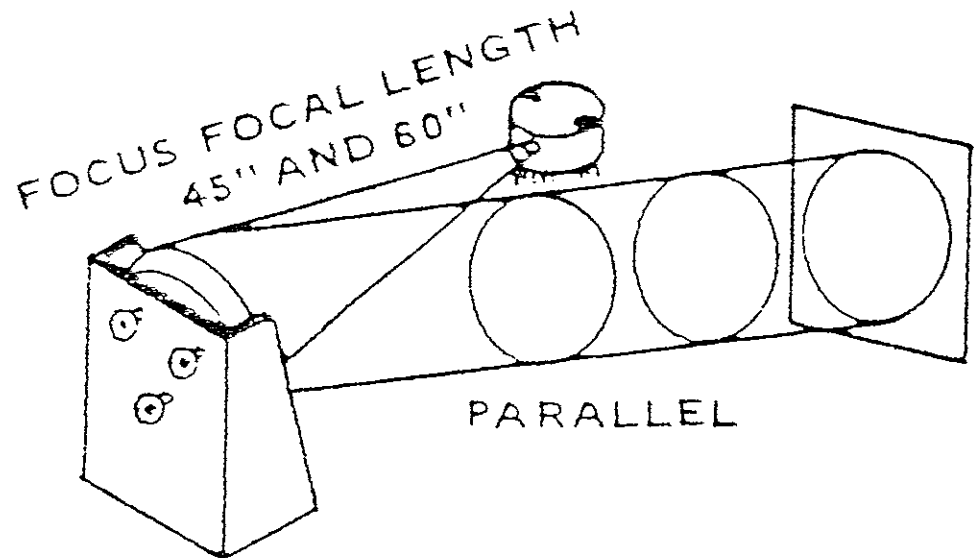
### 2.1 การหาตำแหน่งที่จะวางแหล่งกำเนิดแสง

จากที่ได้เคยกล่าวมาแล้วข้างต้นว่าจะต้องทำให้เกิดลำแสงขนานจากกระจกอื่นที่ 1 ดังนั้นจึงต้องหาตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อวางแหล่งกำเนิดแสงนั้นเนื่องจากหลักการของทัศนศาสตร์ ถ้าวางแหล่งกำเนิดแสงไว้ที่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์หรือกระจกจะทำให้เกิดลำแสงขนาน

ภาพประกอบ 35 ลักษณะทัศนศาสตร์เมื่อวางแหล่งกำเนิดแสงในตำแหน่งโฟกัส



ภาพประกอบ 36 การทดสอบโดยใช้หอแสง (Light tower) เป็นแหล่งกำเนิดแสง



( จาก Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren Photography. .

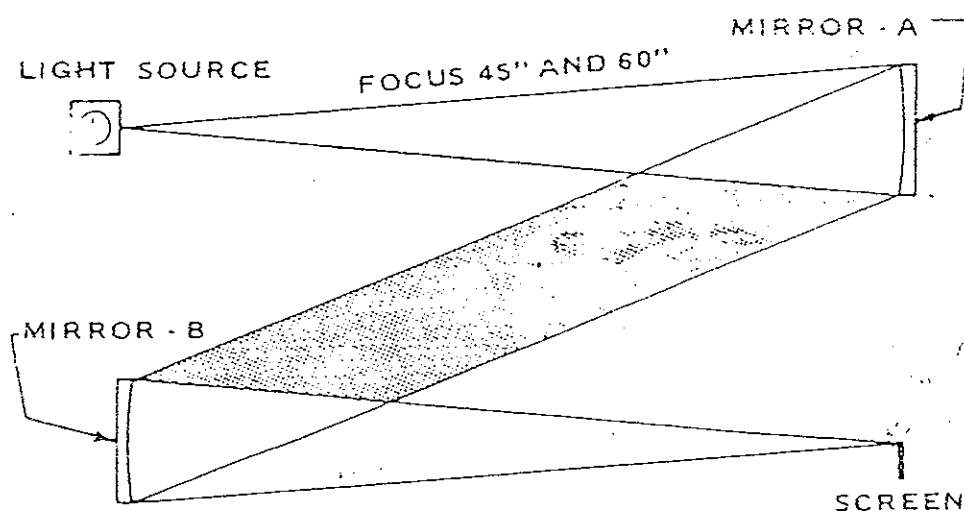
U.S.A. )

ในการทดสอบนั้นผู้วิจัยได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบต่อเนื่องดังภาพที่ 36 ที่เรียกว่าหอแสงวางไว้ตำแหน่งโฟกัสหรือใกล้เคียงกับระยะโฟกัสของกระจกขั้วโรเรนคือประมาณ 45 นิ้ว โดยวางที่หน้ากระจกขั้วโรเรนแล้วให้แสงที่ตกกระทบกับกระจกนั้นสะท้อนไปยังฉากหรือวัสดุที่บดแสงจะทำให้เห็นแสงสว่างที่ตกกระทบลงจากมีลักษณะเป็นวงกลมตามขนาดของกระจกขั้วโรเรนและไม่ว่าจะเลื่อนฉากไปที่ระยะใดๆก็ตามขนาดของแสงสว่างที่ตกกระทบบนฉากก็ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดซึ่งถ้าได้เป็นลักษณะนี้ หมายความว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงถูกต้อง

## 2.2 การหาตำแหน่งโฟกัสของแหล่งกำเนิดแสงหลังจากกระทบ กระจกขรุขระเลนอันที่ 2

เนื่องจากจะต้องหาตำแหน่งโฟกัสของแสงที่ใช้ถ่ายภาพก่อนเพื่อที่จะวางตำแหน่งของคมมีด ( Knife edge ) ได้ถูกต้อง เพื่อตัดความเข้มแสงที่จะรบกวนภาพของปรากฏการณ์ทำให้เกิดความไม่คมชัด

ภาพประกอบ 37 แสดงการวางตำแหน่งของกระจกทั้งสองพร้อมกับคมมีด



( จาก Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren Photography ,  
U.S.A. )

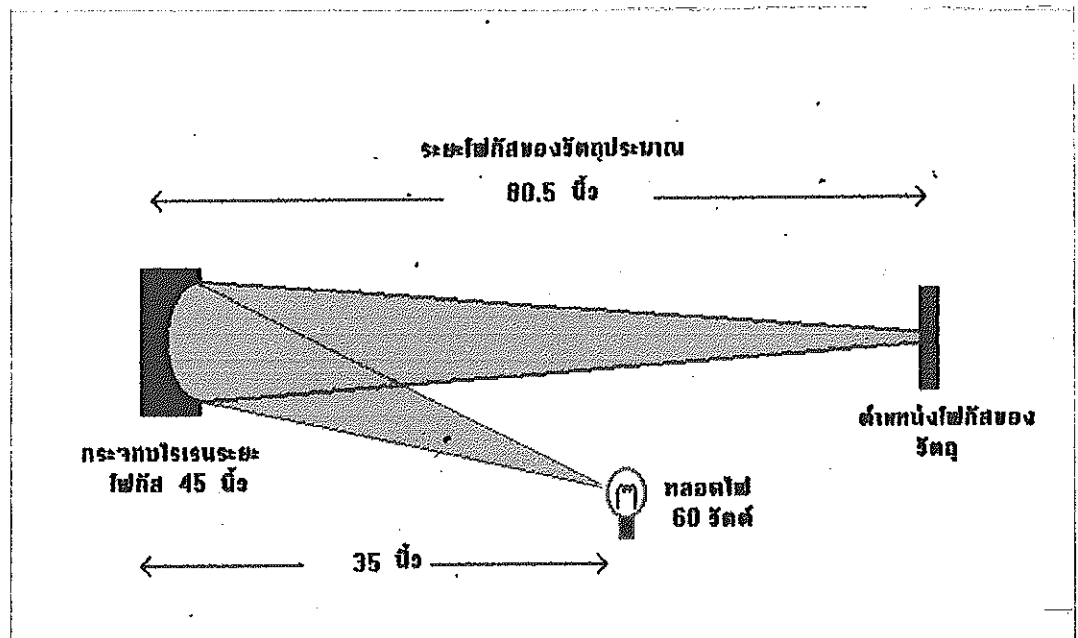
ตำแหน่งของกระจกขรุขระเลนอันที่ 2 นี้ผู้วิจัยได้วางขวางลำแสงที่สะท้อนออกมาจากกระจกอันที่ 1 ห่างกันเป็นระยะประมาณ 90 นิ้วและให้ลำแสงสะท้อนจากกระจกอันที่ 2 เป็นแนวตั้งฉากกับกระจกอันที่ 2 ซึ่งระยะความยาวโฟกัสของแสงที่ผ่านกระจกอันที่ 2 จะได้เท่ากับ 45 นิ้วคือเท่ากับความยาวโฟกัสของกระจกอันที่ 2

ตำแหน่งของกระจกขั้วโรเรนอันที่ 2 นี้ผู้วิจัยได้วางขวางลำแสงที่สะท้อนออกมาจากกระจกอันที่ 1 ห่างกันเป็นระยะประมาณ 90 นิ้วและให้ลำแสงสะท้อนจากกระจกอันที่ 2 เป็นแนวตั้งฉากกับกระจกอันที่ 2 ซึ่งระยะความยาวโฟกัสของแสงที่ผ่านกระจกอันที่ 2 จะได้เท่ากับ 45 นิ้วคือเท่ากับความยาวโฟกัสของกระจกอันที่ 2 ที่ตำแหน่ง นี้ผู้วิจัยได้วางคมมีดเอาไว้ ณ ตำแหน่งโฟกัสจะเห็นได้ว่าทิศทางของทางเดินแสงเป็น ลักษณะตัวแซด ( Z - shape )

### 2.3 การหาตำแหน่งโฟกัสของวัตถุที่ใช้ถ่ายภาพ

เพื่อที่จะสามารถวางตำแหน่งของฟิล์มได้ถูกต้อง ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบหาตำแหน่งโฟกัสดังกล่าวโดยการใช้หลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ ( Watt ) แบบกลมวางไว้ในแนวเฉียงหน้ากระจกขั้วโรเรนอันที่ 2 แล้วปรับระยะห่างจากกระจกเพื่อหาตำแหน่งโฟกัสของหลอดไฟ ซึ่งระยะที่ได้นั้นประมาณในช่วงระหว่าง 50 ถึง 60 นิ้ว

ภาพประกอบ 38 แสดงการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ในการหาตำแหน่งโฟกัสของวัตถุ



ตำแหน่งโฟกัสของวัตถุเป็น ตำแหน่งติดตั้งฟิล์มโพลาไรซ์ เพื่อใช้บันทึกภาพซึ่งสาเหตุที่ใช้ฟิล์มโพลาไรซ์ขาว - ดำ ความไวสูงนั้น เพราะว่าการทดลองจริงๆ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มีลักษณะเป็นพัลส์และมีความไวสูง คือ อยู่ในช่วง

ไมโครวินาทีซึ่งฟิล์มขาว - ดำ นี้จะมีความเปรียบต่าง ( Contrast ) อย่างเห็นได้ชัดในกรณีที่ค่าดัชนีหักเหหรือความหนาแน่นของปรากฏการณ์ไม่เท่ากันและการป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก ได้สร้างท่อกำบังแสงพร้อมกล่องใส่ฟิล์มดังภาพที่ 13 ด้านหน้าจะเป็นรูเล็ก ๆ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ( cm. ) ตำแหน่งอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัสของแหล่งกำเนิดแสง

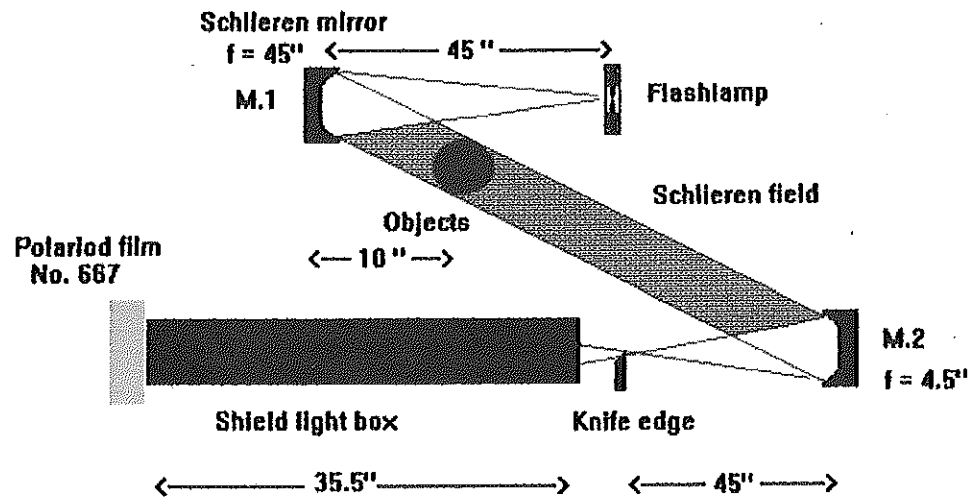
ภาพประกอบ 39 ด้านหน้าของท่อกำบังแสงและตำแหน่งของคมมีด



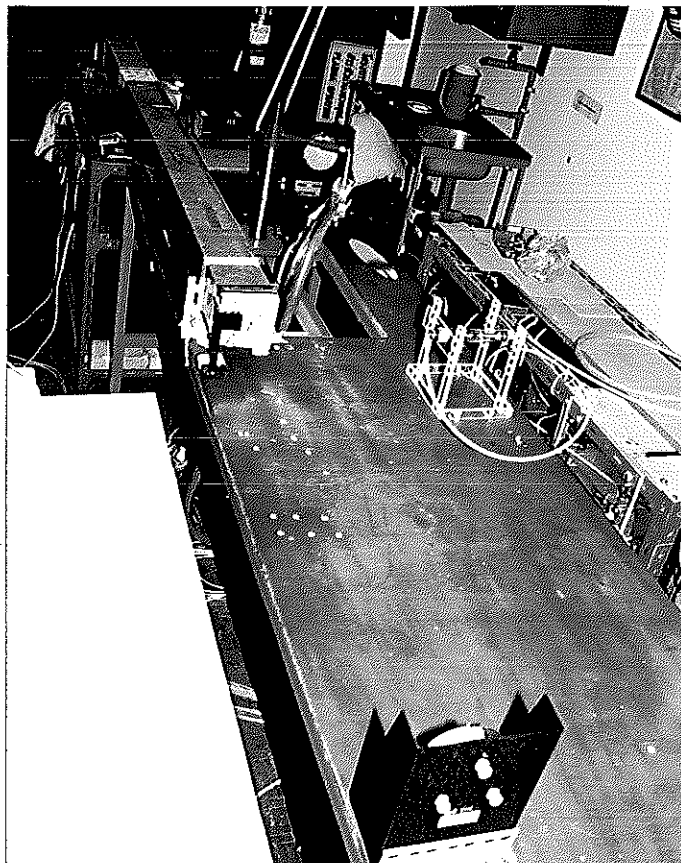
#### 2.4 การจัดวางระบบทัศนศาสตร์ทั้งหมดของเทคนิคซีโรเรน

