

การศึกษาและออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์



นาย สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0110-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# STUDY AND DESIGN OF A VORTEX FUEL FLOWMETER

Mr. Siripong Eamchaimongkol

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0110-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์  
โดย นาย สิริพงษ์ เอี่ยมชัยมงคล  
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิ บุญจิตราคุลย์)

สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล : การศึกษาและออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์ (STUDY AND DESIGN OF A VORTEX FUEL FLOWMETER)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ ; 124 หน้า. ISBN 974-13-0110-3.

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ส่วนสำคัญของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้ อยู่ที่การนำเอาหลักการของการสั่นสะเทือนเชิงกล และหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งมาประยุกต์ใช้กับการวัดความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น โดยเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้จะใช้วัดจลนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ การทดลองเครื่องวัดอัตราการไหล จะทำการทดลองกับ น้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน และทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการวัดแบบปริมาตรสะสม

ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหล พบว่าเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงที่แคบ โดยเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดจลนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ สามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เมื่อทดลองกับน้ำ และสามารถวัดได้ในช่วงระหว่าง 2.00 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.16 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน เมื่อเปลี่ยนขนาดของวัดจลนเป็นวัดจลนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร พบว่าช่วงอัตราการไหลที่สามารถวัดได้ และเรโซลูชัน (resolution) เปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถวัดได้ในช่วงระหว่าง 1.82 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.35 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เมื่อทดลองกับน้ำ และสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 1.61 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรที่วัดที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2543.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4070463521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : VORTEX /FLOWMETER/OPTOELECTRONIC/FUEL FLOWMETER

SIRIPONG EAMCHAIMONGKOL : STUDY AND DESIGN OF A VORTEX  
FUEL FLOWMETER . THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. WITTHAYA  
YONGCHAREON , Ph.D. 124 pp. ISBN 974-13-0110-3.

This research was the study and design of a vortex flowmeter for measuring the fuel flow rate of the vehicle engine. The important part of this flowmeter was the application of the vibration theory and the optoelectronic principle for measuring the vortex frequency. The cylindrical bluff body with diameter of 1.00 mm. and 1.50 mm. were used as the vortex generator in the flowmeter. The flowmeter was tested using both water and gasoline. The accuracy of the flowmeter was obtained by accumulated volume method.

The results shown that the flowmeter could measure the fluid flow in narrow range. The flowmeter with 1.00 mm. diameter vortex generator could measure the water flow rate within the range of 2.24 ml/s. to 3.47 ml/s. and could measure the gasoline flow rate within the range of 2.00 ml/s. to 3.16 ml/s. When the bluff body's diameter was changed to 1.50 mm. , the measurable range and resolution were also changed . The flowmeter with 1.50 mm. diameter vortex generator could measure the water flow rate within the range of 1.82 ml/s. to 2.35 ml/s. and could measure the gasoline flow rate within the range of 1.61 ml/s. to 2.24 ml/s. The error of the flowmeter was less than 2 percents of measured volume at steady flow.

Department MECHANICAL ENGINEERING Student's signature.....

Field of study MECHANICAL ENGINEERING Advisor's signature.....

Academic year 2000 Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้เวลา ให้กำลังใจ และทุนทรัพย์ที่ใช้ในงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนทุนในการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์ ที่ได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างมากมาโดยตลอด นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิ บุญจิตราดุลย์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำปรึกษา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1    ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	8
1.3    ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	8
1.4    ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	8
1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
2    ทฤษฎีของเครื่องวัดอัตราการไหล.....	10
2.1    หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์.....	10
2.2    ประเภทของตัวรับรู้.....	12
2.3    หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้.....	14
3    การออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์.....	20
3.1    คุณสมบัติของของไหลที่ต้องการวัด.....	20
3.2    ออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์.....	21
3.3    การออกแบบวงจรรับรู้.....	27
3.4    การเชื่อมต่อวงจรรับสัญญาณกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
3.5    การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโครคอมพิวเตอร์.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	รูปแบบและวิธีการทดลอง.....	39
	4.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	39
	4.2 การออกแบบกระบอกตวงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ.....	40
	4.3 รูปแบบการทดลอง.....	42
	4.4 วิธีการทดลองและบันทึกผล.....	44
	4.5 สรุปขั้นตอนการทดลอง.....	48
5	ผลการทดลอง.....	49
	5.1 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ.....	49
	5.2 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมัน เชื้อเพลิงเบนซิน.....	68
	5.3 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมัน เชื้อเพลิงดีเซล.....	79
	5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	80
	5.5 อภิปรายผลการทดลอง.....	84
6	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	97
	6.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
	6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย และการพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหล.....	99
	รายการอ้างอิง.....	101
	บรรณานุกรม.....	102
	ภาคผนวก.....	104
	ภาคผนวก ก.....	104
	ภาคผนวก ข.....	109
	ภาคผนวก ค.....	122
	ประวัติผู้วิจัย.....	124



## สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
ตาราง 3.1 ตารางแสดงช่วงอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ .....	20
ตาราง 5.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	57
ตาราง 5.2 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว.....	59
ตาราง 5.3 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว.....	61
ตาราง 5.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	64
ตาราง 5.5 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว.....	65
ตาราง 5.6 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว.....	67
ตาราง 5.7 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	70
ตาราง 5.8 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว....	72

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ชื่อตาราง	หน้า
ตาราง 5.9 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว.....	73
ตาราง 5.10 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตรเป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	76
ตาราง 5.11 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว.....	77
ตาราง 5.12 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว.....	78
ตาราง 5.13 ตารางสรุปข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	80
ตาราง 6.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น....	98

## สารบัญภาพ

ชื่อรูป	หน้า
รูป 1.1	รูปแสดงกระเปาะแก้วที่ใช้วัดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ อยู่ในปัจจุบัน..... 2
รูป 2.1 (ก)	รูปแสดงการเกิดวอร์เท็กซ์หลังวัดอุณหภูมิทรงกระบอก..... 11
รูป 2.1 (ข)	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขสโตรฮาล และตัวเลขเรย์โนลด์ ของการไหลผ่านวัดอุณหภูมิทรงกระบอก..... 11
รูป 2.2	รูปแสดงวัดอุณหภูมิรูปร่างต่าง ๆ..... 12
รูป 2.3	รูปแสดงตัวรับรู้แบบเทอร์มิสเตอร์ที่ติดตั้งบนวัดอุณหภูมิ..... 13
รูป 2.4	รูปแสดงตัวรับรู้ความดันที่ติดตั้งบนวัดอุณหภูมิ..... 13
รูป 2.5	รูปแสดงการติดตั้งตัวรับรู้ที่ผนังท่อของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์.... 14
รูป 2.6	รูปแสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่ใช้ ในอุตสาหกรรม..... 15
รูป 2.7	รูปแผนภาพแสดงหลักการการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้..... 16
รูป 2.8	รูปแสดงภาพตัดของการติดตั้งวัดอุณหภูมิทรงกระบอกที่กลางท่อ..... 18
รูป 3.1	รูปแสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น..... 22
รูป 3.2	รูปแผนภาพอิสระของแผ่นสะท้อนแสง..... 22
รูป 3.3	รูปแสดงภาพตัดของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น..... 26
รูป 3.4	รูปแสดงวงจรสำหรับตัวไดโอดเปล่งแสง (LED)..... 27
รูป 3.5	รูปแสดงวงจรรับสัญญาณ..... 30
รูป 3.6	(ก) รูปแสดงสัญญาณความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่ได้จากวงจรอนุภาค (ข) รูปแสดงสัญญาณพัลส์ความถี่ของวอร์เท็กซ์เมื่อถูกแปลงให้เป็น สัญญาณดิจิทัล..... 34
รูป 3.7	รูปแผนภาพแสดงการเชื่อมต่อสัญญาณพัลส์เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์..... 35
รูป 3.8	รูปแสดงแผนผังลำดับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์..... 36
รูป 3.9	รูปหน้าจอบอกแสดงผลของเครื่องวัดอัตราการไหลบนไมโครคอมพิวเตอร์..... 37
รูป 3.10	รูปแสดงภาพถ่ายเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น..... 38

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูป 3.11	รูปแสดงส่วนประมวลและแสดงผลของเครื่องวัดอัตราการไหล..... 38
รูป 4.1	รูปแผนภาพแสดงส่วนประกอบของชุดทดลอง..... 39
รูป 4.2	รูปแสดงแบบกระบอกวงที่ใช้ในการปรับเทียบ..... 41
รูป 4.3	รูปแผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 44
รูป 5.1.1	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิด วอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 2.34 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งมีความถี่ 40 เฮิรตซ์..... 50
รูป 5.1.2	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดย ไม่มีวัดทึมนที่อัตราการไหล 2.34 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล..... 50
รูป 5.2.1	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิด วอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 2.78 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งมีความถี่ 50 เฮิรตซ์..... 50
รูป 5.2.2	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดย ไม่มีวัดทึมนที่อัตราการไหล 2.78 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล..... 50
รูป 5.3.1	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิด วอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 3.16 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งมีความถี่ 60 เฮิรตซ์..... 51
รูป 5.3.2	(ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดย ไม่มีวัดทึมนที่อัตราการไหล 3.16 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณ ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล..... 51

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูป 5.4.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งมีความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	51
รูป 5.4.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดทึมนที่อัตราการไหล 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	51
รูป 5.5.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 3.62 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	52
รูป 5.5.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดทึมนที่อัตราการไหล 3.62 มิลลิลิตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	52
รูป 5.6 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	55
รูป 5.7 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัดทึมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	62
รูป 5.8 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัดทึมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	68
รูป 5.9 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัดทึมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์.....	74

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูป 5.10	รูปกราฟแสดงค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่อัตราการไหลต่าง ๆ..... 82
รูป 5.11	รูปกราฟแสดงตัวเลขสโตรฮาล ที่ได้จากการทดลองที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ..... 83
รูป 5.12	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ กับตัวเลขเรย์โนลด์..... 89
รูป 5.13	(ก) รูปตัวอย่างที่ 1 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ (ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล..... 95
รูป 5.14	(ก) รูปตัวอย่างที่ 2 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ (ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล..... 95
รูป 5.15	(ก) รูปตัวอย่างที่ 3 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ (ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล..... 95
รูป 5.16	(ก) รูปตัวอย่างของสัญญาณที่มีความเป็นระเบียบ (ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล..... 95

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$A$	พื้นที่หน้าตัดของท่อ	$m^2$
$b$	ความกว้างของแผ่นสะท้อนแสง	$m$
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของวัตถุหมุนรูปทรงกระบอก	$m$
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$m$
$E$	ค่า Young Modulus (Young Modulus)	$Pa$
$f$	ความถี่	$Hz$
$h$	ความหนาของแผ่นสะท้อนแสง	$m$
$I$	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่	$m^4$
$L$	ความยาวของแผ่นสะท้อนแสง	$m$
$Q$	อัตราการไหลของของไหล	$m^3/s$
$V$	ความเร็วของของไหล	$m/s$
$\omega$	ความถี่เชิงมุม	$rad/s$
$V$	ความหนืดจลน์	$m^2/s$
$Re$	ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)	
$St$	ตัวเลขสโตรฮาล (Strouhal number)	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

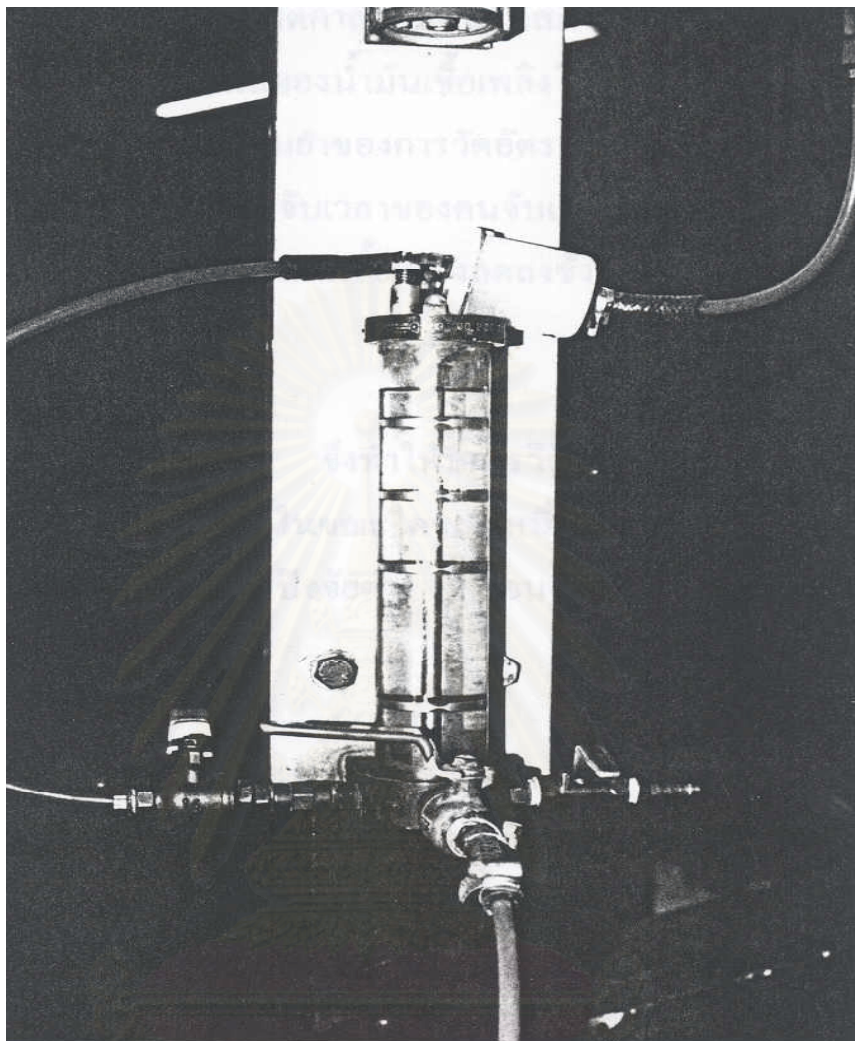
วิธีการวัดอัตราการไหลของของไหล ปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน วิธีการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ เป็นวิธีการวัดอัตราการไหลวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาวิธีการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์มาประยุกต์ใช้กับการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้ ซึ่งมีความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ ตลอดจน วัตถุประสงค์ ขอบเขต และขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ หรือการหาค่าปริมาณการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง (fuel consumption) ของเครื่องยนต์ในแต่ละเครื่องนั้นมี ความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบปริมาณอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องทำการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันเชื้อเพลิงตลอดจนข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ ทำให้การวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ไม่ง่ายนัก

วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ การจับเวลาที่ระดับน้ำมันเชื้อเพลิงในกระเปาะแก้ว (ดังแสดงในรูป 1.1 ) ลดลงจากระดับหนึ่งสู่อีกระดับหนึ่ง จากนั้นจึงนำเอาปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงหารด้วยเวลาเพื่อหาค่าอัตราการไหลเฉลี่ยในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา





รูป 1.1 รูปแสดงกระเปาะแก้วที่ใช้วัดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากวิธีการดังกล่าวจะต้องใช้ช่วงเวลาประมาณ 30 วินาที ถึง 1 นาที เพื่อให้ระดับน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงจากระดับหนึ่งสู่อีกระดับหนึ่ง โดยอัตราการไหลที่ได้จะเป็นเพียงอัตราการไหลเฉลี่ยในช่วงการจับเวลาเท่านั้น ซึ่งหากการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state) อันเป็นผลมาจากความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่คงที่แล้ว จะทำให้ค่าอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่อ่านได้จากกระเปาะแก้ว ซึ่งเป็นเพียงค่าเฉลี่ยในช่วงหนึ่งหน่วยเวลานั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ดังนั้นวิธีที่จะลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว จึงจำเป็นที่จะต้องวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งก็เป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งของการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้กระเปาะแก้ว และนอกเหนือจากข้อจำกัดดังกล่าวแล้ว ความแม่นยำของการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการอ่านจากกระเปาะแก้วนั้น ก็ยังขึ้นกับการจับเวลาของคนจับเวลาอีกด้วย ซึ่งหากกระเปาะแก้วมีพื้นที่หน้าตัดมากแล้ว จะส่งผลให้ระดับน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงช้า อันจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการจับเวลาได้อีกเช่นกัน

จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงทำให้มีการวิจัยค้นหาหาเครื่องมือวัดที่เหมาะสมเพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous) แต่เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง และปัจจัยต่าง ๆ ก่อนข้างจะเป็นอุปสรรคต่อการวัด อันได้แก่

## 1. ปริมาณการไหลน้อย

ในการออกแบบเครื่องยนต์นั้น ผู้ผลิตเครื่องยนต์มักออกแบบเครื่องยนต์ให้ประหยัดน้ำมัน จึงทำให้ปริมาณการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าน้อย และทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำมันเชื้อเพลิงเล็กตามไปด้วย โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่งน้ำมันภายในเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 6 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร (สำหรับเครื่องยนต์ขนาด 1.6 ลิตร) ดังนั้นการวัดอัตราการไหลโดยใช้วิธีผลต่างความดัน (differential pressure) ซึ่งนิยมใช้กันสำหรับวัดอัตราการไหลในท่อจึงแทบเป็นไปไม่ได้ ส่วนวิธีการวัดที่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบในเครื่องมือวัด เช่น โพลิตีฟดิสเพลสเมนต์ (positive displacement) หรือเครื่องวัดอัตราการไหลแบบกังหัน (turbine meter) ในทางปฏิบัติอาจกระทำได้ยากเนื่องจากชิ้นส่วนต่าง ๆ จะเล็กมาก ๆ ซึ่งหากทำจะต้องมีราคาที่สูงมาก

## 2. คุณสมบัติที่ติดไฟได้ง่าย

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิดคือติดไฟได้ง่าย ดังนั้นวิธีการวัดที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การวัดอัตราการไหลแบบลวดความร้อน (hot wire anemometer) จึงอาจไม่ปลอดภัยนัก แต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการวัด

อัตราการไหลที่มีปริมาณน้อย อีกทั้งยังมีผลการตอบสนองที่ไวหากใช้ลวดที่มีมวลน้อย ๆ จึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยอาศัยวิธีการดังกล่าว

### 3. ช่วงการวัดที่กว้าง

เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ในแต่ละรอบความเร็วนั้น มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก จึงทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการวัดนั้นจะต้องสามารถที่จะวัดได้ใน ช่วงกว้างซึ่งทำให้เป็นอุปสรรคข้อหนึ่งในการวัด

### 4. คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric)

คุณสมบัติอีกข้อหนึ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงคือมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก คือเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้วิธีการวัดอัตราการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic flowmeter)

จากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วทำให้วิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความเป็นไปได้มีอยู่ 3 วิธี ซึ่งจะกล่าวถึงความเหมาะสมและข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีไว้พอสังเขปดังนี้คือ

#### 1. วิธีการวัดอัตราการไหลโดยอาศัยหลักการวัดแบบลวดความร้อน

สำหรับหลักการทำงานของ การวัดอัตราการไหลแบบลวดความร้อนนั้น จะอาศัยหลักการพาความร้อน (heat convection) กล่าวคือ เมื่อของไหลไหลผ่านลวดความร้อนซึ่งมีความต้านทานแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของไหลจะพาเอาความร้อนบนลวดออกไปทำให้อุณหภูมิของลวดความร้อนลดลงอันจะส่งผลทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป และโดยการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เอง จึงทำให้ทราบค่าความเร็วของของไหลที่มากระทบ อันจะนำไปสู่การหาค่าอัตราการไหลต่อไปได้ในที่สุด

จากหลักการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าลวดความร้อนจำเป็นที่จะต้องมียุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล แต่เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่ติดไฟได้ง่าย ดังนั้นหากใช้ลวดความร้อน ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องให้อุณหภูมิของลวดความร้อนสูงมากพอก็อาจทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ จึงทำให้มีผู้ค้นคว้าวิจัยเพื่อหาตัวรับรู้ (sensor) ขึ้นใช้แทนลวดความร้อน โดยที่คุณสมบัติของตัวรับรู้จะต้องสามารถใช้วัดของไหลที่อัตราการไหลน้อย ๆ ได้โดยไม่จำเป็นที่จะต้องให้อุณหภูมิของตัวรับรู้สูงกว่าอุณหภูมิของของไหลมากนัก เช่น การประยุกต์ใช้เทอร์มิสเตอร์ (thermistor) ซึ่งมีค่าความต้านทานแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ แต่มีความไว (sensitivity) สูงกว่าแทนลวดความร้อน จึงทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องคงอุณหภูมิของตัวเทอร์มิสเตอร์ไว้ที่อุณหภูมิสูงมากนัก ดังตัวอย่างงานวิจัยของ P.W. Baier และ K.F. Bonnet [1] ซึ่งเป็นงานวิจัยถึงการนำเทอร์มิสเตอร์ชนิด PTC แทนลวดความร้อนในการวัดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงในขณะใดขณะหนึ่งของรถยนต์ โดยที่ผลการวิจัยสามารถใช้วัดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล (diesel) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และมีช่วงการวัดอยู่ที่ประมาณ 0.5 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 5 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ได้อย่างแม่นยำ ก็มีความผิดพลาดไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังไม่มีมีความจำเป็นที่จะต้องคงอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ไว้สูงมากนัก ก็อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้วค่าคงตัวของเวลา (time constant) ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีค่าน้อย คือมีค่าประมาณ 0.25 วินาที ซึ่งทำให้ได้การตอบสนองที่ไวนั่นเอง

นอกเหนือจากการใช้เทอร์มิสเตอร์แทนการใช้ลวดความร้อนแล้ว ยังมีการพัฒนาตัวรับรู้ขึ้นใช้เป็นการเฉพาะ เช่น การใช้ตัวรับรู้อัตราการไหลแบบซิลิคอน (silicon flow sensor) [2] ซึ่งตัวรับรู้อัตราการไหลแบบซิลิคอนนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการวัดอัตราการไหลที่มีปริมาณน้อย ๆ เช่น การไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ การไหลของอากาศ หรือ แม้แต่การไหลของโลหิตในหลอดเลือดได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นสามารถใช้วัดได้โดยให้อุณหภูมิของตัวรับรู้สูงกว่าอุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิงเพียง 3 ถึง 4 องศาเซลเซียส [3]

ดังนั้นหากพิจารณาถึงผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาแล้ว จะเห็นว่าวิธีการวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงโดยอาศัยหลักการวัดแบบลวดความร้อนนั้นมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งในแง่ความแม่นยำ และความไวในการตอบสนองอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าคงตัวของเวลาที่น้อยนั่นเอง ซึ่งทั้งหมดนี้ถือได้ว่าเป็นข้อดีของวิธีการ

วัดแบบนี้ แต่ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องหาตัวรับรู้มาใช้แทนลวดความร้อนเพื่อความปลอดภัยของการใช้งาน ซึ่งตัวรับรู้ดังกล่าวนี้อาจหาได้ไม่มากนัก โดยเฉพาะตัวรับรู้อัตราการไหลแบบซิลิคอน ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้เป็นการเฉพาะภายในห้องปฏิบัติการในประเทศญี่ปุ่น และไม่มีขายอยู่ในท้องตลาด ดังนั้นการหาตัวรับรู้ที่ใช้แทนลวดความร้อนอาจไม่ใช่เรื่องง่ายนักจึงเป็นข้อเสียของวิธีการวัดอัตราการไหลโดยอาศัยหลักการวัดแบบลวดความร้อน

## 2. วิธีการวัดอัตราการไหลโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบลามินาร์อีลิเมนต์ (laminar element)

หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบลามินาร์อีลิเมนต์นั้น จะอาศัยหลักการวัดค่าความแตกต่างของความดัน โดยที่ภายในเครื่องจะประกอบด้วยท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่อของไหลถูกดันผ่านท่อเล็ก ๆ เหล่านี้จะทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของการไหลในท่อมีน้อย และอยู่ในช่วงสภาวะการไหลที่เป็นแบบลามินาร์อันเป็นผลมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมินขนาดเล็กน้อย ซึ่งภายใต้สภาวะการไหลในท่อมินเป็นแบบลามินาร์นี้ อัตราการไหลจะแปรผันตรงกับค่าความแตกต่างของความดันที่วัดได้ระหว่างทางเข้าและทางออกของท่อเล็ก ดังนั้นหากสามารถวัดค่าความแตกต่างของความดัน ก็จะทำให้ทราบค่าอัตราการไหลได้ในที่สุด ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลแบบลามินาร์ อีลิเมนต์นี้สามารถใช้วัดอัตราการไหลที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้เป็นอย่างดีซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของวิธีการวัดแบบนี้ แต่มีข้อเสียคืออาจทำให้เกิดความดันสูญเสียมากอันเกิดจากท่อมินขนาดเล็กน้อย

## 3. วิธีการวัดอัตราการไหลโดยอาศัยหลักการของการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ (vortex)

หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์นั้นจะอาศัยหลักการทางกลศาสตร์ของไหล กล่าวคือเมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุมน (bluff body) จะทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ขึ้นหลังวัตถุมนนั้น ซึ่งความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุมน และความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่มากกระทบ ดังนั้นหากสามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุมน และความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นได้ก็จะทำให้ทราบค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่มากกระทบได้เช่นกัน (ดังรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1) วิธีวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์นี้จะให้เอาที่พุดเป็นความถี่ของพัลส์ที่เกิดจากวอร์เท็กซ์ ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัล อันจะทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในระบบการควบคุมแบบดิจิทัลที่ใช้ในรถยนต์ อีกทั้งการวัดอัตราการ

ไหลแบบวอร์เท็กซ์นี้ยังไม่เกิดความดันสูญเสียมากนัก ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อดีของอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์

สำหรับความเป็นไปได้ที่จะนำเอาวิธีการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์มาประยุกต์กับการวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นก็อาจไม่ง่ายนัก ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของท่อที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์เอง ก็มักที่จะทำการวิจัยในท่อที่มีขนาดใหญ่ และอัตราการไหลมากกว่าอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์มาก ตัวอย่าง เช่น งานวิจัยของ Grzegorz L. Pankanin [4] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่มีอิทธิพลต่อการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหล โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ในช่วงอัตราการไหลตั้งแต่ 2 ลูกบาศก์เมตร ต่อ ชั่วโมง ถึง 18 ลูกบาศก์เมตร ต่อ ชั่วโมง ซึ่งอัตราการไหลดังกล่าวมีขนาดมากกว่าอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้อัตราการไหลที่น้อยของน้ำมันเชื้อเพลิงก็จะส่งผลทำให้ความแรงของพัลส์ความดันที่เกิดจากวอร์เท็กซ์นั้นมีค่าน้อยตามไปด้วย และทำให้ต้องหาตัวรับรู้ที่สามารถรับรู้ความดันที่มีค่าน้อย ๆ ได้ซึ่งก็อาจมีราคาที่สูงมากเช่นกัน จึงถือได้ว่าเป็นข้อเสียของวิธีการวัดแบบนี้ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง (optoelectronic) ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ทำได้ง่ายและราคาไม่แพงมากเป็นตัวรับรู้พัลส์ความดันที่เกิดจากวอร์เท็กซ์ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทที่ 2