เนื่องจากได้มีการหาระยะและตำแหน่งโฟกัสทั้งของแหล่งกำเนิดแสงกับวัตถุตั้งที่อธิบายมาแล้วข้างต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงได้มีการจัดวางตำแหน่งทั้งหมดของอุปกรณ์ไว้ ณ จุดที่ได้หาเอาไว้แล้วโดยได้เอาหลอดไฟที่ใช้สำหรับหาตำแหน่งโฟกัสของวัตถุออกแล้วจัดวางอุปกรณ์ดังภาพ

ภาพประกอบ 40 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆของระบบทัศนศาสตร์



ภาพประกอบ 41 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ต่างๆที่ได้จัดตำแหน่งไว้บนโต๊ะที่จัดสร้างขึ้น  
สำหรับงานวิจัยนี้



### 3. ศึกษาและทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรนกับแหล่งกำเนิดแสงแบบ พัลส์กำลัง

จากที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าการถ่ายภาพปรากฏการณ์ฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วนั้นจะต้องใช้กล้องที่มีความไวชัตเตอร์ ( Shutter speed ) สูงดังนั้นในการตัดปัญหาเรื่องชัตเตอร์ผู้วิจัยได้สร้างหลอดแฟลชความไวสูงขึ้นมา เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ( ดังที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น ) ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ได้จัดสร้างดังนี้

#### 3.1 การทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรนโดยใช้หลอดแฟลชเป็นตัว กำเนิดแสง

3.1.1 นำหลอดแฟลชวางที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงดังภาพที่ 40 เพื่อปรับแต่งระดับของแนวทางเดินแสงและตำแหน่งสลายของคมมืด ซึ่งทำให้ภาพของวัตถุที่ปรากฏลงบนฟิล์มเกิดความคมชัด โดยการดูจากภาพที่ถ่ายหัวของเจ็ดพลาสมาที่เกิดขึ้นบนฟิล์มสามารถจะปรับความคมชัดของภาพได้จากการเลื่อนตำแหน่งของปลายคมมืด

3.1.2 ทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคชโรเรน ที่ได้จัดรูปแบบเอาไว้ ดังภาพที่ 41 โดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงและใช้วัตถุที่ไม่กำเนิด แสงออกมาในที่นี้ได้ใช้เครื่องพ่นลมอุณหภูมิสูงเป็นวัตถุที่ใช้ถ่ายภาพวางไว้ที่ตำแหน่งของวัตถุ ( จากการทดลอง ) แล้วเริ่มการทำงานหลอดแฟลช โดยปรับความต่างศักย์ของหลอดแฟลชที่ 10 กิโลโวลต์ ( จากการทดลอง ) หลังจากนั้นดูภาพถ่ายที่ปรากฏบนฟิล์ม เพื่อดูผลของระบบที่ได้ประกอบขึ้นมา

### 4. การทดลองการถ่ายภาพปรากฏการณ์ฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลากับเทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรน ที่ได้ประกอบขึ้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองของเทคนิคนี้ โดยการเปลี่ยนวัตถุหรือปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะวางไว้ที่ตำแหน่งของวัตถุที่ถ่ายภาพ ( จากการทดลอง ) และใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้แบ่งหัวข้อการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์เป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

#### 4.1 ศึกษาโดยใช้ก๊าซที่ปล่อยออกมาด้วยความเร็วสูงเป็นวัตถุ

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการถ่ายภาพด้วยเทคนิคสโรเรน โดยการนำมาถ่ายภาพก๊าซที่ปล่อยออกมาด้วยความเร็วสูง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เปลี่ยนหัวที่ใช้ปล่อยก๊าซ ในรูปแบบต่างๆซึ่งจะแบ่งได้ออกเป็นดังนี้

1. ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากหัวของเจ็ตพลาสมาที่ความดันต่าง ๆ
2. ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากหัวฉีดของเครื่องปั๊มลมแรงดันสูง
3. ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากท่อพลาสมาติกกรวยแหลม

จากหัวข้อที่กล่าวมาในหัวข้อ 2 และ 3 ได้ใช้ความดันก๊าซเพียงค่าเดียว ( ไม่เปลี่ยนความดัน ) ซึ่งรายละเอียดของหัวข้อต่างๆเป็นดังนี้

##### 4.1.1 ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากหัวเจ็ตพลาสมาที่ความดันต่าง ๆ

การทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้หัวเจ็ตพลาสมาในการปล่อยก๊าซ เพื่อใช้เป็นวัตถุในการถ่ายภาพ ซึ่งได้มีการจัดตำแหน่งดังภาพที่ 40 หัวเจ็ตพลาสมาเป็นอุปกรณ์หนึ่งในเครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมา ดังที่ได้กล่าวในส่วนของอุปกรณ์แล้วและเครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมาสามารถที่จะปรับค่าความดันได้ตามต้องการ โดยปรับจากลิ้น ( Valve ) ส่งก๊าซและอ่านค่าความดันจากเกจวัด ( Gauge ) ที่ติดกับเครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมาหรือเรียกว่า แพ็ค 45 ( PAK 45 ) ในหัวข้อการทดลองนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

##### 4.1.1.1 ใช้ท่อปลายก๊าซต่อกับหัวเจ็ตพลาสมาในการปล่อยก๊าซ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำให้รูปล่อยก๊าซของเจ็ตมีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นในส่วนปลายของรูที่ก๊าซออก โดยการทำท่อส่งก๊าซขนาดเล็กมาต่อเข้ากับหัวของเจ็ตพลาสมาซึ่งขนาดรูของท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.2 มิลลิเมตร และในการติดตั้งตำแหน่งของหัวเจ็ตพลาสมาเป็นตำแหน่งเดิมกับหัวข้อ 4.2.3.1 แต่ได้ทำการปรับค่าของ ความดันที่ระดับต่างๆกัน โดยปรับความดัน 4 ค่า คือ

1. ที่ความดัน 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
2. ที่ความดัน 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. ที่ความดัน 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
4. ที่ความดัน 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



ในการทดลองนี้เมื่อปรับค่าความดันที่ค่าหนึ่งและก็จะเริ่มการทำงานหลอดแฟลชทันทีเมื่อเสร็จแล้วก็จะเปลี่ยนค่าความดันใหม่และเริ่มการทำงานของหลอดแฟลชใหม่จนเสร็จสิ้นทั้ง 4 ค่า โดยการเรียงจากค่าต่ำสุดไปค่าสูงสุดผลของแต่ละค่านั้นก็จะได้ดูจากภาพถ่าย

ภาพประกอบ 42 ภาพของหัวเจ็ตพลาสมาเมื่อต่อกับหัวฉีดก๊าซที่ทำงานเรียบร้อยแล้ว



#### 4.1.1.2 ใช้หัวเจ็ตพลาสมาแบบปกติปล่อยก๊าซ

ได้ปรับค่าความดันของก๊าซที่ถูกปล่อยจากหัวเจ็ตมีค่าประมาณ 6.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจ็ตประมาณ 7.6 มิลลิเมตร โดยให้ก๊าซไหลอย่างต่อเนื่องพร้อมกับเริ่มการทำงานของหลอดแฟลชและดูผลจากภาพถ่าย ในที่นี้ลักษณะของหัวเจ็ตพลาสมาที่ใช้มีลักษณะดังภาพที่ 19

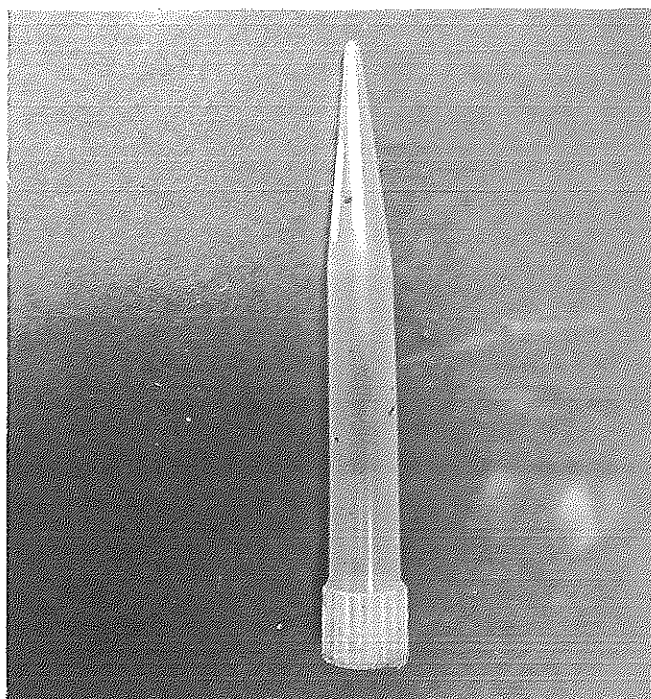
#### 4.1.2 ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากเครื่องปั๊มลมแรงดันสูง

เครื่องปั๊มลมแรงดันสูงที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้เป็นเครื่องปั๊มลมที่ปล่อยแรงดันได้สูงสุด 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (  $\text{kg} / \text{cm}^2$  ) หัวพ่นก๊าซเป็นแบบหัวเกลียวถอดเปลี่ยนได้และสามารถปล่อยก๊าซได้โดยปุ่มควบคุมที่อยู่บริเวณหัวพ่นก๊าซแต่ในที่นี้ได้ใช้เทปกาวพันปิดปุ่มควบคุมให้ปล่อยก๊าซได้ตลอดเวลาและได้ควบคุมการเปิดปิดปล่อยก๊าซที่ตัวเครื่องโดยตรงขนาดของรูที่ปล่อยก๊าซมีขนาด 2 มิลลิเมตร และหัวพ่นก๊าซวางไว้ที่ตำแหน่งวัตถุของระบบถ่ายภาพในการทดลองได้ปล่อยก๊าซที่ความสูงสุดพร้อมกับเริ่มการทำงานของหลอดแฟลชแล้วดูผล จากภาพถ่าย

#### 4.1.3 ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากท่อพลาสติกกวยแหลม

ในที่นี้ได้ต่อท่อพลาสติกกวยแหลมกับท่อส่งก๊าซของถังก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสามารถปล่อยแรงดันก๊าซออกมาสูงสุดประมาณ 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (  $\text{kg} / \text{cm}^2$  ) ( โดยอ่านค่าจากเกจวัดความดันของถังก๊าซ ) โดยที่ได้ปล่อยก๊าซที่ความดันสูงสุดนี้ผ่านท่อพลาสติกกวยแหลมแล้ววางที่ตำแหน่งของวัตถุของระบบการถ่ายภาพที่ได้เตรียมไว้ หลังจากนั้นเริ่มการทำงานของหลอดแฟลชแล้วสังเกตผลของภาพที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม

ภาพประกอบ 43 ลักษณะของท่อพลาสติกกวยแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องปล่อยลมประมาณ 0.08 เซนติเมตร



#### 4.2 ศึกษาโดยใช้ปรากฏการณ์ฟองสบู่เป็นวัตถุในการถ่ายภาพ

ในหัวข้อนี้เป็นวัตถุอีกชนิดหนึ่งที่ไม่มีการเปล่งแสงออกมาเหมือนกับหัวข้อ 4.2 ในที่นี้ผู้วิจัยได้ใช้น้ำยาสระผมผสมกับกลีเซอริน เพื่อทำเป็นน้ำยาใช้ในการเกิดฟองขึ้นมาโดยทำให้เกิดฟอง 2 ลักษณะ คือ

- ฟองกลมที่เป่าออกจากหลอด
- แผ่นฟิล์มของฟองโดยใช้หลอดทำเป็นวงกลม

ซึ่งทั้งสองลักษณะนี้ได้ทดลองทีละอย่าง โดยการนำเอาฟองมาวางไว้ที่ตำแหน่งของวัตถุแล้วถ่ายภาพโดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงและดูผลจากภาพถ่ายที่ปรากฏบนฟิล์ม

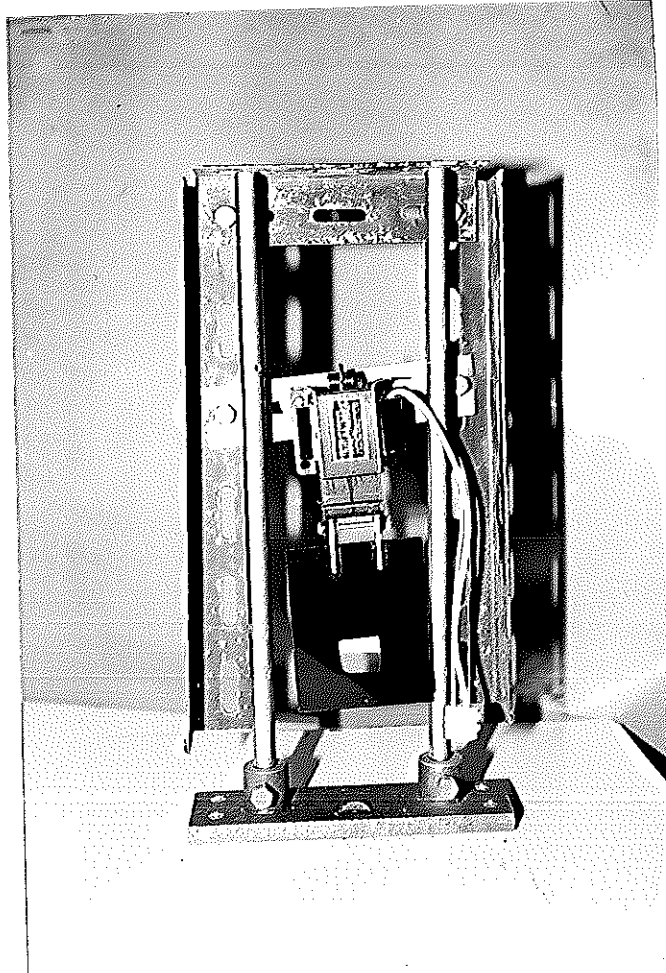
#### 4.3 ศึกษาโดยการถ่ายภาพก๊าซแหวกตัวเมื่อมีวัตถุมาขวาง

ในหัวข้อนี้จะมีวิธีการคล้ายกับหัวข้อ 4.1.1.1 แต่ไม่เปลี่ยนความดัน แต่ปรับความดันคงที่ประมาณ 6.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แล้วนำเข็มปลายแหลมวางด้านหน้าของทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซในแนวทิศเดียวกันแล้วเริ่มถ่ายภาพ โดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงและดูผลการศึกษาจาก ภาพถ่ายบนฟิล์มจากการศึกษาการถ่ายภาพทั้งหมดนี้จะต้องกระทำในห้องมืดและเปิดที่กันแผ่นฟิล์มต่อเมื่อจะเริ่มการทำงานของหลอดแฟลชเท่านั้น เพราะป้องกันแสงจากภายนอกกระทบกวนแผ่นฟิล์ม

#### 4.4 ศึกษาโดยใช้เปลวเจ็ตพลาสมาเป็นวัตถุในการถ่ายภาพ

ในหัวข้อนี้จะใช้เปลวของเจ็ตพลาสมา ซึ่งจะมีทั้งแสงและความร้อนออกมา เพื่อเป็นการดูว่าเทคนิคนี้สามารถจะใช้ถ่ายภาพวัตถุที่มีแสงออกมาได้หรือไม่ เนื่องจากเปลวพลาสมาเป็นลักษณะแบบต่อเนื่อง ดังนั้นแสงสว่างที่มาจากเปลวสามารถเข้าไปรบกวนฟิล์มได้จึงได้ทำที่เปิดปิดหน้าท่อกำบังแสงแบบงายขึ้นเพื่อใช้งาน โดยควบคุมจากตัวกำเนิดพัลส์แรงดันต่ำหรือกล่องควบคุมหลัก( Master box ) ที่ใช้ควบคุมการทำงานของหลอดแฟลช ซึ่งได้ทำการดัดแปลงให้สามารถควบคุมได้ทั้ง 2 อย่าง โดยใช้สวิตช์แบบเปิดปิด 3 ทิศทาง 2 หน้าสัมผัสหลังจากนั้นจึงได้เดินเครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมา โดยตั้งกระแสไว้ต่ำสุดที่ 50 แอมแปร์ ความดันก๊าซอาร์กอน 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วเริ่มถ่ายภาพโดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงตำแหน่งของเจ็ตพลาสมาอยู่ที่ตำแหน่งของวัตถุ โดยดูผลจากภาพถ่ายที่เกิดบนฟิล์ม

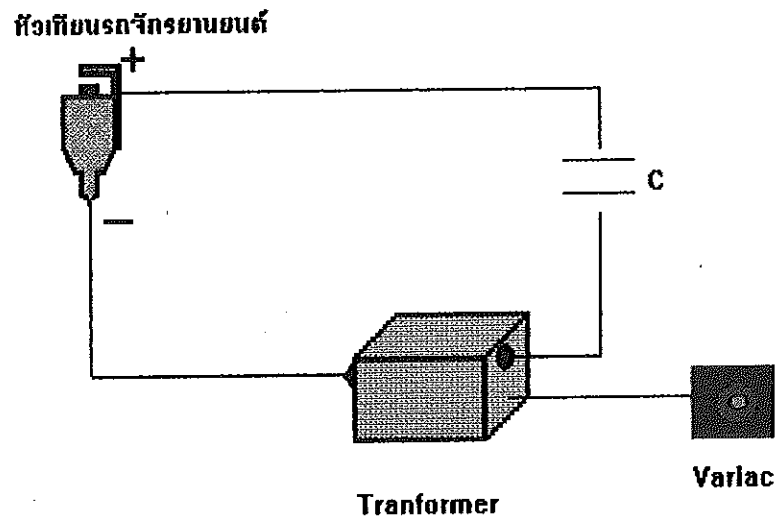
ภาพประกอบ 44 แสดงภาพของที่เปิดปิดซึ่งทำหน้าที่เป็นชัตเตอร์ที่ได้ประกอบขึ้น



#### 4.5 ศึกษาโดยใช้หัวเทียนรถยนต์เป็นวัตถุ ( Object )

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองการถ่ายภาพการเกิดการอาร์ค ( Arc ) ของหัวเทียนรถยนต์ ซึ่งได้มีการติดตั้งโดยต่อขั้วไฟฟ้าของหัวเทียนออกเป็นขั้วบวกและขั้วลบ โดยที่ขั้วด้านล่างของหัวเทียนเป็นขั้วไฟฟ้าลบและด้านข้างที่ต่อกับสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงเป็นขั้วไฟฟ้าบวก ซึ่งจะไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทานขนาดเท่ากับ 2.5 เมกกะโอห์ม (  $M\Omega$  ) ( จากการคำนวณ ) แล้วต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงขนาดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 15 กิโลโวลต์ กระแสตรง ส่วนทางด้านขั้วไฟฟ้าลบของหัวเทียนต่อตรงเข้ากับขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง

ภาพประกอบ 45 แสดงการต่อหัวเทียนรถยนต์กับตัวเก็บประจุเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง



จ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 5 กิโลโวลต์ เพื่อให้เกิดอาร์คบริเวณที่หัวของหัวเทียน แล้วเริ่มการทำงานของหลอดแฟลช โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าอัดประจุประมาณ 10 กิโลโวลต์ ซึ่งตำแหน่งของหัวเทียนวางไว้ที่ตำแหน่งวัตถุ ( จากการทดลอง )

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

บทนี้แสดงผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย โดยเสนอผลการวิจัยตามลำดับที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เนื่องจากผลการวิจัยส่วนใหญ่เป็นภาพถ่ายจึงได้เสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลควบคู่กันไปด้วยเพื่อความต่อเนื่องส่วนการวิเคราะห์และวิจารณ์จะได้กล่าวไว้ในบทต่อไป

ผลและการอภิปรายผลแบ่งออกเป็นตอนๆตามลำดับดังนี้

ตอนที่ 1 ผลของการศึกษาหลอดแฟลชที่สามารถทริกเกอร์หรือควบคุมการทำงานได้

ตอนที่ 2 ผลของการศึกษาคอนสุมิตีและหลักการของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรน

ตอนที่ 1 ผลของการศึกษาหลอดแฟลชที่สามารถทริกเกอร์หรือควบคุมการทำงานได้

ในตอนนี้จะได้แสดงผลของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหลอดแฟลชซึ่งวิธีการทดสอบและรายละเอียดของเครื่องมือวัด ซึ่งจะได้กล่าวไว้ในภาคผนวกต่อไป ซึ่งผลการศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า
2. ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแสงที่ได้จากหลอดแฟลช

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบคุณสมบัติของหลอดแฟลชและเพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรน

## 1. ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า

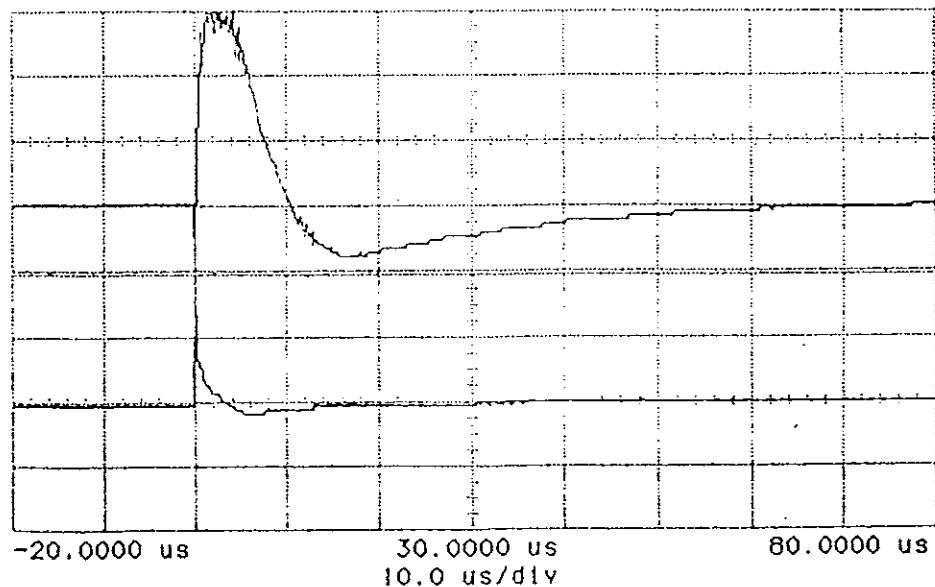
ในที่นี้ได้ทำการวัดค่ากระแสและค่าศักย์ไฟฟ้าของวงจรที่ใช้ในการทำงานของหลอดแฟลช โดยใช้คอยล์วัดกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า โรโกวสกีคอยล์ ( Rogowski coil ) และหัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ( High voltage probe ) วัดค่าต่างๆตามลำดับซึ่งเทคนิคและวิธีการวัดได้อธิบายในภาคผนวก ในการทดสอบระบบหลอดแฟลชนั้นได้เปลี่ยนค่าศักย์ในการอัดประจุ ( Charging voltage ) ตั้งแต่ 4 ถึง 12 กิโลโวลต์แล้วทำการทริกเกอร์แต่ละค่าศักย์ไฟฟ้าภาพที่ 46 เป็นการแสดงสัญญาณของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ โดยการจ่ายค่าศักย์ในการอัดประจุที่ 10 กิโลโวลต์

ภาพประกอบ 46 แสดงสัญญาณกระแส และศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้

บน - ค่ากระแส 200 แอมแปร์ ต่อช่อง ( A / div )

ล่าง - ค่าศักย์ไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ ต่อช่อง ( kV / div )

( ศักย์ของตัวเก็บประจุ 10 กิโลโวลต์ )



จากการเปรียบเทียบสัญญาณทั้ง 2 จะสังเกตได้ว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทันที ที่ตำแหน่งสูงสูดนั้นค่ากระแสไฟฟ้าจะไม่ขึ้นจนกระทั่งค่าศักย์ไฟฟ้า

เริ่มลดลงมา ในเวลาเดียวกัน จากสัญญาณนี้ผู้วิจัยสามารถวัดพัลส์กระแสไฟฟ้าได้ค่าประมาณ 10 ไมโครวินาที หรือค่าความกว้างของพัลส์กระแสที่ถูกวัดตำแหน่ง 1 ส่วน 3 ของ ตำแหน่งสูงสุด (  $t_{1/3}$  ) ประมาณ 8 ไมโครวินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าของหลอดแฟลชประมาณ 7.2 กิโลโวลต์ ซึ่งจะพบว่าศักย์ไฟฟ้าหายไป โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้านี้อาจหายไปเนื่องจากตัวต้านทานแบบหน่วง ( Damping resistor ) และช่องว่างประกายไฟ ( Spark gap ) และเมื่อได้วัดค่าแสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะได้รับความสัมพันธ์ออกมาแบบแปรผันตรง ซึ่งมีค่าเวลาช่วงขึ้น ( Rise time ,  $T$  ) ประมาณ 2 ไมโครวินาที ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า ความเหนี่ยวนำ ( Inductance ,  $L$  ) ของวงจรได้ดังสมการที่ 15 และจะได้ค่าเหนี่ยวนำ ประมาณ 3 ไมโครเฮนรี่ (  $\mu H$  ) ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างมากอาจเป็นเพราะว่า ตัวต้านทานที่ใช้เป็นแบบหน่วง ( Damp ) และเป็นตัวต้านทานชนิด ขดลวด ( Wire winding type ) จึงมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ด้วยในการหาประสิทธิภาพของหลอดแฟลช ที่ศักย์อัดประจุ 1 กิโลโวลต์ พลังงานที่ออกมาจากตัวเก็บประจุประมาณ 25 จูล (  $J$  ) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 14 และพลังงานที่หลอดแฟลชได้รับ เนื่องจากคาบของกระแสในช่วงขึ้น ( Current rising period ) ( น้อยกว่า 2 ไมโครวินาที ) คำนวณได้จากสมการ

$$E = \int I(t)V(t)dt \dots\dots\dots( 19 )$$

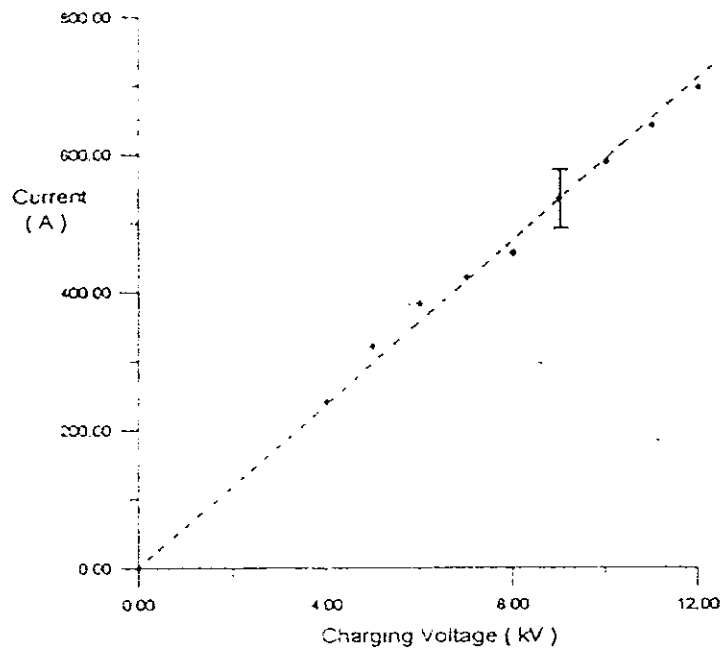
ได้ค่าประมาณ 3.6 จูล และสามารถคำนวณหาค่าการสูญเสียความต้านทาน ( Ohmic loss ) ในตัวต้านทานแบบหน่วงจากสมการ

$$E = I^2 Rt \dots\dots\dots ( 20 )$$

ได้ค่าประมาณ 7.6 จูล ดังนั้นจึงพบว่าค่าพลังงานที่ได้ออกมานั้นเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ตัวเก็บประจุจ่ายออกมาเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับระบบอื่น เช่น สูญเสียเนื่องจากช่องว่างประกายไฟ , สูญเสียเนื่องความร้อนในตัวเก็บประจุ เป็นต้น



ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของ  
หลอดแฟลช



เมื่อดูค่าประสิทธิภาพ ( Typical efficiency curves ) (4) พบว่าค่าของประสิทธิภาพของหลอดแฟลชที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนั้นไม่เกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ และมีค่ากระแสสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการที่ 17 ค่าประมาณ 800 แอมแปร์ ขณะที่จากการทดลองวัดได้ประมาณ 600 แอมแปร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และที่เราไม่ทราบค่าความต้านทานเชิงซ้อน ของช่องว่างประกาย ( Spark gap impedance ) จึงมีส่วนทำให้ไม่ทราบความขัดแย้งตรงนี้ได้

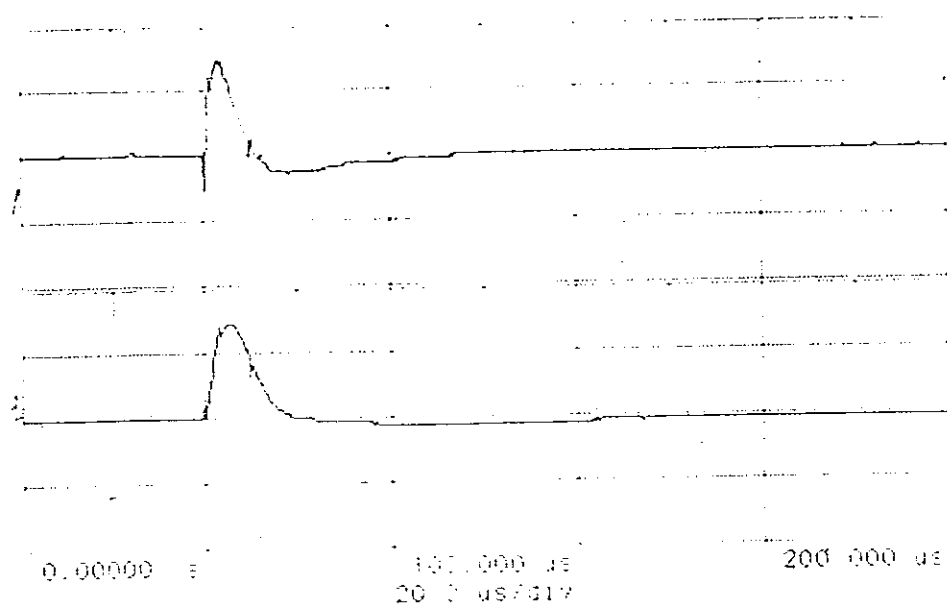
## 2. ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแสงที่ได้จากหลอด ฟลูออโร

ในการวัดแสงนี้ได้ใช้ไดโอดวัดแสงที่เรียกว่า บีพีเอ็กซ์ 65 ( BPX - 65 pin photodiode ) เป็นตัววัดแสงที่เกิดจากหลอดฟลูออโร ซึ่งได้ทำการวัดเทียบกับกระแสไฟฟ้า

ภาพประกอบ 48 แสดงสัญญาณ กระแสและแสงที่ได้จากหลอดฟลูออโร

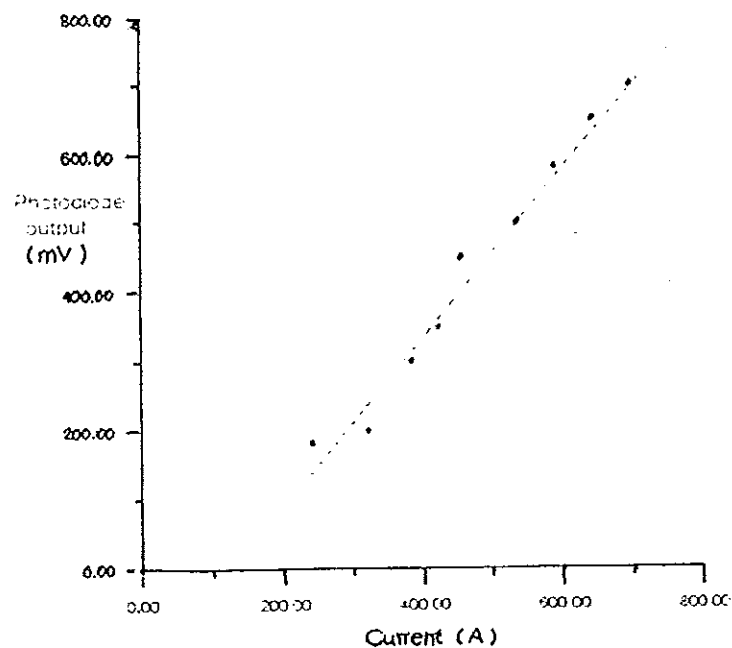
บน - สัญญาณกระแสไฟฟ้า 430 แอมแปร์ต่อช่อง

ล่าง - สัญญาณแสง 400 มิลลิโวลต์ ต่อช่อง ( mV / div )



จากรูปสัญญาณจะพบว่าสัญญาณของแสงจะขึ้นสูงสุดประมาณ 6 ไมโครวินาที ซึ่งจากสัญญาณจะพบว่าสัญญาณแสงจะออกมาในขณะที่สัญญาณของกระแสจะขึ้นพอดีในเวลาเดียวกัน แต่เมื่อสัญญาณของกระแสหมดแล้วสัญญาณแสงยังคงมีอยู่ เนื่องจากก๊าซภายในหลอดแฟลชที่เกิดจากการแตกตัว ( Ionization ) ยังคงมีอยู่และจากสัญญาณนี้จะพบว่าช่วงความกว้างของคาบสัญญาณแสงมีค่าประมาณ 20 ไมโครวินาที ซึ่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าและสัญญาณแสงเมื่อนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์จะได้กราฟแปรผันตรง

ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าของแสงที่ได้รับกับค่าของกระแสไฟฟ้า



## ตอนที่ 2 ผลของการศึกษาคุณสมบัติและหลักการของเทคนิคการ ถ่ายภาพแบบซโรเรน

ในตอนนี้จะได้แสดงผลของการศึกษาคุณสมบัติและหลักการของ เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรน โดยได้มาจากการทดสอบและทดลองกับปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปแบบต่างๆ โดยภาพของผลการทดลองนี้ได้ถ่ายซ้ำจากภาพโพลาไรซ์อาจทำให้รายละเอียดของปรากฏการณ์ไม่เด่นชัดเท่าที่ควรและผลของการศึกษาได้แบ่งออกเป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. ผลของการทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรน โดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง
2. ผลการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนถ่ายภาพปรากฏการณ์ฟิสิกส์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนชนิดใช้กระจกคู่เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและนำไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์อื่นๆต่อไป

### 1. ผลของการทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนโดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง

ในหัวข้อนี้ได้ใช้หลอดแฟลชที่ได้สร้างขึ้นเป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อดูว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้หรือไม่ ซึ่งจะทำให้ได้ประโยชน์ในการออกแบบแนวทางการทดลองต่อไป ในที่นี้จะสามารถแบ่งผลการศึกษาที่ได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

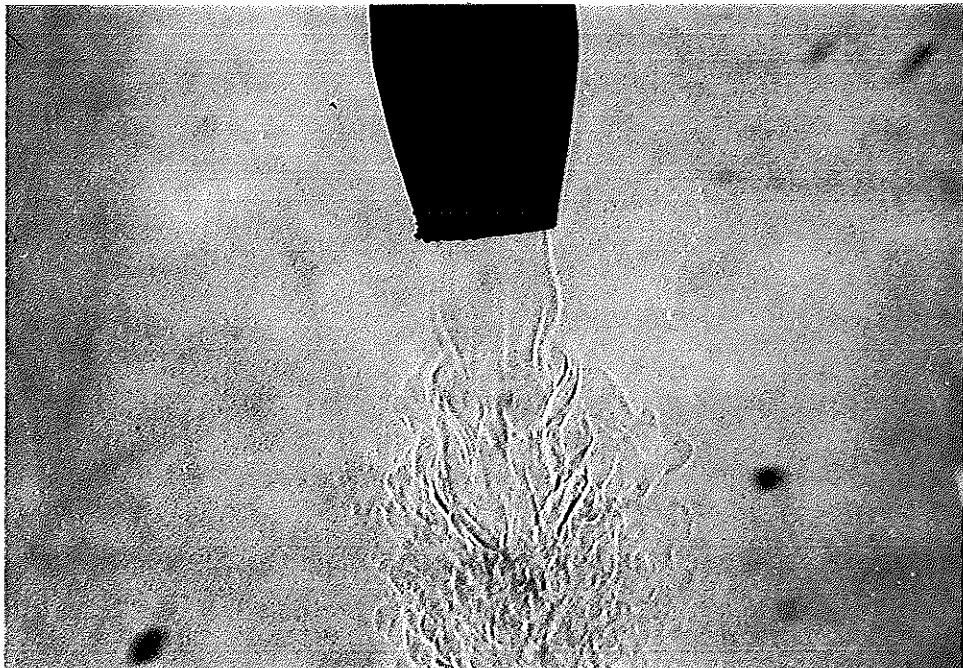
1.1 ผลของการติดตั้งระบบการถ่ายภาพกับหลอดแฟลช ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อดูความสว่างของแสงที่ตกลงบนฟิล์ม โดยดูจากตัวภาพที่ออกมาและเป็นการหาความคมชัดของตัวภาพด้วย

1.2 ผลของการทดสอบระบบของเทคนิคซโรเรน ซึ่งได้ออกแบบขึ้นมาว่ามีประสิทธิภาพพอที่จะสามารถใช้ถ่ายภาพปรากฏการณ์ที่ไม่มีแสงออกมาได้หรือไม่ โดยอาศัยอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและมีการเคลื่อนที่เป็นวัตถุ

ภาพประกอบ 50 ภาพของหัวฉีดเครื่องปั๊มลมที่วางเป็นวัตถุเพื่อทดสอบความเปรียบต่าง ( Contrast ) ระหว่างแสงจากหลอดแฟลชกับวัตถุที่ตกกระทบบนฟิล์ม



ภาพประกอบ 51 ภาพของลมที่มีอุณหภูมิสูง ( ประมาณ 500 องศาเซลเซียส ) ที่พ่นออกมาจากเครื่องพ่นลมเพื่อดูประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายภาพแบบซไวเรนที่ผู้วิจัยได้ออกแบบ



## 2. ผลการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนถ่ายภาพปรากฏการณ์

### ฟิลิกส์

ในหัวข้อนี้ผลการวิจัยแสดงเป็นภาพถ่าย โดยใช้ปรากฏการณ์ฟิลิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นวัตถุและในที่นี้จะใช้หลอดแฟลช เป็นแหล่งกำเนิดแสง ดังที่ได้เสนอในวิธีการวิจัยไปแล้วช่วงต้นดังนั้นจะขอแบ่งผลการทดสอบเทคนิค ดังกล่าวออกตามลักษณะของปรากฏการณ์

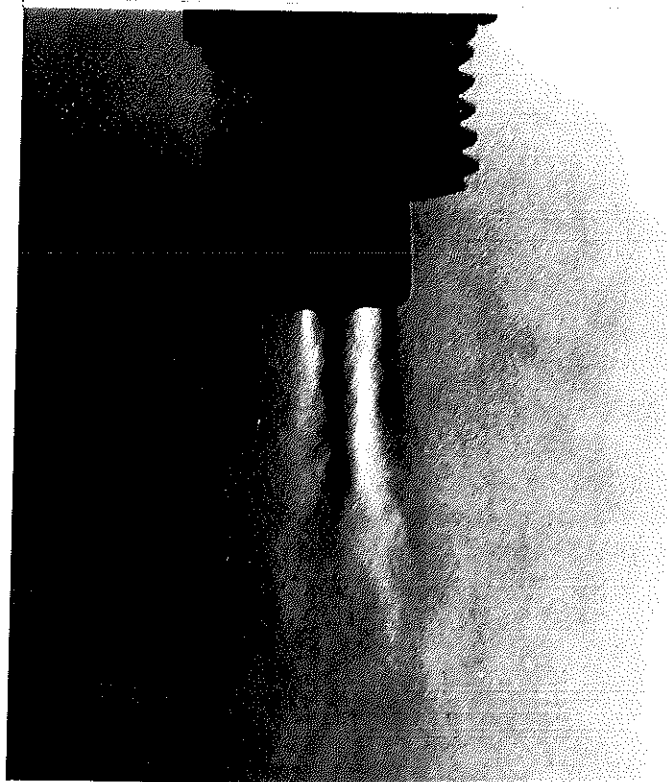
2.1 ผลของการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรกับก๊าซที่ปล่อยออกมาด้วยความเร็วสูง ซึ่งในที่นี้ได้ใช้หัวปล่อยก๊าซในลักษณะต่างๆเพื่อจะได้ดูว่ารูปแบบหัวฉีดที่ใช้ปล่อยก๊าซลักษณะต่างๆมีผลต่างกันอย่างไร

2.1.1 ผลการให้หัวเจ็ทพลาสมาเป็นหัวปล่อยก๊าซความเร็วสูง ซึ่งผู้วิจัยได้ถ่ายภาพทั้งลักษณะที่เป็นหัวเจ็ทพลาสมาแบบปกติและแบบที่ใช้ท่อส่งก๊าซขนาดเล็กต่อกับหัวเจ็ทพลาสมาโดยแบบหลังนี้ได้เปลี่ยนความดันที่ค่าต่างๆกันด้วย

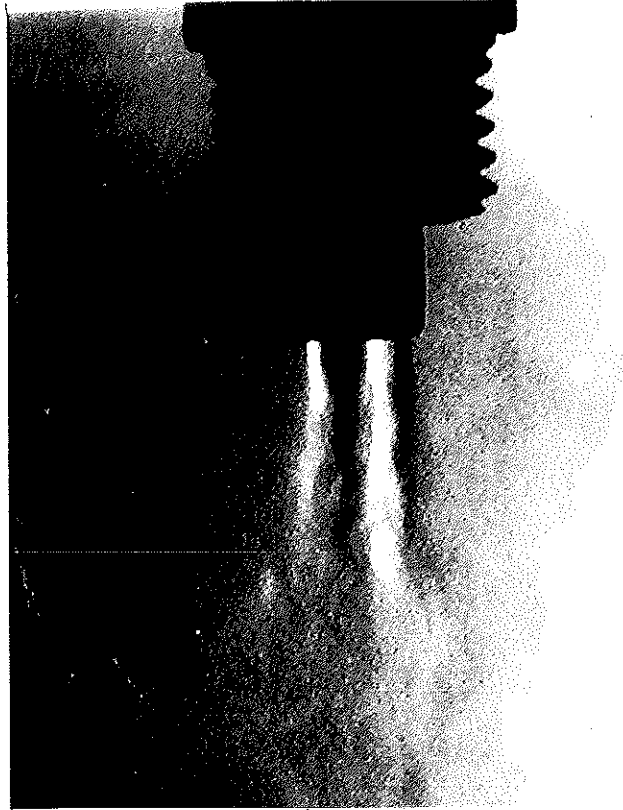
2.1.1.1 ผลการใช้หัวเจ็ทพลาสมาปล่อยก๊าซออกมา โดยต่อหัวส่งก๊าซขนาดเล็กดังภาพที่ 42 เข้ากับหัวของเจ็ทพลาสมาและได้ปรับค่าความดันของ ก๊าซที่ค่าต่างๆกัน