หากเมื่อพิจารณาวิธีที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 3 วิธีแล้ว จะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่เนื่องจากการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้นั้น มีค่าใช้จ่ายน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีวัดความร้อน และวิธีลามินาร์อิเลเมนต์ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจที่จะวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้ ซึ่งหากผลของการวิจัยสามารถใช้วัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงได้ดีแล้ว จะทำให้ได้เครื่องวัดอัตราการไหลที่มีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับวิธีการวัดแบบอื่น ๆ และก็คือสาเหตุสำคัญอันเป็นที่มาของงานวิทยานิพนธ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบ ตลอดจนสร้างเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาและออกแบบ ตลอดจนสร้างเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์
- 1.3.2 ทำการต่อประสานเครื่องวัดอัตราการไหลเข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์
- 1.3.3 ทำการทดลองถึงความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นโดยทดสอบกับน้ำในช่วงอัตราการไหลต่าง ๆ
- 1.3.4 ทำการทดลองถึงความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นโดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วงอัตราการไหลต่าง ๆ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างเครื่องวัดอัตราการไหล
- 1.4.3 ทำการต่อประสานเครื่องวัดอัตราการไหลกับไมโครโปรเซสเซอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์
- 1.4.4 ทำการเปรียบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น
- 1.4.5 ทำการทดลองถึงความถูกต้องที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล
- 1.4.6 สรุปผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ได้เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์ สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในราคาถูก และนำไปประยุกต์กับตัวควบคุมแบบดิจิทัลในรถยนต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์

สำหรับทฤษฎีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ในบทนี้ จะกล่าวถึงหลักการ  
ทำงานโดยทั่วไปของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ และการใช้ตัวรับรู้ประเภทต่าง ๆ  
เพื่อเป็นตัวรับรู้ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ตลอดจนหลักการประยุกต์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์  
แสงมาใช้เป็นตัวรับรู้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

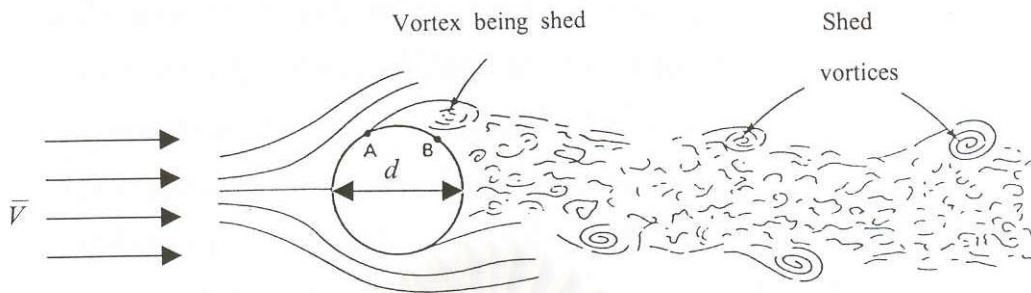
#### 2.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์

หลักการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์นั้น จะอาศัยหลัก  
การทางกลศาสตร์ของไหลคือ ปรากฏการณ์วอร์เท็กซ์เซดดิ้ง (vortex shedding phenomenon)  
ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุกลม จะทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ขึ้นหลังวัตถุกลมดัง  
แสดงในรูป 2.1 (ก) ซึ่งเป็นรูปแสดงการเกิดวอร์เท็กซ์หลังวัตถุกลมรูปทรงกระบอก โดยการเกิด  
วอร์เท็กซ์จะเกิดขึ้นที่ละข้างของวัตถุกลมสลับกันไป ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น  $f$  นั้น  
สามารถจัดให้อยู่ในรูปของตัวเลขสโตรฮาล  $St$  โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.1

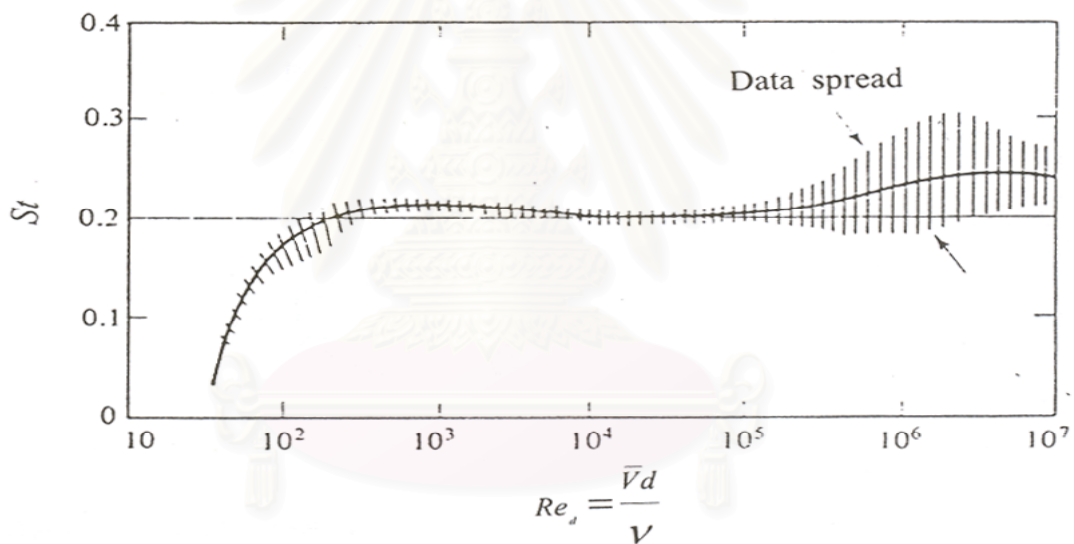
$$St = \frac{fd}{\bar{V}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $d \equiv$  เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุกลมรูปทรงกระบอก

$\bar{V} \equiv$  ความเร็วเฉลี่ยของของไหลก่อนกระทบวัตถุกลมรูปทรงกระบอก



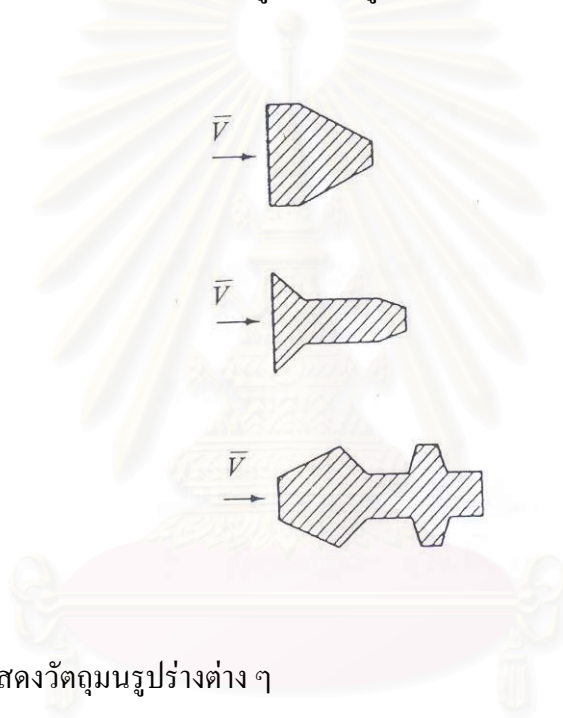
รูป 2.1 (ก) รูปแสดงการเกิดวอร์เท็กซ์หลังวัตถุมนรูปทรงกระบอก



รูป 2.1(ข) รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขสโตรฮาล กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลผ่านวัตถุมนรูปทรงกระบอก

จากการศึกษาและทดลอง [5] พบว่าตัวเลขสโตรฮาล  $St$  นั้นขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  ดังแสดงในรูป 2.1 (ข) ซึ่งเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขสโตรฮาล กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลผ่านวัตถุมนรูปทรงกระบอก จากรูป 2.1 (ข) จะเห็นได้ว่าในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1,000 ถึง 100,000 ตัวเลขสโตรฮาลจะมีค่าประมาณ 0.2 ในช่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง ๆ ข้อมูลที่ได้จะมีความแปรปรวนสูงซึ่งแสดงโดยเส้นแนวตั้ง ในการเกิดวอร์เท็กซ์จะทำให้เกิดพัลส์ความดันขึ้นหลังวัตถุมน ดังนั้นการวัดความถี่ของพัลส์ความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจาก

วอร์เท็กซ์ ก็จะทำให้ทราบความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับวัตถุมนที่ใช้ในเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นอาจมีรูปร่างต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหล ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งในกรณีที่วัตถุมนที่ไม่ใช่รูปทรงกระบอกแล้วดังเช่นในรูป 2.2 แล้ว เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุมน ก็จะใช้เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือน (characteristic diameter) ส่วนช่วงขอบเขตของการวัดความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นนั้น จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับรู้พัลส์ความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากวอร์เท็กซ์ของตัวรับรู้ที่จะสามารถวัดพัลส์ความดันได้ที่ขนาดและความถี่เท่าใด ซึ่งประเภทของตัวรับรู้ นั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกันดังจะกล่าวไว้พอสังเขปดังนี้



รูป 2.2 รูปแสดงวัตถุมนรูปร่างต่าง ๆ

## 2.2 ประเภทของตัวรับรู้

### เทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวรับรู้ที่ใช้วัดอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การนำเทอร์มิสเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการวัดความถี่ของวอร์เท็กซ์ สามารถทำได้โดยการนำเอาเทอร์มิสเตอร์ไปติดไว้ที่วัตถุมนดังแสดงในรูป 2.3 เมื่อเกิดวอร์เท็กซ์ จะทำให้เกิดพัลส์ความดันขึ้น และโดยอาศัยหลักการของการพาความร้อน จะทำให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ซึ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่า

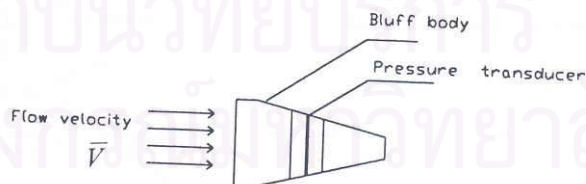
อุณหภูมิของของไหลโดยการผ่านกระแสไฟฟ้า มีความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของพัลส์ความดันที่เกิดจากวอร์เท็กซ์ ดังนั้นหากสามารถวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถทำได้โดยผ่านวงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) จะทำให้ได้รูปสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น



รูป 2.3 รูปแสดงตัวรับรู้แบบเทอร์มิสเตอร์ที่ติดตั้งบนวัตถุมน

#### ตัวรับรู้ความดัน (pressure sensor)

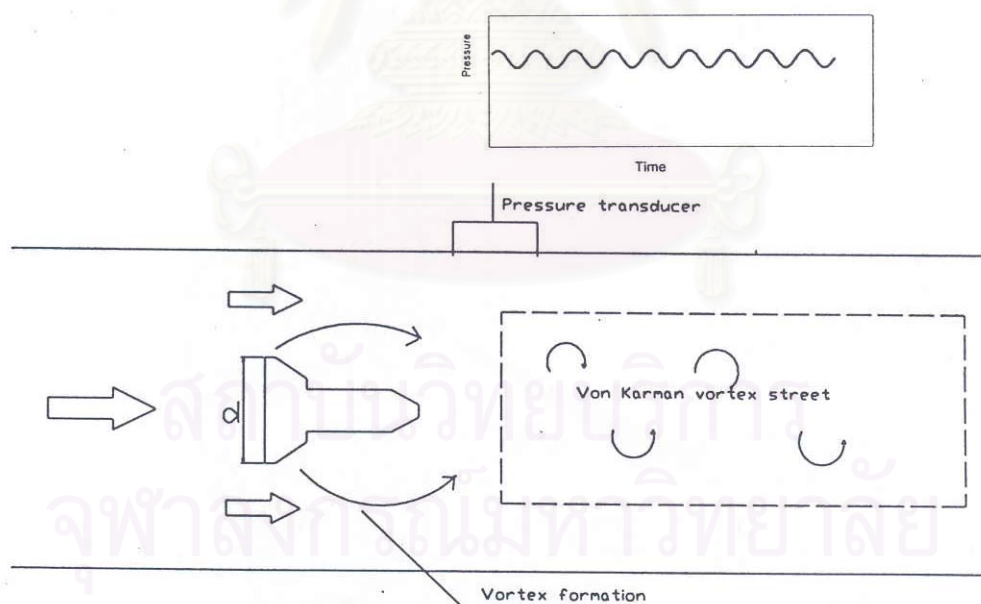
พัลส์ความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากวอร์เท็กซ์นั้นสามารถใช้ตัวรับรู้ความดันติดตั้งที่ตัวของวัตถุมน ดังแสดงในรูป 2.4 เมื่อเกิดพัลส์ความดันขึ้น จะทำให้ตัวรับรู้ความดันส่งสัญญาณออกมาตามความถี่ของวอร์เท็กซ์



รูป 2.4 รูปแสดงตัวรับรู้ความดันที่ติดตั้งบนวัตถุมน

นอกจากตัวรับรู้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีตัวรับรู้อื่น ๆ อีก เช่น สเตรนเกจ (strain gauge) ไพโซอิเลิเมนต์ (piezo elements) อุลตราโซนิค (ultrasonic) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และช่วงของการวัด