ภาพประกอบ 52 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ทพลาสมาที่

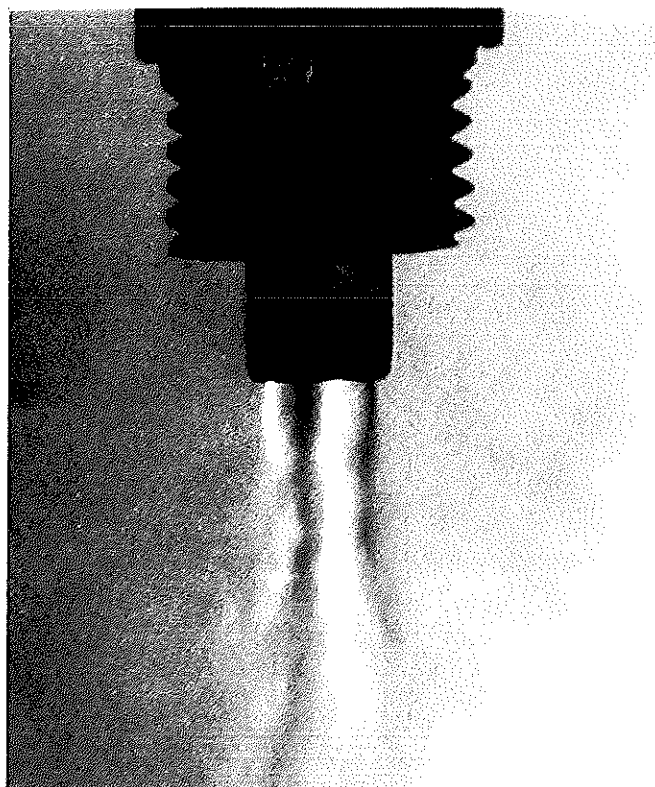
ต่อหัวส่งก๊าซ ( ค่าความดัน ประมาณ 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )



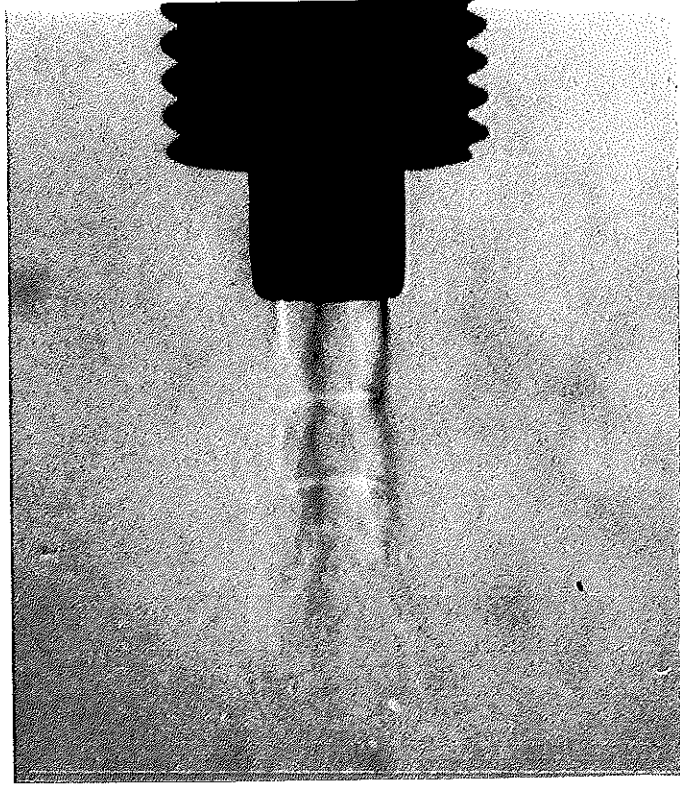
ภาพประกอบ 53 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ดพลาสติกต่อหัว  
ส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )



ภาพประกอบ 54 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ดพลาสติกต่อหัว  
ส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )



ภาพประกอบ 55 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ดพลาสมาที่ต่อหัว  
ส่งก๊าซ ( ค่าความดันประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )



ภาพประกอบ 56 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซอาร์กอนที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ดพลาสมา  
แบบปกติซึ่งมีแรงดันในการส่งก๊าซประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

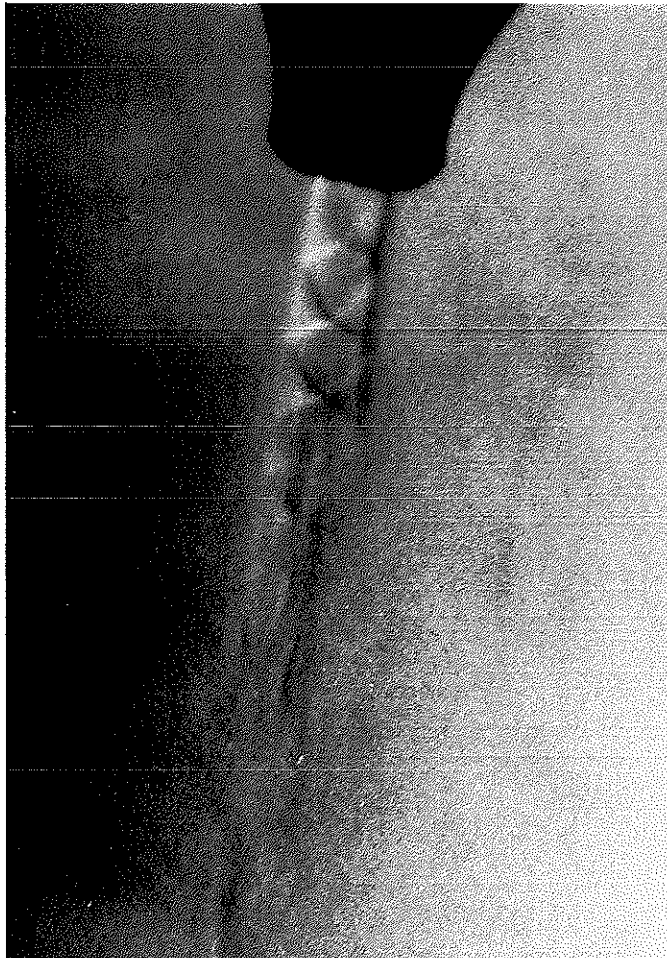




2.1.1.2 ผลของการใช้หัวเจ็ตพลาสมา แบบปกติปล่อย  
ก๊าซ ออกมา โดยใช้ก๊าซอาร์กอน

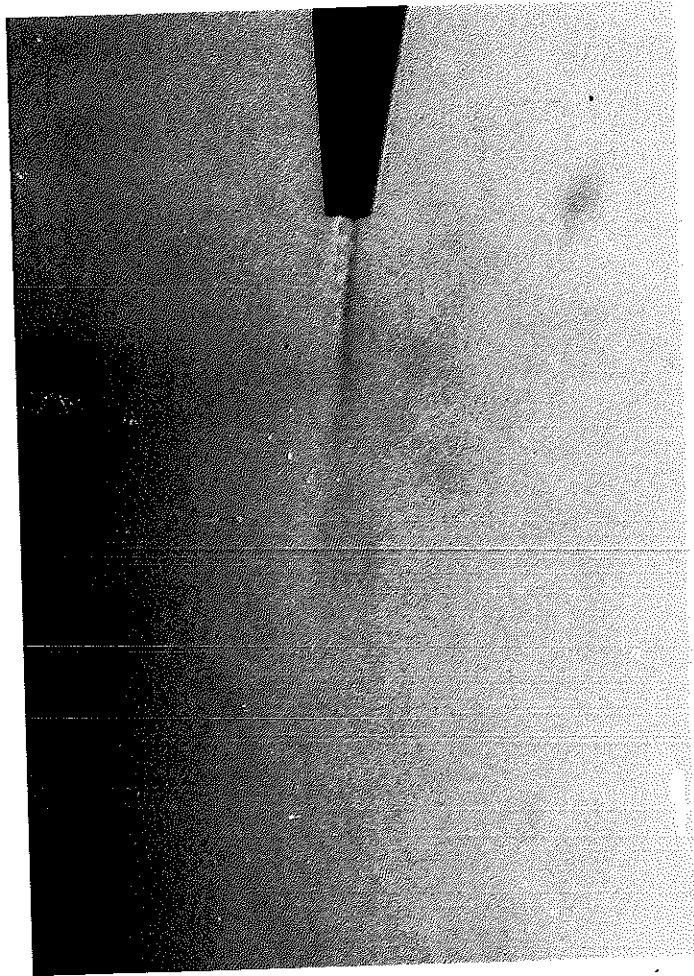
2.1.2 ผลการใช้หัวฉีดท่อปั๊มลมความดันสูงเป็นหัวปล่อยก๊าซ ซึ่ง  
เป็นอุปกรณ์ของเครื่องปั๊มลมแรงดันสูง

ภาพประกอบ 57 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวท่อปั๊มลมแรงดันสูง  
ซึ่งในที่นี้เป็นอากาศปกติ ( Air ) ซึ่งมีแรงดันของก๊าซ  
ประมาณ 7.8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



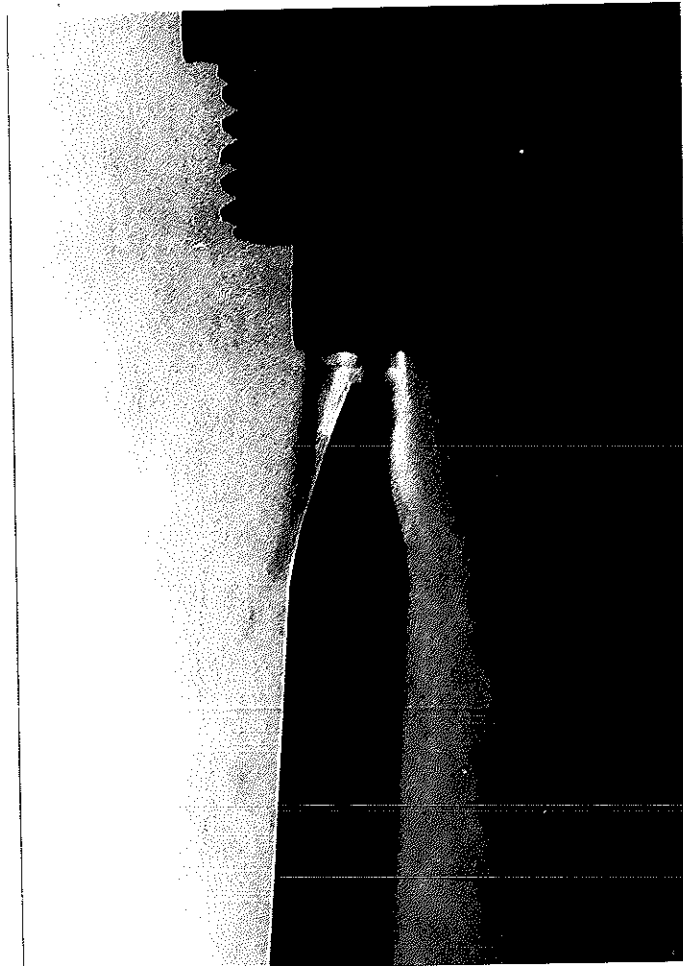
### 2.1.3 ผลการใช้ท่อพลาสติกกรวยแหลมเป็นหัวปล่อยก๊าซ

ภาพประกอบ 58 ภาพถ่ายลักษณะของก๊าซที่พุ่งออกมาจากท่อพลาสติกกรวยแหลม ด้วยความเร็วสูง ซึ่งในที่นี้เป็นก๊าซไนโตรเจน (แรงดันของก๊าซประมาณ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)



2.2 ผลการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรนกับการแหวกตัวของก๊าซเมื่อผ่านวัตถุ ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้ใช้เข็มปลายแหลมเป็นวัตถุดังกล่าว โดยที่ก๊าซที่พุ่งออกมาใช้ลักษณะเดียวกันกับ หัวข้อ 2.1.1.1 ของบทนี้

ภาพประกอบ 59 ภาพถ่ายการแหวกตัวของก๊าซเมื่อผ่านวัตถุปลายแหลม  
( ความดันของก๊าซประมาณ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )

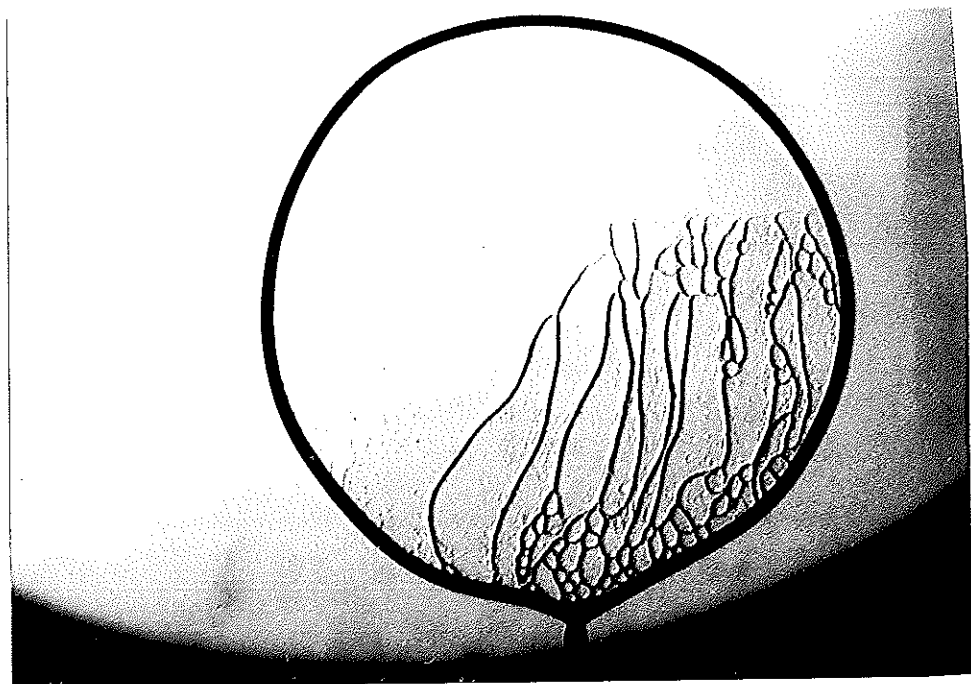


2.3 ผลของการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซไโรเรนกับปรากฏการณ์ฟองสบู่  
ซึ่งผู้วิจัยได้ผสมกลีเซอรินกับแชมพูสระผมเข้าด้วยกันเพื่อเป็นน้ำในการทำให้เกิดฟอง  
โดยที่ผู้วิจัยทำลักษณะรูปแบบเป็น 2 แบบคือ แบบฟองกลมและแบบแผ่นฟิล์ม  
ที่ใช้หลอดวงกลมสร้างขึ้น

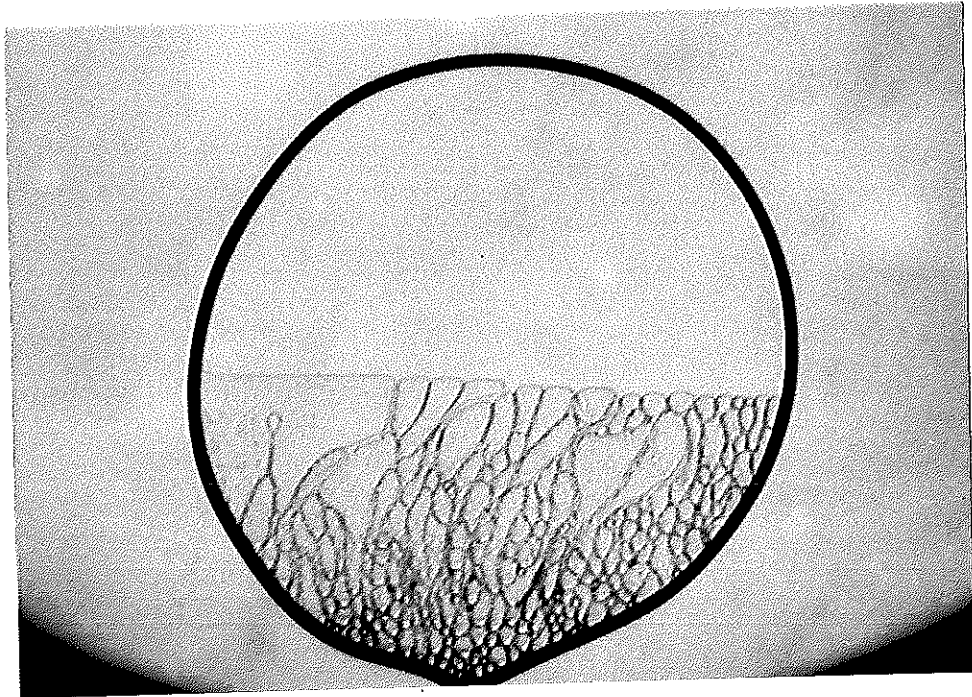
ภาพประกอบ 60 ภาพถ่ายฟองสบู่แบบทรงกลม



ภาพประกอบ 61 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มฟองสบู่ที่กำลังเริ่มจะสลายตัวลงด้านล่าง  
( เป็นภาพแผ่นฟิล์มในแนวตั้ง ) ระยะที่ 1



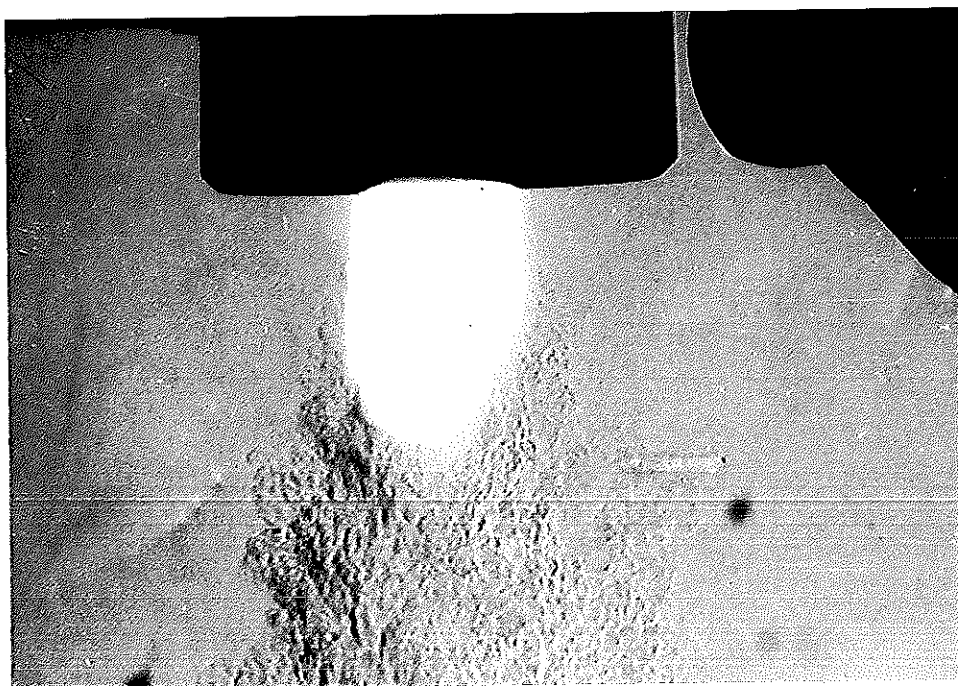
ภาพประกอบ 62 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มฟองสบู่ที่กำลังเริ่มสลายตัวลงด้านล่าง ระยะที่ 2



2.4 ผลของการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชโรเรนกับเปลวเจ็ดพลาสมา โดยมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นชัตเตอร์ ( Shutter ) ช่วยตัดแสงบางส่วนในช่วงของเปลวเจ็ดพลาสมาในขณะที่ถ่ายภาพ ซึ่งได้ใช้กระแสในการเกิดเจ็ดพลาสมา ประมาณ

50 แอมแปร์ ที่ความดันก๊าซอาร์กอน 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยศักย์ไฟฟ้า  
ที่ป้อนให้กับหลอดแฟลชประมาณ 12 กิโลโวลต์

ภาพประกอบ 63 ภาพถ่ายเปลวของเจ็ตพลาสมา ที่ความดัน 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ในการเกิดเจ็ตกระแสประมาณ 50 แอมแปร์



2.5 ผลการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซไวเรนกับการอาร์คของหัวเทียนรถยนต์ที่ใช้เป็นวัตถุ เพื่อดู คลื่นช็อก ( Shock wave )

ภาพประกอบ 64 การถ่ายภาพการอาร์คของหัวเทียนรถยนต์ที่ได้จากการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซไวเรน โดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง



## บทที่ 5

### บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 4 รวมไปถึงข้อเสนอแนะในการวิจัยและปัญหา ทั้งนี้เพื่อแสดงเหตุผลและวิเคราะห์ถึงความผลการวิจัยให้ชัดเจนขึ้นว่าเหตุใดผลการวิจัยจึงเป็นเช่นนั้น โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นข้อๆตามลักษณะผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนโดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง

การสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะกับปัญหาจะได้กล่าวไว้ในท้ายบทต่อไป

การวิเคราะห์เทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนโดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง

ในหัวข้อนี้จะได้วิเคราะห์ตามลำดับผลการวิจัยตามบทที่ 4 เป็นข้อๆดังนี้

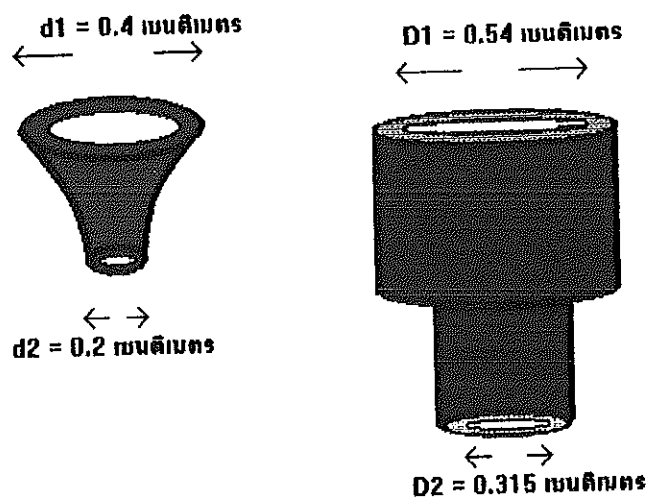
1 การทดสอบเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรนว่าสามารถปฏิบัติงานได้จริงหรือไม่ โดยใช้ลมที่มีอุณหภูมิสูงเป็นวัตถุซึ่งถูกปล่อยออกมาจากเครื่องพ่น จากภาพที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถปฏิบัติงานได้จริงเนื่องจากสามารถที่จะบันทึกภาพลมที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน ( Turbulent flow ) และแบบราบเรียบ ( Laminar flow ) ผสมกันอยู่ ซึ่งแบบปั่นป่วนนั้นจะมีค่าเกรเดียนท์ของความเร็ว ( Velocity gradient ) สูงกว่าการไหลแบบราบเรียบและในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนเรียกว่า แถบการเดินทาง ( Transition zone ) และตัวแปรที่สำคัญอีกตัวนั้นคือ ค่าเรโนลด์ ( Renold number ,  $R_e$  ) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 15 ดังนั้นจากภาพสามารถบอกได้ว่าค่าเรโนลด์ของลมที่ออกมาจากเครื่องพ่นลมนั้นมีค่ามากกว่า  $10^5$  ถึงแม้ความเร็วของลมจะไม่สูงในระดับเหนือเสียง ( Supersonic ) แต่เทคนิคนี้สามารถบันทึกภาพได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของลมร้อนที่พุ่งออกมาจึงทำให้ทราบลักษณะการเคลื่อนที่ของลมหรืออากาศที่พุ่งออกมาได้ ดังนั้นทำให้สามารถสรุปในขั้นต้นได้ว่าเทคนิคการถ่ายภาพแบบซโรเรน



โดยใช้หลอดแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสงมีประสิทธิภาพที่เพียงพอในการถ่ายภาพปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ไม่มีแสงออกมาและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

2. การใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซุเปอร์โซนิกกับก๊าซที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว มากกว่าเสียง ( Supersonic ) จากผลการวิจัยในบทที่ 4 นั้นได้ใช้ก๊าซที่เคลื่อนที่ในสถานะต่างๆกันเช่น ความดันต่างกัน , ขนาดของช่องปล่อยก๊าซต่างกัน เป็นต้น จึงทำให้มีผลต่อความเร็วและลักษณะการไหลของก๊าซ โดยที่สามารถจะหาความเร็วของก๊าซที่ออกมาได้จากสมการแบร์นูลลี ( Bernoullie equation ) ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยการนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหัวฉีดและช่องขอบคม ( Orifice ) ของหัวฉีดของเครื่องปั๊มลมความดันสูงและหัวฉีดที่ต่อกับหัวเจ็ทพลาสมา

ภาพประกอบ 65 รูปลักษณะขนาดหัวฉีดของเครื่องปั๊มลมความดันสูงและหัวฉีดที่ต่อกับหัวเจ็ทพลาสมา



จากภาพที่ 65 จะมีค่าต่างๆดังนี้

$$d_1 \approx 4.0 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$d_2 \approx 2.0 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

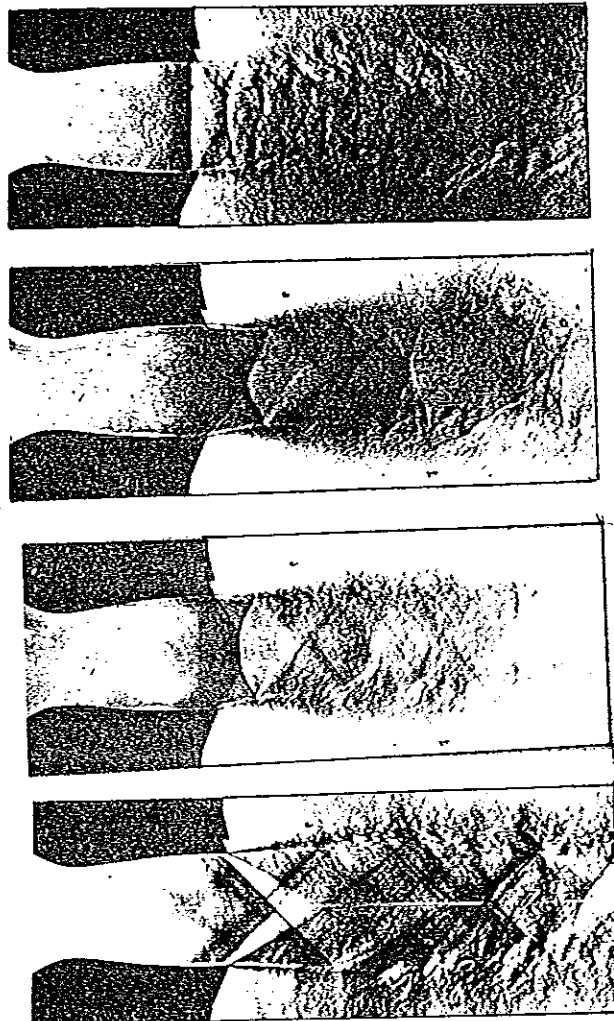
$$D_1 \approx 5.4 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

$$D_2 \approx 3.15 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

เมื่อนำค่า  $d_1$  และ  $d_2$  แทนค่าในสมการที่ 9 จะได้ออกมาดังสมการที่ 11 และ จากสมการที่ 11 แทนค่าลงในสมการที่ 6 โดยที่ค่าความหนาแน่น ( Density ,  $\rho$  ) ของอา