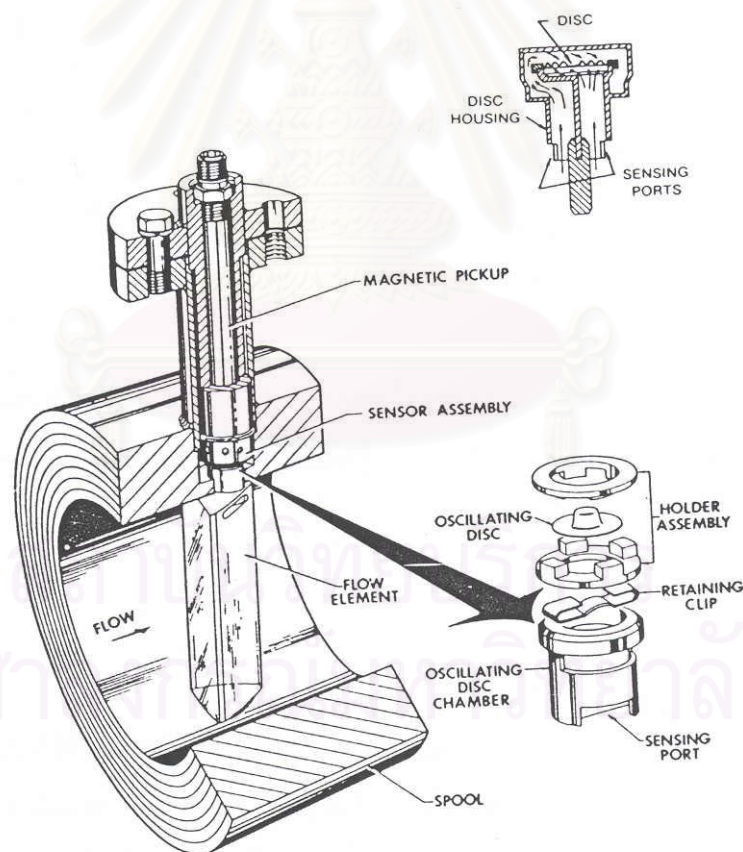
จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์นั้นจะให้เอาท์พุทเป็นสัญญาณพัลส์ความถี่ที่เป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) ซึ่งหลังจากแปลงสัญญาณดังกล่าวให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลโดยการปรับเทียบ (calibration) แล้ว ก็จะสามารถนำเครื่องวัดอัตราการไหลดังกล่าวไปใช้งานได้ นอกจากนี้การติดตั้งตัวรับรู้ไว้ที่วัดมุมแล้ว ยังสามารถติดตั้งตัวรับรู้ไว้ที่ผนังท่อของเครื่องวัดอัตราการไหลได้อีกด้วยดังแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 รูปแสดงการติดตั้งตัวรับรู้ที่ผนังท่อของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์

## 2.3 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้

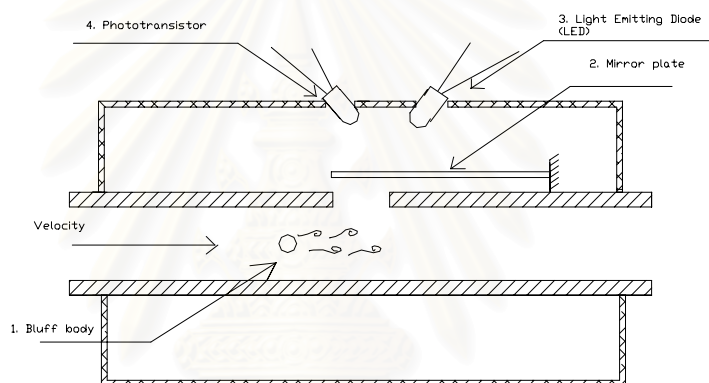
เนื่องจากการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องยนต์เบนซิน (gasoline) หรือเครื่องยนต์ดีเซลก็ตาม ล้วนแล้วแต่มีอัตราการไหลที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังตัวอย่างในรูป 2.6 ซึ่งใช้ตัวรับรู้แบบสนามแม่เหล็ก และมีรายละเอียดค่อนข้างมากจึงยากต่อการนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูป 2.6 รูปแสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ภายในของท่อน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร เท่านั้น ซึ่งค่อนข้างเล็กมาก จึงทำให้ยากต่อการออกแบบในทางปฏิบัติ

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงจะทำการศึกษาถึงการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดความเร็วของวอร์เท็กซ์ ซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในรูป 2.7



รูป 2.7 รูปแผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้

## 1. วัตถุนน

วัตถุนนที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แท่งทองเหลืองรูปทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ (vortex generator) ดังนั้นเมื่อของไหลไหลผ่านกระทบกับวัตถุนน จะทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ขึ้นหลังตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

## 2. แผ่นสะท้อนแสง (mirror plate)

แผ่นสะท้อนแสง เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดเนื่องจากแผ่นสะท้อนแสงนี้จะถูกออกแบบให้เป็นตัวรับรู้ออร์เท็กซ์ โดยจะต้องออกแบบให้ขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าสูงในช่วงความถี่ของออร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น

## 3. ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode,LED)

ไดโอดเปล่งแสง คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงชนิดหนึ่ง ซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น GaAs (gallium arsenide) หรือ GaP (gallium phosphide) มีคุณสมบัติในการเปล่งแสงสีต่าง ๆ ตามความยาวคลื่นของแสงในช่วงต่าง ๆ ซึ่งความเข้มแสงที่ปล่อยออกจากตัวไดโอดเปล่งแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง

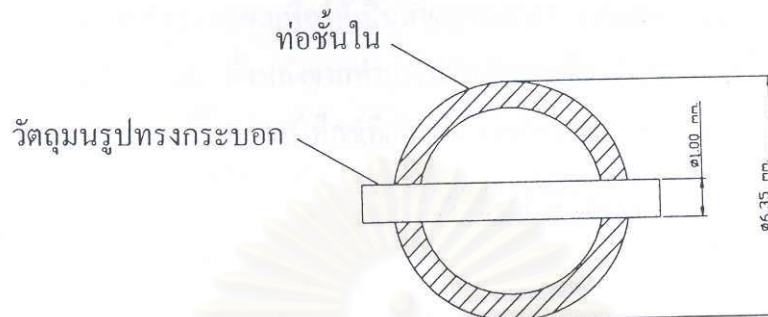
## 4. โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor)

โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง ที่มีหลักการทำงานตรงกันข้ามกับไดโอดเปล่งแสง คือทำหน้าที่เป็นตัวรับรูแสงที่มาจากตัวไดโอดเปล่งแสง โฟโตทรานซิสเตอร์อาจมี 3 ขา หรือ 2 ขา ก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ หลักการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ จะมีความคล้ายคลึงกับหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ (transistor) แต่จะต่างกันตรงที่กระแสที่มาจากส่วนที่เป็นขาเบสของตัวโฟโตทรานซิสเตอร์  $I_\lambda$  นั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่มาตกกระทบกับตัวของโฟโตทรานซิสเตอร์ และกระแสที่ขาเบส  $I_\lambda$  นี้ จะถูกขยายกระแสในอัตราขยายเท่ากับค่า  $\beta_{DC}$  ผ่านออกสู่ขาคอลเลกเตอร์  $I_C$  ซึ่งสามารถที่จะเขียน เป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.2

$$I_C = \beta_{DC} I_\lambda \quad (2.2)$$

ส่วนประกอบของเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นประกอบด้วยท่อ 2 ชั้นโดยท่อชั้นในจะเป็นท่อทองเหลืองดังในรูป 2.7 ซึ่งมีวัดถุนรูปทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดออร์เท็กซ์ติดอยู่ที่กลางท่อ ซึ่งภาพตัดของการวัดถุนรูปทรงกระบอกแสดงได้รูป 2.8





รูป 2.8 รูปแสดงภาพตัดของการติดวัสดุฉนวนรูปทรงกระบอกที่กลางท่อ

เมื่อของไหลไหลผ่านกระทบกับตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ จะทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ขึ้นหลังตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ อันจะส่งผลทำให้เกิดพัลส์ความดันขึ้น ซึ่งท่อส่วนที่อยู่หลังตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ จะถูกเจาะให้เป็นร่องเพื่อให้พัลส์ความดันผ่านไปกระทบกับแผ่นสะท้อนแสงที่ติดอยู่ด้านบน และทำให้แผ่นสะท้อนแสงเกิดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากพัลส์ความดันในความเร็วเดียวกันกับความเร็วของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ส่วนผนังของท่อนอกจะทำการตัดโคดปล่อยแสง และโฟโตทรานซิสเตอร์อยู่ด้านบน โดยที่การติดนั้นจะต้องติดให้ตัวโคดปล่อยแสงปล่อยแสงส่องผ่านของไหลไปกระทบกับแผ่นสะท้อนแสง และสะท้อนทำมุมตกกระทบกับโฟโตทรานซิสเตอร์พอดี ดังนั้นหากไม่มีของไหลไหลผ่านก็จะไม่เกิดวอร์เท็กซ์ และไม่เกิดพัลส์ความดันเช่นกัน แผ่นสะท้อนแสงจึงอยู่ในสภาวะสมดุล และไม่เกิดการสั่นสะเทือน ทำให้แสงที่ส่องจากตัวโคดปล่อยแสงส่องผ่านของไหลกระทบแผ่นสะท้อนแสงแล้วสะท้อนไปยังตัวโฟโตทรานซิสเตอร์นั้น ไม่เกิดการหักเหไปที่อื่น ปริมาณความเข้มแสงที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับจึงมีค่าคงที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ตามไปด้วย แต่เมื่อมีของไหลไหลผ่านกระทบกับตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ ซึ่งทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ และพัลส์ความดันขึ้นแผ่นสะท้อนแสงก็จะสั่นสะเทือนในความเร็วเดียวกันกับความเร็วของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นแสงที่ส่องมาจากตัวโคดปล่อยแสงที่ตกกระทบกับแผ่นสะท้อนแสงเพื่อสะท้อนไปยังตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะเกิดการหักเหไปที่อื่น ทำให้ปริมาณความเข้มแสงที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับมีค่าไม่คงที่ และจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วของการสั่นสะเทือนของแผ่นสะท้อนแสง อันจะส่งผลทำให้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์มีค่าไม่คงที่ โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็ว

ของการสั้นสะท้อนของแผ่นสะท้อนแสง และเมื่อนำกระแสไฟฟ้านี้ไปผ่านความต้านทานก็จะทำให้ได้สัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น สัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อให้เป็นสัญญาณทางดิจิทัลก่อนจะเข้าสู่วงจรนับเพื่อนับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งหลังจากทำการเปรียบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลก็จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิงแบบวอร์เท็กซ์

ในการออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลของของไหลโดยทั่วไปแล้ว ก่อนข้างมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหล เพื่อใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลแต่ละชนิดในแต่ละช่วงของการวัดเป็นการเฉพาะ ซึ่งต่างจากเครื่องมือวัดอื่น ๆ เช่น โวลต์มิเตอร์ (voltmeter) หรือ แอมมิเตอร์ (ammeter) ที่สามารถใช้วัดกับอุปกรณ์ทั่วไปได้ ดังนั้นในการออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหล คุณสมบัติของของไหล และช่วงอัตราการไหลจึงเป็นปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งในการออกแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของของไหล และช่วงอัตราการไหลที่ต้องการวัด ตลอดจนการคำนวณ และการออกแบบส่วนที่สำคัญของเครื่องวัดอัตราการไหล เช่น การออกแบบแผ่นสะท้อนแสง การออกแบบวอร์จ และการเชื่อมประสานเครื่องวัดอัตราการไหล กับไมโครโปรเซสเซอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะมุ่งเน้นถึงการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เป็นหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 คุณสมบัติของของไหลที่ต้องการวัด

ชนิดและขนาดเครื่องยนต์	ชนิดน้ำมันเชื้อเพลิง	ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) $(m^2/s)$ $30\text{ }^{\circ}C$	ช่วงอัตราการไหล	
			ต่ำสุด $(ml/s)$	สูงสุด $(ml/s)$
TOYOTA 4A-FE	เบนซิน [6]	$3.70 \times 10^{-7}$	0.86	4.06
ISUZU 4JAIL	ดีเซล [7]	$3.00 \times 10^{-6}$	1.00	5.71

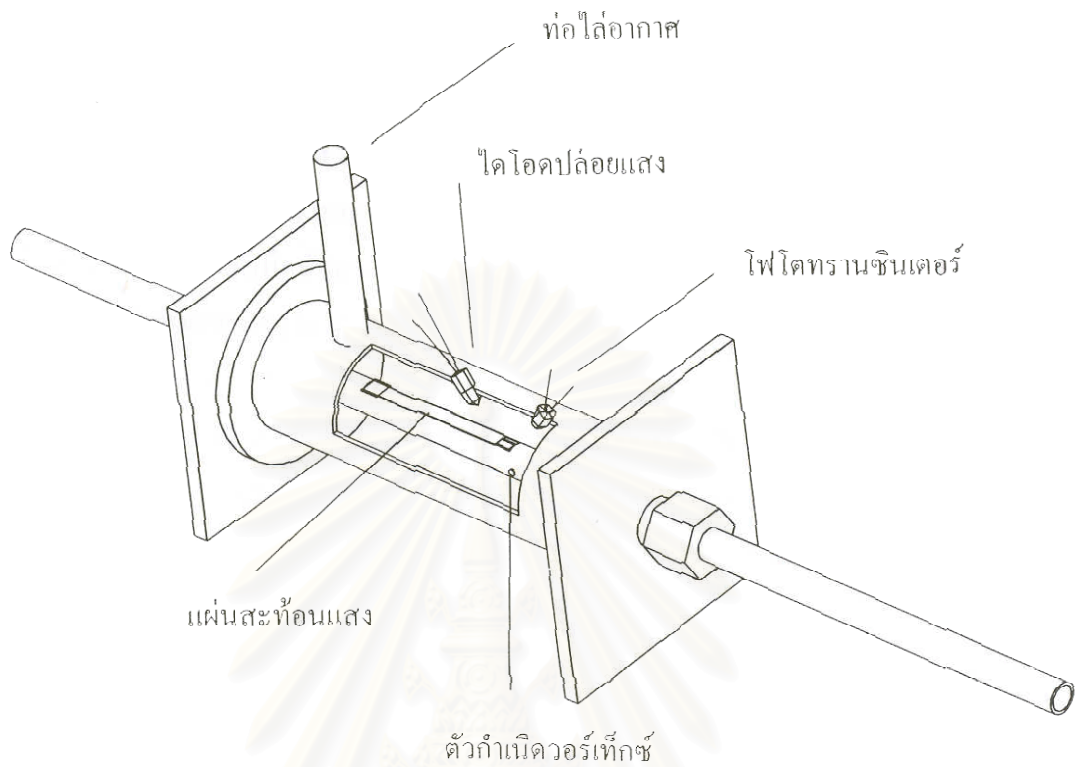
ตาราง 3.1 ตารางแสดงช่วงอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ

จากข้อมูลในตาราง 3.1 จะเห็นได้ว่าไม่ว่าเครื่องยนต์เบนซิน หรือเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลก็ตาม ล้วนแล้วแต่มีอัตราการไหลที่ค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเทียบกับการไหล ของของไหลที่ใช้กับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีช่วง อัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลที่ต่ำสุด ถึงสูงสุดที่กว้าง คือประมาณ 5 ถึง 6 เท่าตัว ซึ่งทำ ให้เป็นอุปสรรคกับการออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหล สำหรับการออกแบบเครื่องวัดอัตราการ ไหลแบบวอร์เท็กซ์ ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินชนิดไร้สารตะกั่วในการ ทดลอง เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้มีสีที่ใสแสงส่องผ่านได้ง่าย ทำให้ง่ายต่อการใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้

### 3.2 การออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์

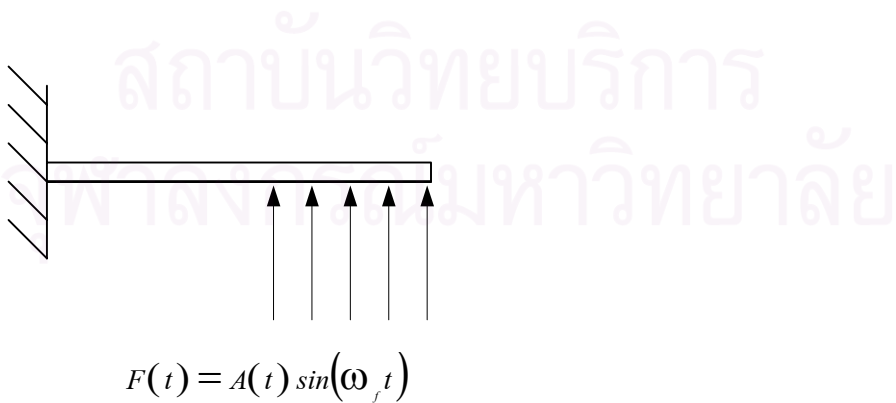
เครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยท่อ 2 ชั้น ดังแสดงในรูป 3.1 ท่อชั้น นอกเป็นท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 นิ้ว โดยที่ผนังท่อด้านบนจะติด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงเป็นตัวรับรู้ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ส่วนท่อชั้นในนั้นเนื่องจาก อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินมีค่าต่ำ คืออยู่ในช่วงประมาณ 1 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 4 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะต้องมีขนาดเล็กลงไปด้วย ทั้งนี้เพื่อ ทำให้ความเร็วของของไหลมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้เกิดวอร์เท็กซ์ได้ ท่อชั้นในที่ใช้ในการออกแบบจึงเลือกใช้ท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.35 มิลลิเมตร ( $\frac{1}{4}$  นิ้ว) ความหนา 0.7 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.95 มิลลิเมตร สำหรับท่อชั้นในนั้นจะ ติดวัดอุณหภูมิทรงกระบอกเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยที่ผนังท่อด้านบนหลังวัดอุณหภูมิ จะถูกเจาะเป็นร่องเพื่อให้พัลส์ความถี่ที่เกิดขึ้นจากวอร์เท็กซ์ผ่านไปกระทบกับแผ่นสะท้อนแสงที่ ติดอยู่ที่ผนังท่อด้านบน และสันสะท้อนในความถี่เดียวกันกับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 3.1 รูปแสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น

การออกแบบแผ่นสะท้อนแสง



รูป 3.2 รูปแผนภาพอิสระของแผ่นสะท้อนแสง

ในการออกแบบแผ่นสะท้อนแสงนั้น ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลค่อนข้างน้อย ตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดของพัลส์ความดันที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบแผ่นสะท้อนแสงจึงต้องพยายามให้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนอยู่ใกล้เคียงกับความถี่ของวอร์เท็กซ์อันจะส่งผลทำให้แผ่นสะท้อนแสงสั่นสะเทือนในแอมพลิจูดที่สูงและเกิดการหักเหของแสงสูงมากพอที่จะประมวลผลสัญญาณที่เกิดจากการหักเหได้

หากพิจารณาแผนภาพอิสระของการสั่นสะเทือนของแผ่นสะท้อนแสงดังรูป 3.2 เป็นเสมือนกับการสั่นสะเทือนของคานแบบปลายด้านหนึ่งอิสระ (cantilever beam) โดยมีพัลส์ความดันที่เกิดจากวอร์เท็กซ์เป็นแรงที่มากกระทำที่ปลายคานแล้ว ความถี่ธรรมชาติของคานที่โหมดต่าง ๆ จะสามารถหาได้ดังสมการ 3.1

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{ml^4}} \quad (3.1)$$

โดยที่ค่า	$(\beta_1 l)^2 =$	3.52	สำหรับโหมดที่ 1
	$(\beta_2 l)^2 =$	22.0	สำหรับโหมดที่ 2
	$(\beta_3 l)^2 =$	61.7	สำหรับโหมดที่ 3

และเนื่องจากที่อัตราการไหลน้อย ๆ ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่ได้ก็จะต่ำเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการให้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงอยู่ที่ความถี่ต่ำ ๆ เพื่อที่จะสามารถวัดอัตราการไหลที่อัตราการไหลน้อย ๆ แล้วเมื่อพิจารณาจากสมการ 3.1 จะเห็นได้ว่าจะต้องให้ความหนาของแผ่นสะท้อนแสงมีขนาดบางมาก และให้แผ่นสะท้อนแสงมีความยาว ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้วัสดุที่ใช้ทำแผ่นสะท้อนแสงจะใช้แผ่นทองเหลืองที่มีขนาดความหนา 0.030 มิลลิเมตร โดยตัดให้ความกว้างประมาณ 3 มิลลิเมตร ส่วนความยาวของแผ่นสะท้อนแสงนั้นจะให้แผ่นสะท้อนแสงมีความยาวพอสมควร ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ๆ แต่หากให้แผ่นสะท้อนแสงมีความยาวมากจนเกินไปจะทำให้หน้าหนักของแผ่นสะท้อนแสงมากเกินไปจนทำให้แผ่นสะท้อนแสงงอมาสัมผัสกับผนังท่อ และไม่สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูป

ของคานแบบปลายด้านหนึ่งอิสระได้ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้แผ่นสะท้อนแสงเป็นแผ่น  
ทองเหลืองที่มีความยาวประมาณ 3.5 เซนติเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

ยังมอดูลัสของทองเหลือง (Young Modulus)  $E = 105 \text{ Gpa}$

มวลต่อหน่วยความยาว  $m = 7.62 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (area moment of inertia) ของแผ่นสะท้อนแสงหาได้  
ดังสมการ 3.2

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (3.2)$$

แผ่นทองเหลืองความกว้าง  $b = 3 \text{ mm}$  และความหนา  $h = 0.030 \text{ mm}$

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (area moment of inertia) จะมีค่า

$$I = \frac{1}{12} (3 \times 10^{-3}) (0.03 \times 10^{-3})^3 = 6.75 \times 10^{-18} \text{ m}^4$$

เมื่อแทนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (area moment of inertia) ลงในสมการ 3.1 แล้วจะทำให้  
ได้ความถี่ธรรมชาติในโหมดที่หนึ่งมีค่าดังนี้

$$\omega_1 = 3.52 \sqrt{\frac{EI}{ml^4}} = 3.52 \sqrt{\frac{105 \times 10^9 \times 6.75 \times 10^{-18}}{7.62 \times 10^{-4} \times (3.5 \times 10^{-2})^4}} = 87.63 \text{ rad/s}$$

ซึ่งความถี่ธรรมชาติที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 87.63 เรเดียน ต่อ วินาที หรือ มีความถี่เท่ากับ

$$\frac{87.63 \text{ rad}}{2\pi \text{ rad}} = 13.95 \text{ Hz}$$

จะได้ความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 มีค่าประมาณ 14 เฮิร์ตซ์ สำหรับความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 2 และ โหมดที่ 3 มีค่าดังนี้

$$\omega_2 = 87.19 \quad \text{Hz}$$

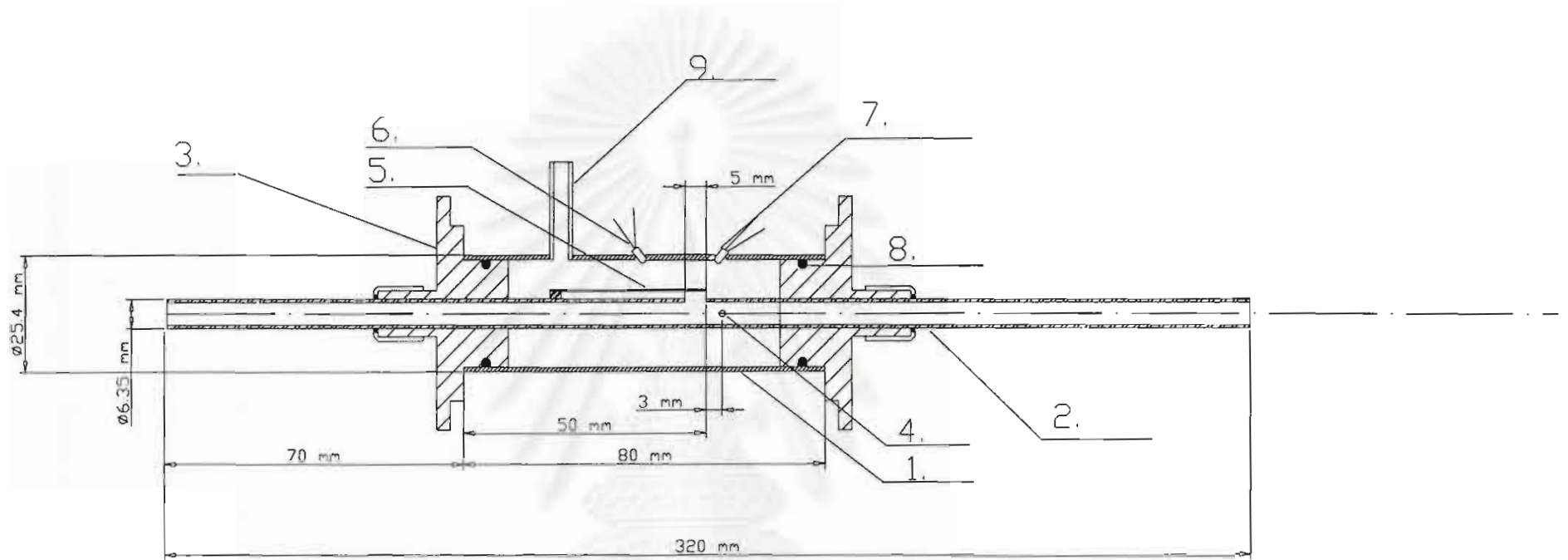
$$\omega_3 = 244.52 \quad \text{Hz}$$

สำหรับขนาดต่าง ๆ ของเครื่องวัดอัตราการไหลแสดงได้ดังรูป 3.3 ซึ่งเป็นภาพตัดของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น

อนึ่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสง ที่ได้กล่าวในหัวข้อนี้เป็นเพียงการคำนวณความถี่ธรรมชาติโดยพิจารณาให้แผ่นสะท้อนแสงสั่นสะท้อนในอากาศ แต่ในการนำไปใช้งานจริงในเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นแผ่นสะท้อนแสงจะสั่นในของไหล เช่น น้ำ หรือน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน ซึ่งในการสั่นสะท้อนในของไหลนั้นผลของมวลเพิ่ม (added mass) จะทำให้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูป 3.3 รูปแสดงภาพตัดของเครื่องวัดอัตราการใช้ไฟที่สร้างขึ้น

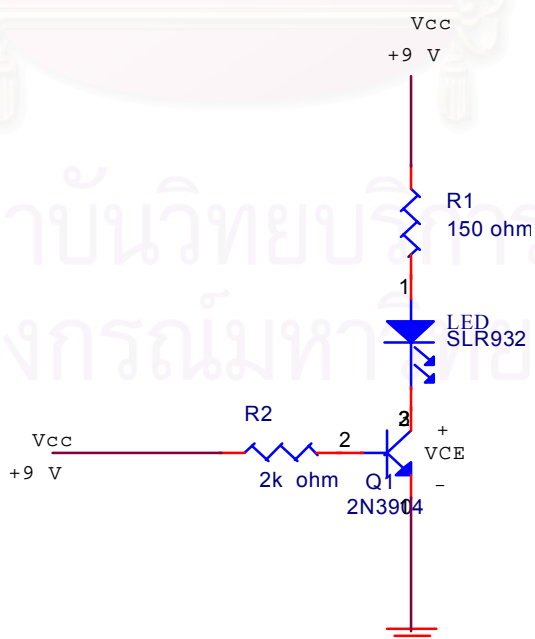
1. ท่อชั้นนอก
2. ท่อชั้นใน
3. หน้างานทองเหลือง
4. ตัวกำเนิดควอร์ตซ์
5. แผ่นสะท้อนแสง
6. ไลโคคอปด้อยแสง
7. ไฟโตทรานซิสเตอร์
8. โอรัง
9. ท่อใส่อากาศ

### 3.3 การออกแบบวงจรรับรู้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงที่ใช้เป็นตัวรับรู้ สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง 2 ตัวเป็นหลักคือ ไดโอดเปล่งแสง และโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยที่ตัวไดโอดเปล่งแสงจะถูกวางให้อยู่ในตำแหน่งเหนือแผ่นสะท้อนแสงส่องแสงทำมุมตกกระทบกับแผ่นสะท้อนแสง และสะท้อนไปยังตัวโฟโตทรานซิสเตอร์พอดีดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับการทดลองแล้วจะต้องอาศัยการทดลองผิดลองถูกในการวางตำแหน่งของตัวรับรู้ทั้งสอง เพื่อหาตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด สำหรับการออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับตัวไดโอดเปล่งแสง และตัวโฟโตทรานซิสเตอร์จะมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 การออกแบบวงจรสำหรับตัวไดโอดเปล่งแสง

ตัวไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เบอร์ SLR 932 (รายละเอียดของตัวไดโอดเปล่งแสง อยู่ในภาคผนวก ก) โดยให้ตัวไดโอดเปล่งแสงทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องให้กับตัวไดโอดเปล่งแสงดังแสดงในวงจรรูป 3.4



รูป 3.4 รูปแสดงวงจรสำหรับตัวไดโอดเปล่งแสง (LED)

จากรูป 3.4 เป็นวงจรสำหรับขับตัวไดโอดเปล่งแสง ซึ่งประกอบด้วยตัวทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 ต่อกับแหล่งจ่ายไฟในลักษณะเบสไบแอส (base bias) โดยออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว (saturation) กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวไดโอดเปล่งแสงจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขา คอลเลกเตอร์  $I_C$  ซึ่งหาได้ดังสมการ 3.3

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_F}{R_1} \quad (3.3)$$

และเนื่องจากตัวไดโอดเปล่งแสง SLR 932 นั้นสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ 100 มิลลิแอมป์ ดังนั้นเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านตัวไดโอดเปล่งแสงมากเกินไป ในการออกแบบจึงให้กระแสไฟฟ้าผ่านตัวไดโอดเปล่งแสงประมาณ 50 มิลลิแอมป์

กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวไดโอดเปล่งแสงดังนี้

ความต่างศักรีระหว่างคอลเลกเตอร์ และ อิมิตเตอร์

$$V_{CE} = 0.3 \text{ V}$$

แรงดันไปข้างหน้า (forward voltage) ของตัวไดโอดเปล่งแสง

$$V_F = 1.2 \text{ V}$$

ค่าอัตราขยาย

$$\beta_{DC} = 60$$

แหล่งจ่ายไฟ

$$V_{CC} = 9 \text{ V}$$

หากต้องการให้กระแสไฟฟ้าผ่านตัวไดโอดเปล่งแสงมีค่าประมาณ

$$50 \text{ มิลลิแอมป์}$$

( $I_C = 50 \text{ mA}$ )

ความต้านทาน  $R_1$  จะมีค่า

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_F}{I_C} = \frac{9\text{V} - 0.3\text{V} - 1.2\text{V}}{50 \text{ mA}} = 150 \ \Omega$$

เพื่อให้กระแสที่คอลเลกเตอร์มีค่า 50 มิลลิแอมป์ แล้วจะต้องคำนวณค่ากระแสที่เข้าสู่เบสซึ่งหาได้ตามสมการ 3.4

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{DC}} \quad (3.4)$$

กระแสที่ไหลเข้าสู่เบสเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว (saturation) จะต้องมีค่าน้อย

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{DC}} = \frac{50 \text{ mA}}{60} = 0.83 \text{ mA}$$

หากใช้แหล่งจ่ายไฟ 9 โวลต์แล้วสามารถหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ได้ตามสมการ 3.5

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_2} \quad (3.5)$$

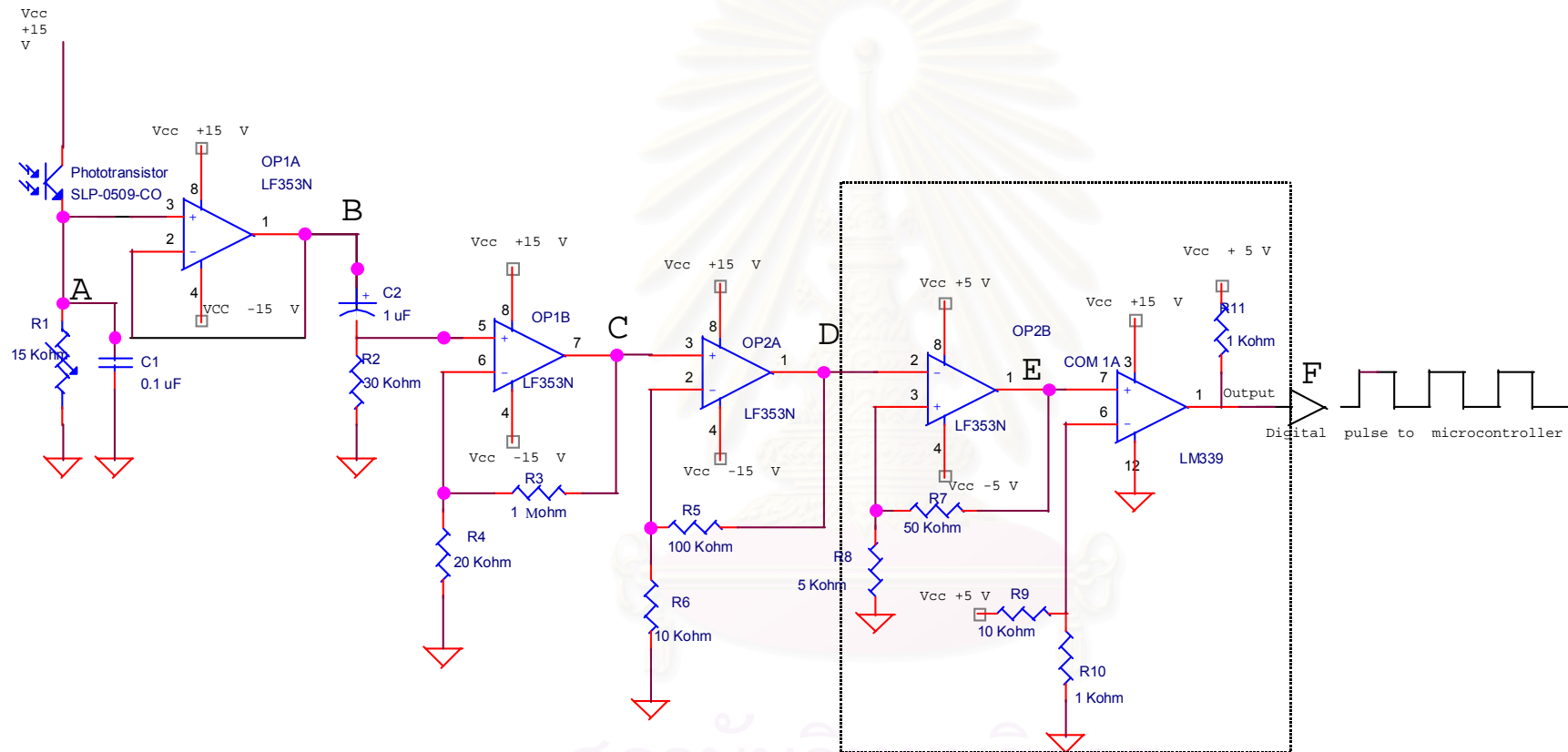
ดังนั้นค่าความต้านทาน  $R_2$  จะมีค่า

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{9V - 0.7V}{0.83 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega$$

จะเห็นว่าค่าความต้านทาน  $R_2$  จะต้องมีค่าไม่เกิน 10 กิโลโอห์ม และเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว (saturation) อย่างแน่นอนจึงใช้ค่าความต้านทาน 2 กิโลโอห์ม

### 3.3.2 การออกแบบวงจรรับสัญญาณ

วงจรับสัญญาณในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ โฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ SLP-0509 CO (รายละเอียดของตัวโฟโตทรานซิสเตอร์อยู่ในภาคผนวก ก) เป็นตัวรับความเข้มแสงที่สะท้อนมาจากแผ่นสะท้อนแสง โดยต่อเป็นวงจรได้ดังรูป 3.5



รูป 3.5 รูปแสดงวงจรรับสัญญาณ

จากรูป 3.5 เป็นรูปแสดงวงจรที่ใช้ในการรับสัญญาณซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อแสงที่ส่องจากตัวไดโอดเปล่งแสงส่องกระทบกับแผ่นสะท้อนแสง และสะท้อนมายังตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ โฟโตทรานซิสเตอร์จะให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าออกมาตามปริมาณความเข้มแสงที่มากกระทบ ดังนั้นเมื่อไม่มีอัตราการไหลเกิดขึ้นแผ่นสะท้อนแสงจะอยู่ในสภาพสมดุล โดยที่ไม่เกิดการสั่นสะเทือน ปริมาณความเข้มแสงที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับจึงมีค่าคงที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ออกจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ด้วย และเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ออกจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ที่มีค่าคงที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_1$  ซึ่งเป็นความต้านทานปรับค่าได้ก็จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นที่จุด A ที่มีค่าคงที่ด้วย โดยความต้านทานปรับค่าได้  $R_1$  นั้นจากการทดลองพบว่าจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 กิโลโอห์ม ถึง 15 กิโลโอห์ม ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  นั้นจะทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูง ในการทดลองนี้ใช้ค่า 0.1 ไมโครฟารัด และหากเมื่อมีอัตราการไหลเกิดขึ้นและอยู่ในสภาวะคงตัว แผ่นสะท้อนแสงจะเกิดการสั่นสะเทือนในความถี่เดียวกันกับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ทำให้แสงเกิดการหักเห และทำให้ปริมาณความเข้มแสงที่โฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับมีค่าไม่คงที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ออกจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ ก็จะมีค่าไม่คงที่ด้วยจึงทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่จุด A นี้มีลักษณะเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา (Time varying dc voltage source) ซึ่งหากนำเอาสัญญาณที่ได้ที่จุด A ไปประมวลผลจะทำให้ทราบค่าความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น

หลังจากที่ได้สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยจากตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ จุด A แล้วสัญญาณไฟฟ้าที่จุด A จะถูกต่อกับวงจรขยายเชิงดำเนินการ (operational amplifier) OP1 A ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขยายบัฟเฟอร์ (buffer amplifier) โดยใช้วงจรรวมเบอร์ LF 353 สำหรับหน้าที่ของวงจรขยายบัฟเฟอร์ นี้จะทำหน้าที่ลดการสูญเสียที่เกิดจากโหลด (loading effect) ทั้งนี้เพื่อต้องการรักษาระดับแรงดันสัญญาณไฟฟ้าที่จุด B ให้มีค่าเท่ากับที่จุด A ตลอดเวลาแม้จะถูกต่อกับวงจรอื่น โดยจะไม่ส่งผลให้ระดับสัญญาณที่จุด A มีขนาดน้อยลงจากจุด B สัญญาณไฟฟ้าจะถูกต่อเข้ากับวงจรกรองผ่านสูง (highpass filter) OP1B ซึ่งจะทำหน้าที่กรองเฉพาะส่วนที่มีความถี่เกินกว่าความถี่ตัด (cutoff frequency) พร้อมทั้งทำการขยายสัญญาณที่ผ่านออกมา

สำหรับค่าความถี่ตัด นั้นสามารถกำหนดได้ด้วยความต้านทาน  $R_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ซึ่งความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ 3.6

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} \quad (3.6)$$

โดยที่ความถี่ตัดที่จะใช้ในวงจรนี้จะใช้ค่าประมาณ 3 เฮิร์ตซ์ เพื่อตัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (dc voltage) ออกซึ่งหากใช้ค่าความต้านทาน  $R_2$  เท่ากับ 50 กิโลโอห์ม ตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีค่าดังนี้คือ

$$C_2 = \frac{1}{2\pi R_2 f_c} = \frac{1}{2\pi \text{rad} \times 50 \times 10^3 \Omega \times 3 \text{Hz}} = 1.06 \mu\text{F}$$

ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ใช้จึงมีค่าประมาณ 1 ไมโครฟารัด สำหรับอัตราขยายสัญญาณ  $G$  นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_3$  และ  $R_4$  ซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.7

$$G = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (3.7)$$

สมการ 3.7 คือสมการหาค่าอัตราขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (noninverting operational amplifier) ดังนั้นหากใช้ค่าความต้านทาน  $R_3$  เท่ากับ 1 เมกกะโอห์ม และค่า  $R_4$  เท่ากับ 20 กิโลโอห์ม เมื่อแทนค่าในสมการ 3.7 แล้วจะทำให้มีอัตราขยายดังนี้

$$G = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 1 + \frac{1 \times 10^6 \Omega}{20 \times 10^3 \Omega} = 51$$

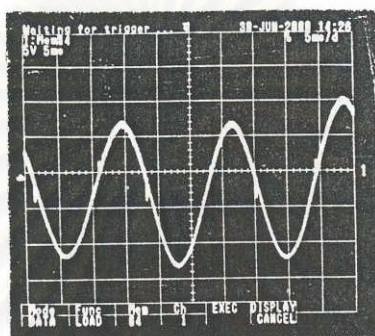
สัญญาณที่ได้ที่จุด C จะเป็นสัญญาณที่มีค่าความถี่ที่มากกว่าความถี่ตัด (cutoff frequency) พร้อมทั้งขยาย 51 เท่า แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้ที่จุด C ยังมีแอมพลิจูดค่อนข้างน้อยจึงต้องทำการขยายอีกหนึ่งขั้น ดังนั้นสัญญาณที่จุด C จึงถูกต่อเข้ากับวงจรขยายเชิงดำเนินการ OP2A ซึ่ง

เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส โดยที่อัตราขยายจะเป็นไปตามสมการ 3.7 สำหรับอัตราขยายในขั้นที่สองนี้จากการทดลองพบว่าจะต้องขยายอีกประมาณ 10 เท่า ดังนั้นหากใช้ค่าความต้านทาน  $R_5$  เท่ากับ 100 กิโลโอห์ม และค่าความต้านทาน  $R_6$  เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม อัตราขยายจะมีค่า 11 เท่า และเมื่อรวมอัตราขยายทั้งสองขั้นแล้วจะมีอัตราขยาย 561 เท่า ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีแอมพลิจูดสูงมากเพียงพอที่จะแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล

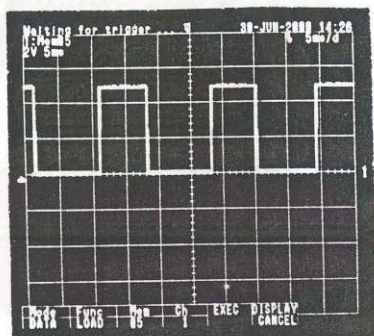
สัญญาณที่ได้ที่จุด D จึงมีรูปแบบของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันคาบ โดยตัดส่วนที่เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงออก พร้อมทั้งขยายสัญญาณ 561 เท่า ดังแสดงในรูป 3.6 (ก) สัญญาณที่ได้ที่จุด D นี้ยังไม่สามารถเข้าสู่วงจรนับได้ เนื่องจากยังเป็นสัญญาณอนาล็อก ดังนั้นจึงต้องแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยการผ่านสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่วงจรมิติชท์ทริกเกอร์ (Schmitt trigger) OP2B (ดังแสดงในกรอบรูปสี่เหลี่ยม) ซึ่งใช้วงจรรวมเบอร์ LF353 เช่นกัน สำหรับการทำงานของวงจรมิติชท์ทริกเกอร์ก็คือ วงจรจะทำการทริกสัญญาณที่มีแรงดันเกินกว่าแรงดันที่ตั้งไว้ขึ้นสู่แรงดันสูงสุด และทำการทริกสัญญาณที่มีแรงดันต่ำกว่าแรงดันที่ตั้งไว้ลงสู่แรงดันต่ำสุดเช่นกัน โดยแรงดันที่ตั้งไว้จะขึ้นกับ  $R_7$  และ  $R_8$  ซึ่งในวงจรรูป 3.5 ใช้  $R_7$  เท่ากับ 50 กิโลโอห์ม และ  $R_8$  เท่ากับ 5 กิโลโอห์ม ทำให้จุดทริกบนและล่างจะอยู่ที่ประมาณ +0.5 โวลต์ และ -0.5 โวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นหากสัญญาณที่จุด D มีค่ามากกว่า +0.5 โวลต์จะทำให้เอาต์พุตที่จุด E มีค่า +5 โวลต์ และหากสัญญาณที่จุด D มีค่าต่ำกว่า -0.5 โวลต์จะทำให้เอาต์พุตที่จุด E มีค่า -5 โวลต์ สัญญาณที่จุด E นี้จึงมีค่า +5 โวลต์ และ -5 โวลต์ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการนับพัลสนั้น สัญญาณจะต้องมีระดับ +5 โวลต์ และ 0 โวลต์ เท่านั้น จึงจำเป็นที่จะต้องนำสัญญาณที่ได้ที่จุด E เข้าสู่วงจรเปรียบเทียบ (comparator) ซึ่งใช้วงจรรวมเบอร์ LM 339 ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบแบบวินโดว (window comparator) หลักการทำงานของวงจรก็คือ วงจรจะทำการทริกสู่ระดับแรงดัน 5 โวลต์ เมื่อสัญญาณที่เข้ามาสู่วงจรเปรียบเทียบมีค่าสูงกว่าแรงดันที่กำหนดไว้ และจะทำการทริกสู่ระดับแรงดัน 0 โวลต์ เมื่อสัญญาณที่เข้ามาสู่วงจรเปรียบเทียบมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่กำหนดไว้ด้วยเช่นกัน โดยแรงดันที่กำหนดนี้จะมีค่าประมาณ 0.5 โวลต์ ซึ่งทำได้โดยการใช้ความต้านทาน  $R_9$  10 กิโลโอห์ม และ ความต้านทาน  $R_{10}$  1 กิโลโอห์ม ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์



ดังนั้นจากรูป 3.5 สัญญาณจากจุด D เมื่อเข้าสู่วงจรเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้ว หากสัญญาณดังกล่าวมีแรงดันมากกว่า 0.5 โวลต์ แล้วสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับที่จุด F จะมีค่า 5 โวลต์ และหากมีแรงดันน้อยกว่า -0.5 โวลต์ แล้วสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับที่จุด F จะมีค่า 0 โวลต์ ดังแสดงในรูป 3.6 (ข) ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลที่จะเชื่อมต่อเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



(ก)



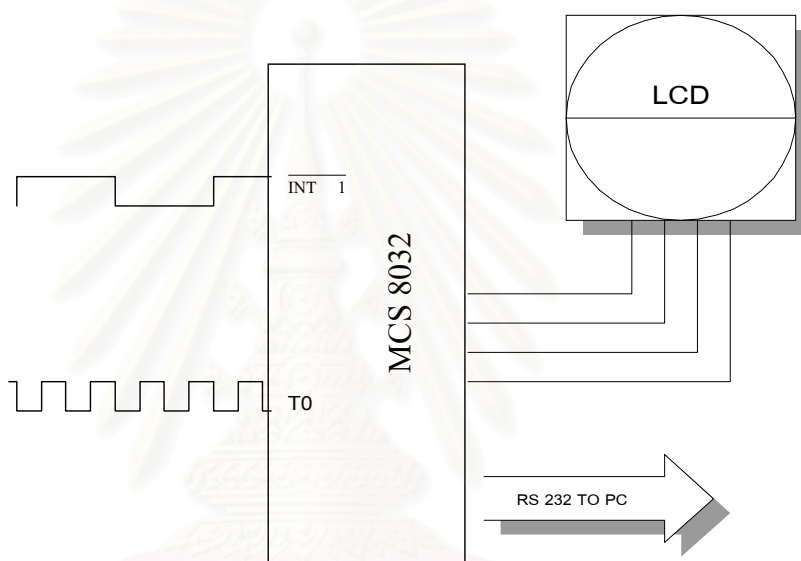
(ข)

รูป 3.6 (ก) รูปแสดงสัญญาณความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่ได้จากวงจรอนาล็อก (ข) รูปแสดงสัญญาณพัลส์ความถี่ของวอร์เท็กซ์เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

### 3.4 การเชื่อมต่อวงจรรับสัญญาณกับไมโครคอนโทรลเลอร์

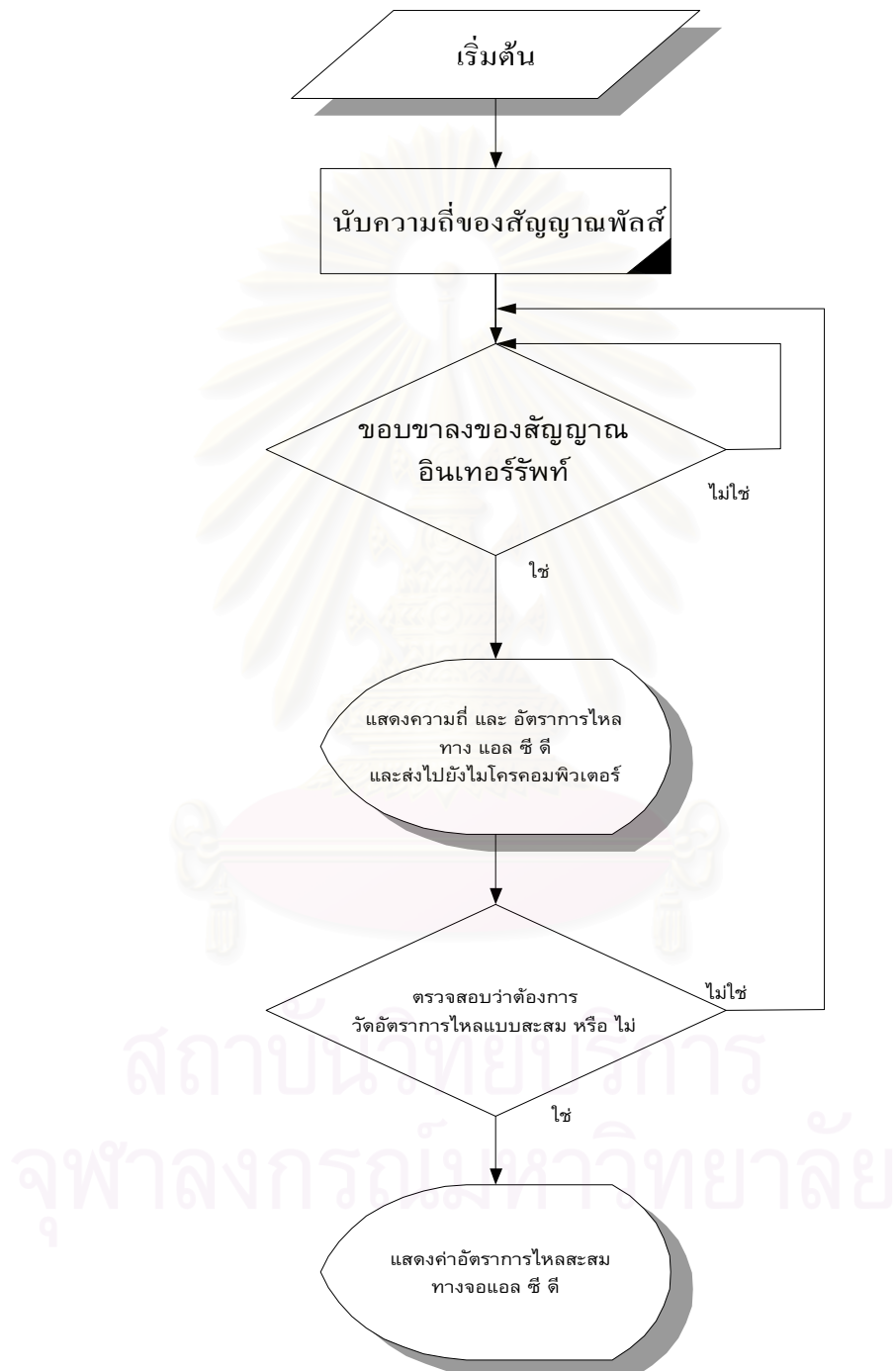
หลังจากได้สัญญาณความถี่ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลจากวงจรรับสัญญาณแล้ว สัญญาณดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการนับความถี่ของพัลส์ที่ได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS- 8032 (รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์จะไม่กล่าวในที่นี้) โดยสัญญาณ

พัลส์ที่ได้จากวงจรในรูป 3.5 จะถูกต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ขา T0 ซึ่งถูกใช้งานในโหมดตัวนับ (counter) เพื่อทำการนับพัลส์ ส่วนช่วงเวลาในการนับพัลส์จะใช้สัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 1 วินาที ทำการนับพัลส์ในทุก ๆ 1 วินาที โดยสัญญาณนาฬิกาจะเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทางขาอินเทอร์รัพท์ (interrupt) T1 ดังแสดงในรูป 3.7



รูป 3.7 รูปแผนภาพแสดงการเชื่อมต่อสัญญาณพัลส์เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์

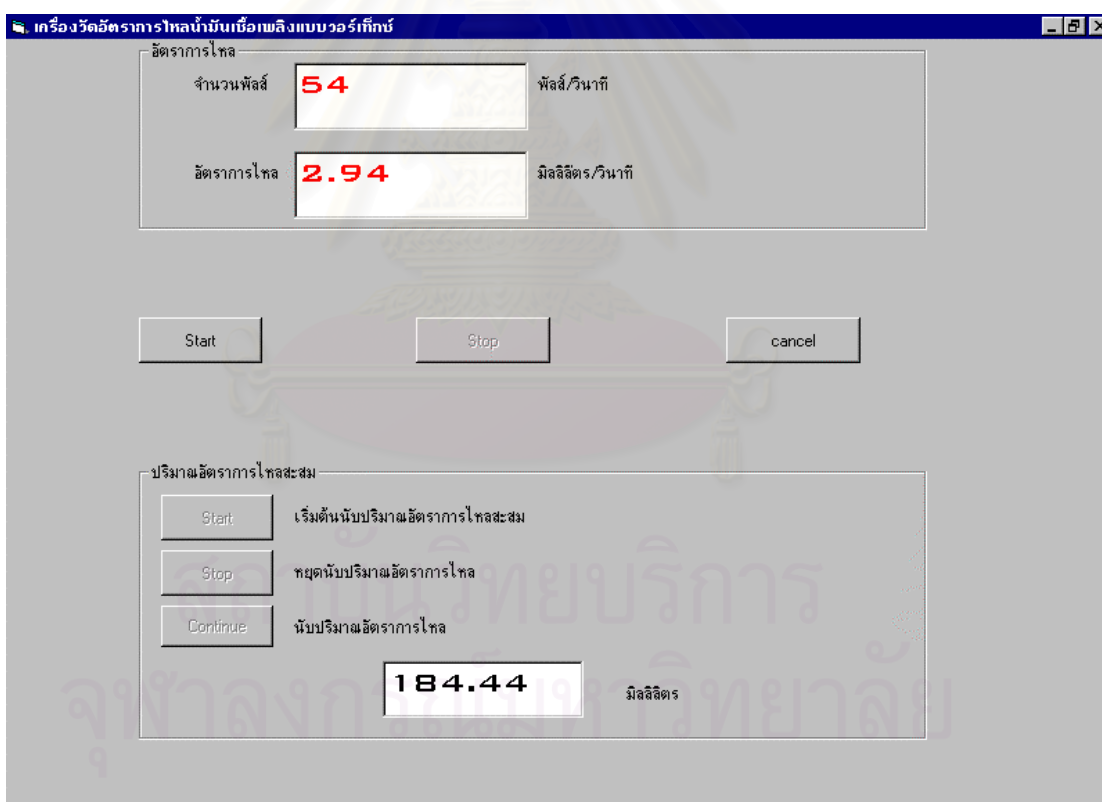
หลักการ และขั้นตอนในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกโปรแกรมให้นับสัญญาณความถี่ของพัลส์ที่เข้าสู่ขา T0 และรับสัญญาณนาฬิกาที่เข้าสู่อินเทอร์รัพท์ที่ขา  $\overline{\text{INT}} 1$  ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกโปรแกรมให้ทำงานที่ขอบขาของสัญญาณนาฬิกา ดังนั้นเมื่อสัญญาณขอบขาของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 1 เฮิรตซ์ เข้าสู่ขาอินเทอร์รัพท์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำเอาความถี่ที่นับได้จากขา T0 เพื่อไปทำการค้นหาอัตราการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ จากตารางในการเปรียบเทียบ และแสดงออกทางจอ แอล ซี ดี ซึ่งสามารถเขียนแผนผังลำดับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังรูป 3.8 สำหรับโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะอยู่ในภาคผนวก ข