ภาคที่อุณหภูมิจึง ( ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ) เท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (  $\text{kg/m}^3$  ) และค่าความดันเริ่มต้นเท่ากับ 7.8 ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือ  $5.377 \times 10^5$  นิวตันต่อตารางเมตร จะได้ค่าความเร็วของก๊าซที่ถูกปล่อยจากหัวฉีด (  $V_2$  ) เท่ากับ 967 เมตรต่อวินาที ซึ่งค่าที่ได้มีความเร็วมกกว่าความเร็วเสียงจากการวิจัยของห้องปฏิบัติการฟิสิกส์แห่งชาติ สหรัฐอเมริกา ( National Physical Laboratory , USA. ) พบว่าถ้าก๊าซเคลื่อนที่ออกจากช่องขอบคมหรือหัวฉีดใดๆที่มีความเร็วมกกว่าความเร็วเสียงจะทำให้เกิดการอัดตัว ( Shock ) ของการไหลของก๊าซในลักษณะต่างๆ ซึ่งขึ้นกับรูปแบบของช่องทางปล่อยก๊าซว่าเป็นแบบใดเช่น รามเรียบ , เป็นเกลียวหรือเป็นแบบข้อต่อ เป็นต้น

ภาพประกอบ 66 ลักษณะการเกิดการอัดตัวของก๊าซเมื่อความดันภายในมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ( โดยเรียงจากค่าความดันต่ำไปค่าความดันสูง )



( จากหนังสือ Incompressible Flow. New York : John-Wiley )

ในการเกิดการอัดตัวนั้นจะเกิดได้มากขึ้นเมื่อค่าความดันภายในมีค่ามากกว่าค่าความดันบรรยากาศ ( $P_{atm}$ ) ดังนั้นเมื่อได้นำค่าความเร็วที่ได้ของลมที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดเครื่องปั๊มลมความดันสูงกับค่าความดันที่ใช้มาเปรียบเทียบกับรูปถ่ายที่ได้ดังภาพที่ 57 พบว่ามีความสอดคล้องกันจริงและสามารถเห็นการอัดตัวของก๊าซอย่างชัดเจน เนื่องจากค่าความดันภายในมีค่าสูงกว่าภายนอกมาก ๆ ( สูงกว่า  $1.01325 \times 10^5$  นิวตันต่อตารางเมตร ) และจากรูปที่ 66 แสดงว่าเมื่อค่าความดันภายในสูงขึ้นเรื่อยๆลักษณะการอัดตัวจะชัดเจนยิ่งขึ้น ( ที่มา : National Physical Laboratory , USA. ) ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อความดันสูงขึ้นลักษณะการเกิดการอัดตัวของก๊าซจะเปลี่ยนไป จึงได้ทดลองและนำผลที่ได้จากภาพในหัวข้อ 2.1.1.1 มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วของก๊าซ โดยการนำค่า  $D_1$  และ  $D_2$  แทนค่าในสมการที่ 9 จะทำให้ได้สมการที่ 12 ดังนั้นนำสมการที่ 12 แทนลงในสมการที่ 6 โดยที่ค่าความหนาแน่นก๊าซอาร์กอน ( Ar ) เท่ากับ 1.691 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะทำให้ได้ค่าความเร็วของก๊าซที่ออกจากหัวฉีด ( $V_2$ ) ที่ค่าความดันต่างๆดังนี้

ความดัน ( P ) ( ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	ความดัน ( P ) ( นิวตันต่อตารางเมตร )	ความเร็วที่ออกจากหัวฉีด ( $V_2$ ) ( เมตรต่อวินาที )
60	$4.136 \times 10^5$	743.87
70	$4.826 \times 10^5$	803.47
80	$5.515 \times 10^5$	858.95
90	$6.205 \times 10^5$	911.05

จากค่าความเร็วของก๊าซที่คำนวณได้เมื่อค่าความดันในแต่ละค่านั้นจะพบว่าเมื่อค่าความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วของก๊าซจะเพิ่มขึ้นด้วยในลักษณะแปรผันตรง ( $P \propto V$ ) และเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับรูปถ่ายดังภาพที่ 52 ถึง 55 นั้นพบว่ามีความสอดคล้องกันนั่นคือ เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นและค่าความดันเพิ่มขึ้นลักษณะการเกิดการอัดตัวของก๊าซจะยิ่งชัดเจนขึ้นจนถึงจุดสภาวะคงตัวดังรูปที่ 55 และผลที่ได้พบว่าสอดคล้องกับผลของห้องปฏิบัติการฟิสิกส์แห่งชาติ , สหรัฐอเมริกา ถ้าหากเปรียบเทียบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดทั้งสองจะเห็นได้ว่าที่ค่าความดันใกล้เคียงกันนั้น ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะทำให้ก๊าซเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และถ้าหากดูจากภาพที่ 56 นั้นแสดง

ว่าก๊าซที่ออกมามีความเร็วต่ำ ถึงแม้จะมีค่าความดันเริ่มต้นสูงแต่เนื่องจากว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจ็ทพลาสมา มีขนาดใหญ่ ( ประมาณ  $6.0 \cdot 10^{-2}$  เมตร ) จึงทำให้ก๊าซเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้า นอกจากนี้ข้อมูลในเบื้องต้นสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการไหลสภาพต่อเนื่องของก๊าซได้ โดยใช้สมการที่ 13 ในการคำนวณนั้นเนื่องจากเราทราบค่า  $V_2$  ดังนั้นสามารถหาค่า  $V_1$  ได้จากสมการที่ 11 และ 12 แล้วแต่กรณีว่าใช้เครื่องปั๊มลมความดันสูงหรือให้หัวเจ็ทพลาสมาเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซความสูง ดังนั้นในกรณีของการใช้เครื่องปั๊มลมความดันสูง หาค่า  $V_1$  จากสมการที่ 11 ได้ค่า  $V_1$  เท่ากับ 241.75 เมตรต่อวินาที แทนค่าในสมการที่ 13 หาค่าอัตราการไหลเท่ากับประมาณ  $3.037 \cdot 10^{-3}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และในกรณีของการใช้หัวฉีดขนาดเล็กต่อกับหัวเจ็ทพลาสมา หาค่าความเร็วเริ่มต้นของแต่ละกรณีที่มีค่าความดันต่าง ๆ กันได้จากสมการที่ 12 และหาค่าอัตราการไหลในแต่ละค่าจากสมการที่ 13 ได้ผลดังนี้

ความดัน ( ปอนด์ต่อตารางนิ้ว )	ความเร็วต้น ( $V_1$ ) ( เมตรต่อวินาที )	อัตราการไหล ( $Q$ ) ( ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที )
60	253.06	$5.79 \cdot 10^{-3}$
70	273.34	$6.26 \cdot 10^{-3}$
80	292.21	$6.69 \cdot 10^{-3}$
90	309.93	$7.09 \cdot 10^{-3}$

จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความดันเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ( $P \propto Q$ ) และจะสังเกตได้ว่าค่าความเร็วของก๊าซขณะเริ่มต้นจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วเสียงแต่เมื่อผ่านช่องขอบคมที่มีขนาดเล็กลงจึงทำให้ก๊าซถูกอัดตัวและพุ่งออกมาทันทีทันใดด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียง ดังนั้นจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการอัดตัวของของไหลในรูปแบบดังภาพที่ได้จากการวิจัยซึ่งถ่ายโดยเทคนิคไซโรเรน โดยรูปภาพที่ได้นั้นเป็นการเน้นให้เห็นถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวได้อย่างชัดเจนซึ่งปกติเราไม่สามารถใช้วิธีถ่ายภาพแบบปกติ ดังนั้นจากที่กล่าวมาแสดงว่าเทคนิคการถ่ายภาพแบบไซโรเรนสามารถจะบันทึกภาพลักษณะการไหลของก๊าซได้อย่างชัดเจนและจากภาพทำให้บอกถึงลักษณะพลศาสตร์ของก๊าซ ( Gas dynamic ) ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

### 3. การใช้เทคนิคซีโรเรนกับปรากฏการณ์ฟองสบู่

จากภาพถ่ายที่ได้ในลักษณะฟองสบู่แบบทรงกลมพบว่า ความหนาแน่นแต่ละตำแหน่งของฟองไม่เท่ากัน โดยดูได้จากความเข้มของภาพในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งปกติเราจะมีลักษณะใสแบบปกติจากภาพเราก็สามารถเห็นแนวการไหลของของเหลวที่อยู่ติดกับผิวฟิล์มว่ามีการไหลอย่างกระจายจากบนลงล่าง ถ้าหากพิจารณาจากภาพฟองสบู่ที่เป็นแบบฟิล์มบางดังรูปที่ 61 และ 62 ฟิล์มกำลังสลายตัวลงด้านล่างจะเห็นว่ามีความเป็นแผ่นฟิล์มเล็กๆขนาดต่างๆกันอยู่รวมกันทำให้เห็นว่าแรงตึงผิว ( Surface tension ) ของแผ่นฟิล์มมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่งและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อแผ่นฟิล์มเริ่มสลายตัวแต่แผ่นฟิล์มเล็กๆเหล่านั้นก็สามารถยึดติดอยู่ด้วยกันเพราะ แรงยึดติด ( Cohesion force ) ดังนั้นจะเห็นว่าเทคนิคซีโรเรนมีความสามารถในการบันทึกภาพการเกาะตัวของแผ่นฟิล์มฟองสบู่ได้

### 4. การใช้เทคนิคซีโรเรนกับเปลวของเจ็ตพลาสมา

เนื่องจากแสงของตัวเปลวเจ็ตมีความเข้มสูงมากและยังสามารถกำเนิดรังสีเหนือม่วงในช่วงคลื่นที่ตัวกรองแสงยอมรับได้อีกด้วยและเนื่องจากเครื่องกำเนิดเจ็ตพลาสมาที่ใช้ได้ตัดแปลงมาจากเครื่องอาร์คที่ใช้สำหรับตัดโลหะ ซึ่งคุณสมบัติภายในเปลวนั้นจะต้องมีการกระจายของความร้อนที่เท่าๆกัน ( Thermal equilibrium ) และสม่ำเสมอ ดังนั้นความแตกต่างของตัวเปลวเจ็ตจึงมีน้อยมากๆ เพราะฉะนั้นจึงได้ศึกษาแต่เพียงการกระจายความร้อนที่พุ่งออกมาจากเปลวด้วยความเร็ว  $V$  ที่ได้จากความดันเริ่มต้น ( ประมาณ 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ) ซึ่งจากภาพนั้นจะเห็นการไหลของความร้อนบริเวณรอบนอกเปลว อย่างชัดเจน โดยที่ความร้อนที่บริเวณความหนาแน่นสูงจะมีการกระจายออกแบบสามเหลี่ยมซึ่งมีการไหลแบบปั่นป่วน ( Turbulant ) นั้นก็คือจะมีค่าเรโนลด์มากกว่า  $10^5$  และทำให้ทราบว่ามีการกระจายของไอก๊าซร้อนที่ความเข้มสูงจะมีขอบเขตแน่นอน คือ ไม่เป็นแบบฟุ้งกระจาย

5. การใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบซีโรเรนกับการอาร์คของหัวเทียนรถยนต์โดยใช้การบังคับการปิดเปิดรับแสงด้วยมือ เพื่อไม่ให้แสงจากหัวเทียนรบกวนฟิล์ม ซึ่งจากภาพที่ได้พบว่าเทคนิคนี้ยังสามารถถ่ายภาพวัตถุที่มีแสงความเข้มต่ำได้แต่ยังไม่สามารถเห็นได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจากยังมีปัญหาในเรื่องของแสงรบกวนจากวัตถุและความเร็วในการปิดเปิดหน้ากล้อง ( Shutter speed ) ดังนั้นภาพที่ได้ในส่วนใจกลางอาร์คจึงไม่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากมีความเข้มของแสงสูงมากแต่ถึงอย่างไรเรายังสามารถเห็นแนวการอาร์คในบริเวณรอบนอกของหัวที่เกิดการอาร์คได้

โดยที่การอาร์คเป็นลักษณะโค้งออกจากหัวดั่งภาพที่ปรากฏในบทที่ 4 และทำให้สรุปได้ข้างต้นอีกอย่างหนึ่งว่าหากวัตถุมีแสงออกจากตัววัตถุเข้มเกินไป ( เข้มกว่าแหล่งกำเนิดแสง ) จะทำให้ไม่สามารถถ่ายภาพของวัตถุนั้นๆได้ อาจยกตัวอย่างเปรียบเทียบระบบการถ่ายภาพทั่วไปคือ หากเราถ่ายภาพแสงจากหลอดไฟที่ให้แสงที่มีความเข้มสูง ภาพที่ออกมาจะเป็นลักษณะสว่างมากจนภาพเพี้ยน ( Distortion )

## สรุป

ในการสรุปนี้จะกล่าวเป็นข้อๆตามผลและการวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพและขีดจำกัดของเทคนิคการถ่ายภาพแบบขไรเรนสำหรับการวิจัยนี้

1 เทคนิคขไรเรนเหมาะสำหรับปรากฏการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหหลายๆ เช่น การเคลื่อนที่ของไอความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและก๊าซที่เคลื่อนที่ในระดับความเร็วเสียงหรือสูงกว่า ซึ่งทำให้ทราบลักษณะทางพลศาสตร์ของก๊าซได้

2 แสงจากหลอดแฟลชที่สร้างขึ้น มีความเหมาะสมที่จะใช้กับปรากฏการณ์ฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่จะต้องไม่มีแสงออกมาหรือน้อยมาก และค่าศักย์อัดประจุในการกำเนิดแสงที่เหมาะสมประมาณ 10 กิโลโวลต์และสามารถสรุปคุณสมบัติของหลอดแฟลชได้ดังนี้

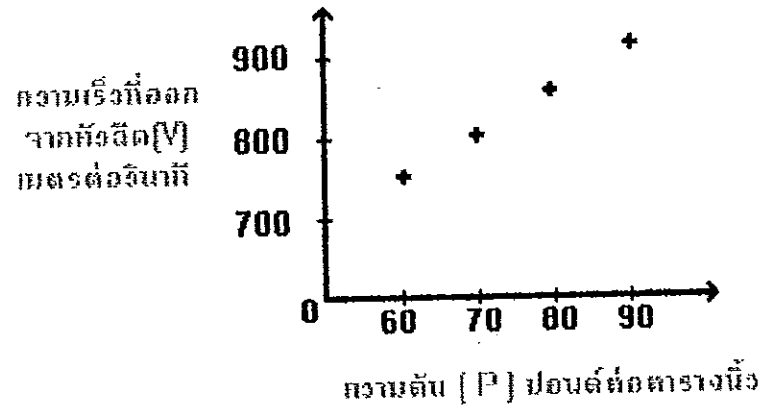
2.1 ค่าศักย์ในการอัดประจุและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นั้น มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง

2.2 ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความสว่างของแสงหลอดแฟลช มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง

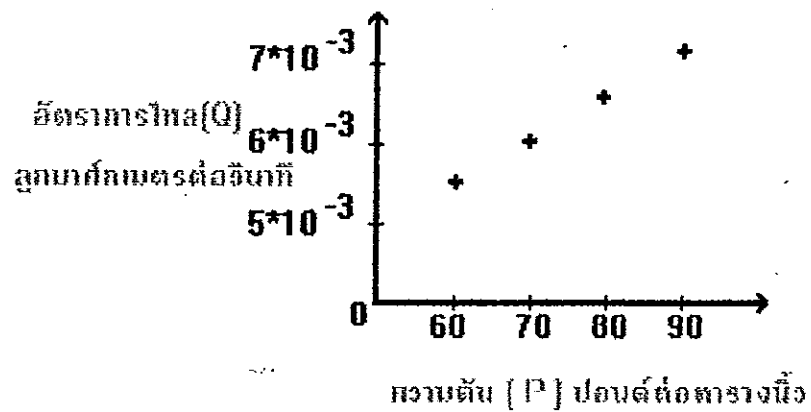
## 3. สรุปผลของปรากฏการณ์

3.1 ความเร็วของก๊าซขึ้นกับความดัน โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง (  $P \propto V$  ) และขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องขอบคมของหัวฉีด โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน (  $V \propto 1/A$  ) ที่ค่าความดันค่าใดค่าหนึ่งและสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ความเร็วของก๊าซกับค่าความดันได้ดังนี้

ภาพประกอบ 67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซกับค่าความเร็วก๊าซ  
ที่ออกจากหัวฉีด



ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของ  
ก๊าซ



3.2 ความดันของก๊าซกับอัตราการไหลของก๊าซจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง ( $P \propto Q$ ) โดยแสดงรูปแบบกราฟได้ดังภาพที่ 64

3.3 เมื่อก๊าซมีความเร็วเพิ่มขึ้น รูปแบบการอัดตัวของการไหลจะเปลี่ยนไปจนถึงสภาวะคงตัวที่มีรูปแบบแน่นอนและค่าความดันภายในต้องมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศ

3.4 รูปแบบของการอัดตัวที่สภาวะคงตัวจะเป็นไปตามรูปแบบภายในของรูหัวฉีด ( Nozzle )

3.5 ความเร็วของก๊าซที่ความดันสูงจะมีค่าความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียง

4. แผ่นฟิล์มฟอสฟอรัสจะมีความหนาแน่นในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน

5. การกระจายตัวของความร้อนที่บริเวณเปลวเจ็ตพลาสมาเป็นลักษณะมีขอบเขตและเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ( Turbulant )

#### ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้วิจัยคนอื่นที่สนใจแนวทางในการวิจัยนี้ ซึ่งจะได้กล่าวเป็นข้อๆ ดังนี้

1. เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นตัวสำคัญอย่างหนึ่ง ในระบบที่เราเรานั้นอาจปรับปรุงโดยใช้แสงที่มีความเข้มสูงกว่านี้และเพื่อตัดปัญหาเรื่องแสงรบกวนจากภายนอกควรใช้แสงโดยเฉพาะ เช่น แสงเลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพ เป็นต้น แต่ควรต้องมีตัวกรองแสงหรือตัวตัดแสงอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องโดยมิให้มารบกวนฟิล์ม เช่น ตัวเลือกแสงเหนือม่วง ( Ultraviolet filter ) เป็นต้น

2. ในกรณีที่ว่าวัตถุมีแสงออกมาอย่างต่อเนื่อง ควรจะมีระบบการเปิดปิดหน้ากล้อง ( Shutter ) ที่มีความไวสูง ซึ่งในการวิจัยนี้มีปัญหาด้านนี้มากเนื่องจากไม่สามารถตัดแสงรบกวนจากเจ็ตพลาสมาได้ เพราะเจ็ตพลาสมาเป็นลักษณะต่อเนื่อง

3. ควรมีการทดสอบหลาย ๆ เทคนิค เพื่อว่าจะได้ทราบในแต่ละเทคนิคแตกต่างกันอย่างไร ถึงกระนั้นก็ตามในทางปฏิบัติจะมีปัญหามากทั้งทางด้านเทคนิคและงบประมาณ



## บรรณานุกรม

- ธนิต พุดพิมพ์. 2523. กลศาสตร์ของไหลประยุกต์. กรุงเทพฯ : เจริญชาญ .
- สุรจติ ประดิษฐานนท์. 2529. กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 2.  
กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น .
- Eastman Kodak Company. 1960. Schlieren Photography. New York , U.S.A. .
- Gonez, J.H., 1965. "Resistivity of Xenon Plasma" , J. Appl. Phys. , 36(1965) ,  
742-743 .
- Hecht, E. and Zajac, A. 1974. Optics. New york : Addison - Wesley .
- Hirsch, Merle N. and Oskam, H.J. 1978 Gaseous Electronics : Electrical  
Discharges , Florida : Academic Press .
- Hutchinson, J.H., 1987. Principles of Plasma Diagnostics . New York :  
Cambridge.
- Jagoda, T.J. and Weinberg, F.J., 1980. "Optical Studies of Plasma Jets" ,  
J. Phys D : Appl. Phys. 13(1980) , 551-561 .
- Lee, S., Alabrara, M.A., Gholap, A.V., Kumar, S., Kwek, K.H., Nisor, M., Rawat, R.S.,  
and Singh, J. 1990. "A Simple Shadowgraphy System and Some  
Result" , J. Fiz. Mal. 11(1990) , 1-11 .
- Louis, A. and Lawrence, R. 1970 Applied Mathematics for Engineers and  
Physicist. 2nd ed. Singapore : McGraw - Hill .

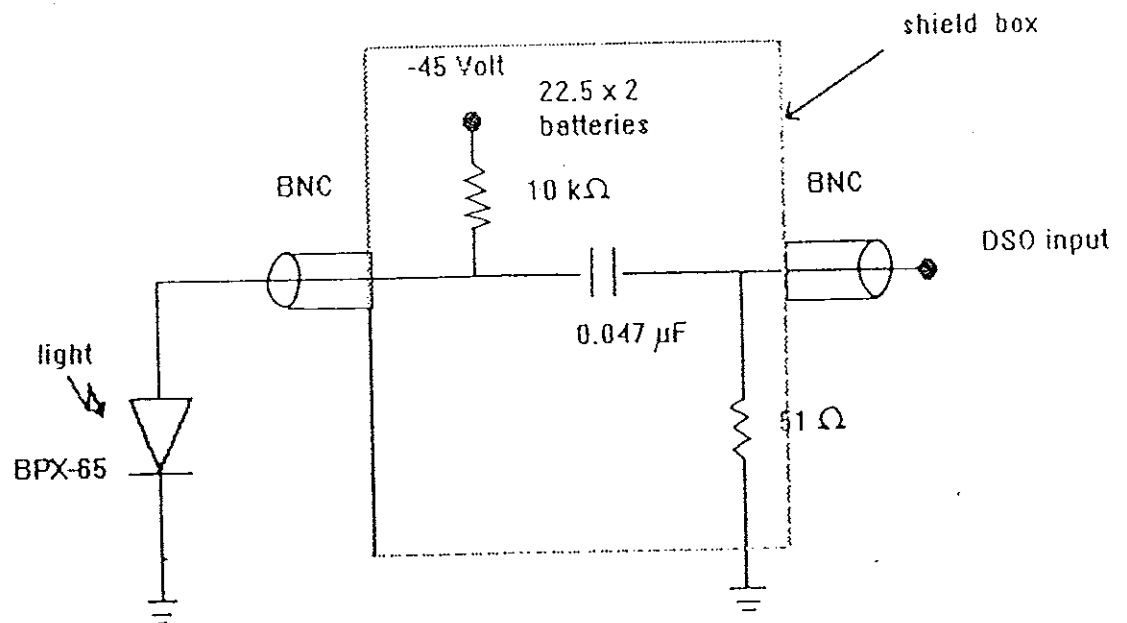
- Markiewicz, J.P. and Emmett, J.L. 1966. "Design of Flashlamp Driving Circuit" ,  
IEEE J. Quant Elect. 2(1966) , 707 - 711 .
- Merzkirch, W.F. 1974. Flow Visualization. New York : Academic Press .
- Panton, Renald L. 1984. Incompressible Flow. New York : John - Willey .
- Patter, Merle C. 1991. Mechanics of Fluids. New York : Prentice - Hall .
- Rasih, I.J. and Tan, B.C. 1988. "Characteristics of a Simple Air - Filled Flashlamp  
for Laser Pumping" , J. Appl. Phys. 58(1988) , 422 - 431 .
- Sataporn, N., Limluklert, K. and Silawatshananai, C. 1994. "Fast Schlieren  
Photography Using Triggered Air Flashlamp as Light Source" ,  
J. Thai Physics ( to be published ) .
- Silawatshananai, C. 1987. "Characteristics of an Argon Plasma Jet" ,  
Songklanakarin J. Sci. Technol. 9(1987) , 463 - 470 .
- Silawatshananai, C., Sataporn, N. and Limluklert, K. 1994. "Triggered Air Flashlamp  
for Schlieren Photography" , Songklanakarin J. Sci. Technol. 16(1994) ,  
93 - 105 .
- Suwanmanee, N., Tirawanichkul, Y., Thaisayam, V. and Silawatshananai, C. 1989.  
"Pulse Trigger Circuit for Plasma and Laser Experiment" ,  
Songklanakarin J. Sci. Technol. 11(1989) , 49 - 53 .

## ภาคผนวก ก

### การวัดค่าความเข้มแสงของหลอดแฟลช

ในการวัดค่าความเข้มแสงของหลอดแฟลช ผู้วิจัยได้ใช้ไดโอดวัดแสง (BPX-65 PIN diode) ซึ่งตอบสนองช่วงกว้างเชิงสเปกตรัม (ค่าตอบสนองสูงสุด ที่ 850 นาโนเมตร) และเวลาขึ้นดี (Good rise time ประมาณ 0.5 ไมโครวินาที) สัญญาณที่ได้จะถูกบันทึกในออสซิลโลสโคปแบบบันทึกค่าได้และในการวัดนี้จะวางช่องทางรับแสงไว้ที่ตำแหน่งติดกับหลอดแฟลช

ภาพประกอบ 69 วงจรไบแอสของไดโอดวัดแสง (BPX - 65 PIN diode biasing circuit)



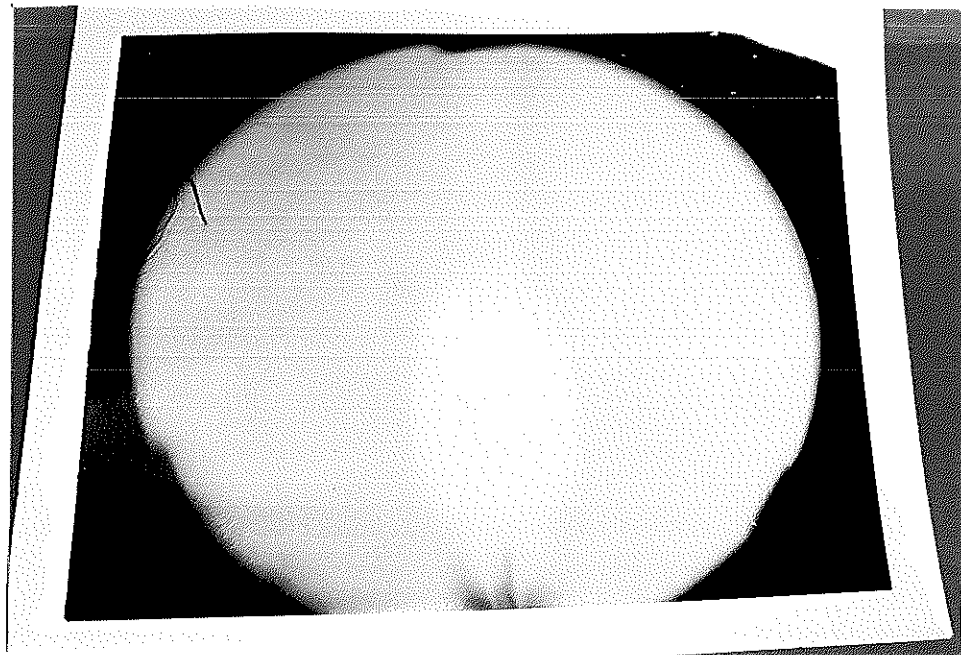
## ภาคผนวก ข.

### ลักษณะภาพที่ไม่เหมาะสมที่เกิดจากการวิจัยนี้

ในการวิจัยทุกครั้งย่อมเกิดความผิดพลาดและปัญหาในการทดลองเสมอ โดยที่อาจเกิดจากการติดตั้งระบบผิดหรือผลกระทบบจากอุปกรณ์การทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วการทดลองทางทัศนศาสตร์จะเกิดข้อผิดพลาดได้มาก ดังนั้นผู้วิจัยจึง ต้องการที่จะนำเสนอลักษณะของภาพที่เกิดจากความผิดพลาด และเหตุผลของความ ผิดพลาด เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ซึ่งสามารถ อธิบายเป็นหัวข้อดังนี้

1. การจัดระบบทัศนศาสตร์ผิดโดยที่ไม่ได้หาระยะคมชัด ( Focus ) ของ วัตถุที่ต้องการถ่ายภาพ ซึ่งภาพที่ออกมาจะมีขนาดไม่เหมาะสมและขาดความคมชัด

ภาพประกอบ 70 ภาพถ่ายที่เกิดจากการจัดระบบชไรเรนผิดวิธี



2. ความผิดพลาดที่เกิดจากปัญหาของแสงจากวัตถุที่มีความเข้ม สูงเกินกว่าแสงซึ่งจะทำส่วนที่เป็นแสงที่ได้จากวัตถุนั้นมีความเข้มสูงจะไม่สามารถถ่ายให้เห็นรูปแบบภายในนั้นได้

ภาพประกอบ 71 ภาพของวัตถุที่มีความเข้มของแสงสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อถ่ายโดยใช้เทคนิคซีโรเรน