รูป 3.8 รูปแสดงแผนผังลำดับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

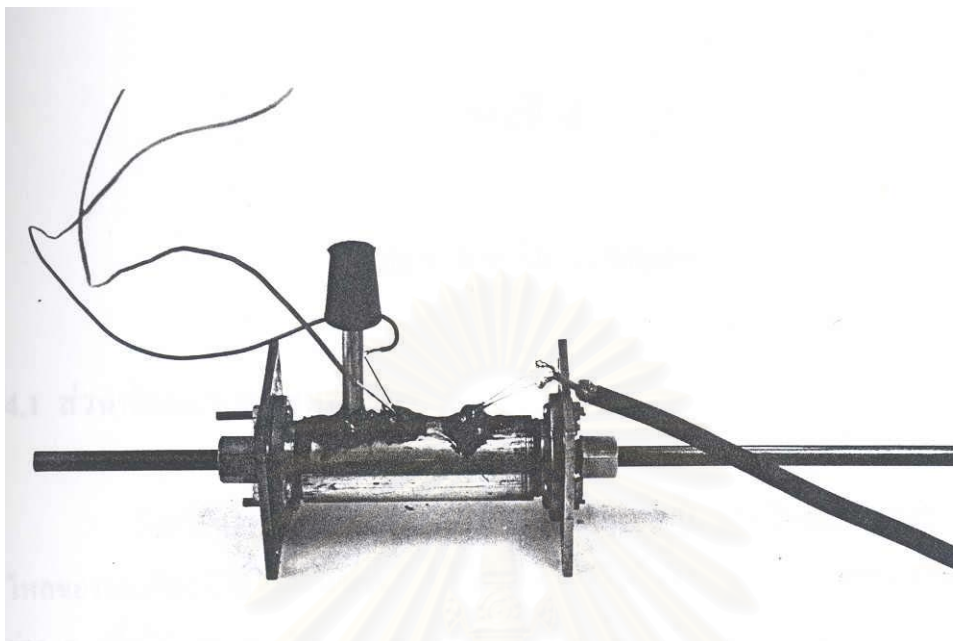
### 3.5 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโครคอมพิวเตอร์

เพื่อให้ง่ายต่อการบันทึกข้อมูลแล้ว ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการเชื่อมประสานไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่ใช้จะใช้ภาษาวิชวลเบสิก (visual basic) สำหรับโปรแกรมนี้อาจใช้ในการแสดงผลความถี่ อัตราการไหลในขณะใดขณะหนึ่ง และอัตราการไหลสะสมบนหน้าจอคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งบันทึกความถี่ที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ลงสู่แผ่นดิสก์เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งรูปแบบของหน้าจอแสดงผลจะเป็นดังรูป 3.9 โดยตัวเลขที่ปรากฏบนจอจะได้อ่านค่าจากตารางมาแสดงซึ่งจะไม่ใช้ค่าต่อเนื่อง เหมือนเครื่องวัดแบบอนาล็อก

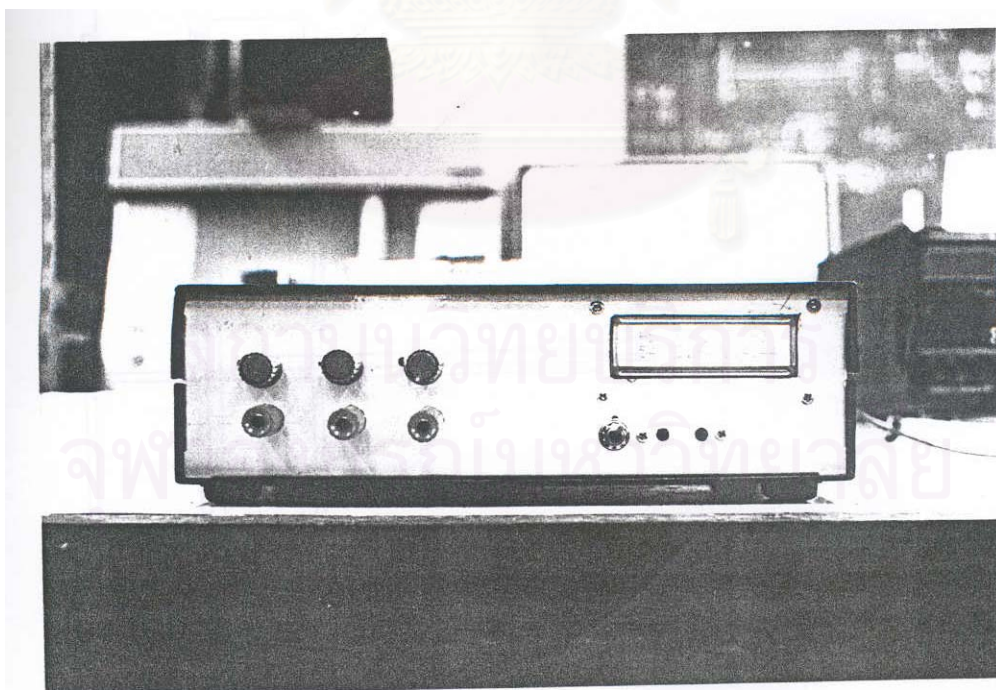


รูป 3.9 รูปหน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดอัตราการไหลบนไมโครคอมพิวเตอร์

สำหรับเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะดังรูป 3.10 และส่วนที่เป็นวงจรประมวล และแสดงผลจะถูกบรรจุในกล่องดังรูป 3.11



รูป 3.10 รูปแสดงภาพถ่ายเครื่องวัดอัตราการใช้ไฟที่สร้างขึ้น



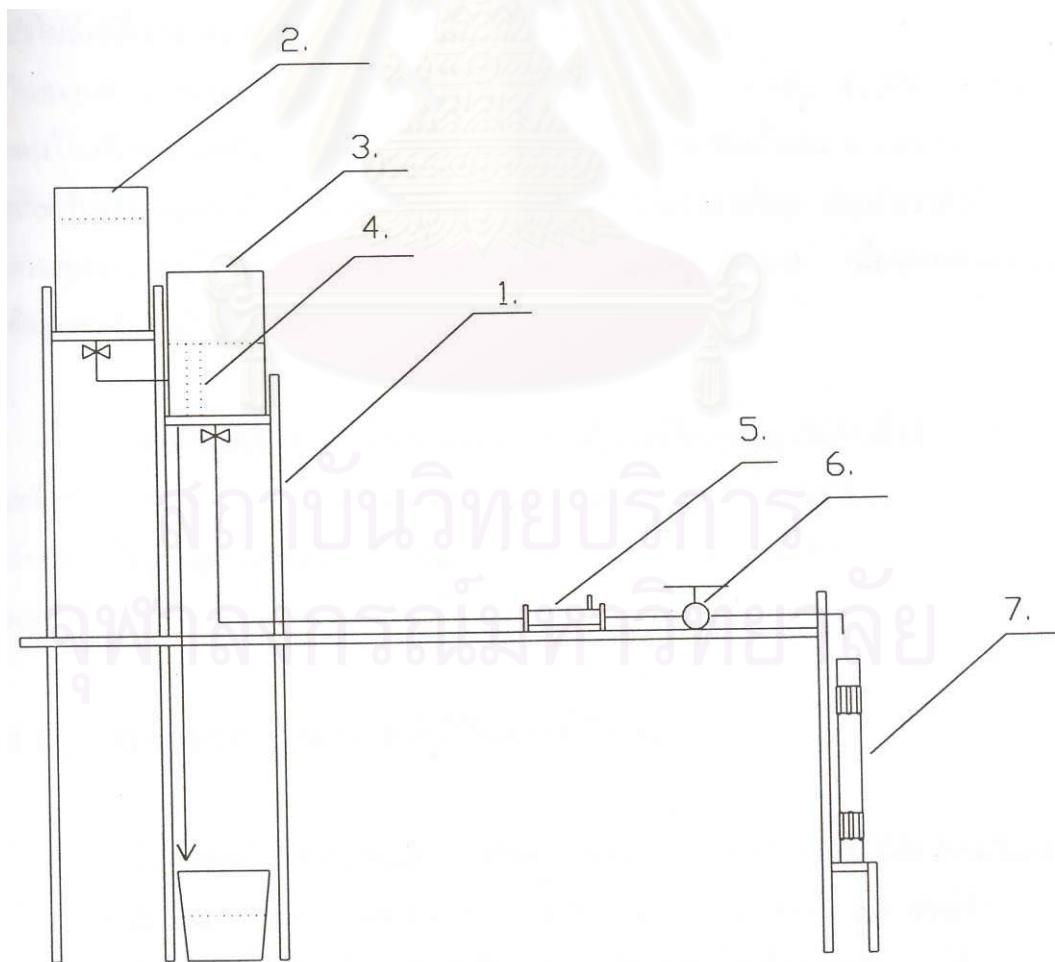
รูป 3.11 รูปแสดงส่วนประมวลผลและแสดงผลของเครื่องวัดอัตราการใช้ไฟ

## บทที่ 4

### รูปแบบและวิธีการทดลอง

#### 4.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

ในการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนั้น จำเป็นที่จะต้องควบคุมอัตราการไหลของของไหลที่ใช้ในการทดลอง ให้มีอัตราการไหลที่คงตัว และต่อเนื่งที่อัตราการไหลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ถึงสูงที่มีระดับของของไหลคงที่ ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล โดยมีวาล์วที่สามารถปรับอัตราการไหลดังแสดงในรูป 4.1



รูป 4.1 รูปแผนภาพแสดงส่วนประกอบของชุดทดลอง

ส่วนประกอบของชุดทดลองจะประกอบด้วย

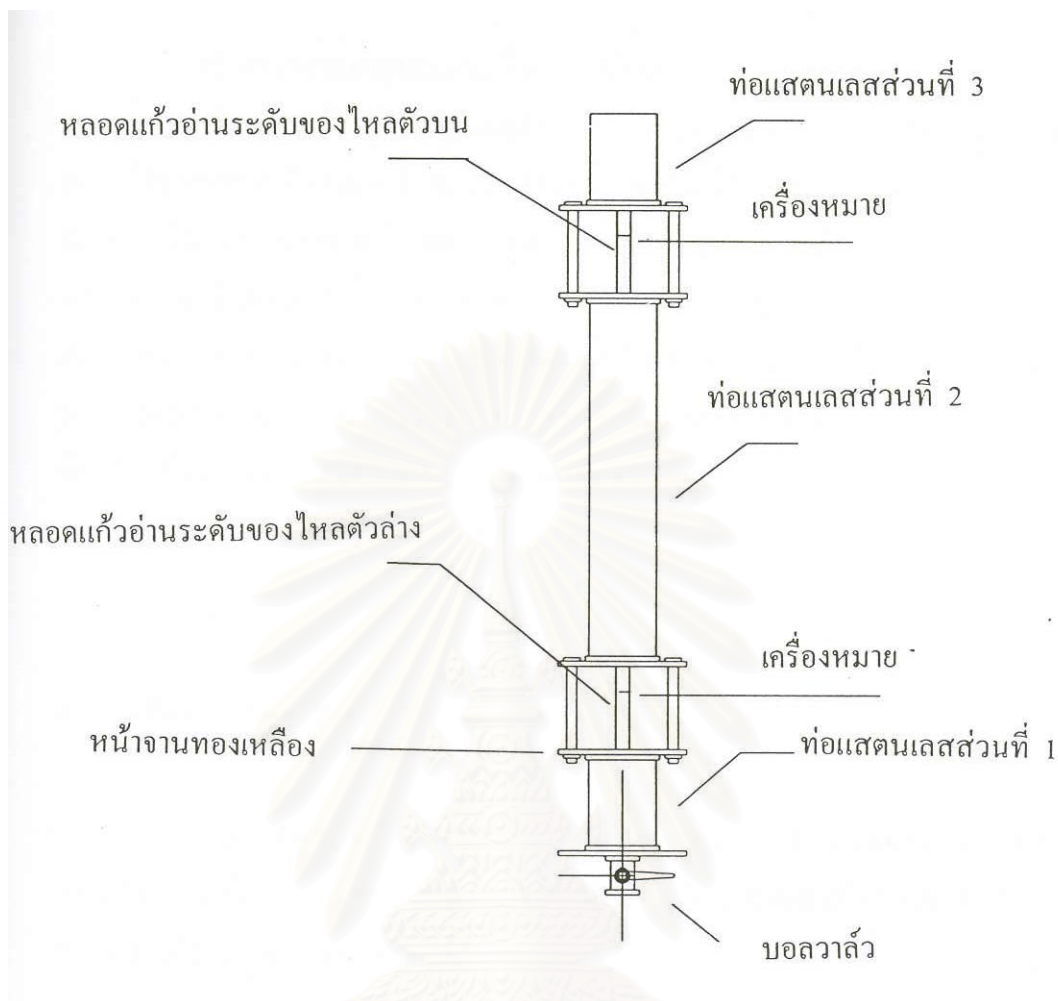
1. โครงเหล็กฉาก
2. ถังใช้บรรจุของไหลด้านบน
3. ถังใช้บรรจุของไหลด้านล่าง
4. ท่อน้ำล้น
5. เครื่องวัดอัตราการไหล
6. วาล์วเข็ม (needle valve) ปรับอัตราการไหล
7. กระจบอทดวงสำหรับวัดอัตราการไหลเพื่อใช้ในการปรับเทียบ

จากรูป 4.1 เป็นรูปแสดงส่วนประกอบของชุดทดลองซึ่งประกอบด้วย ถังสองใบอยู่บนโครงเหล็กฉาก โดยถังด้านบนจะบรรจุของไหลที่ใช้ในการทดลอง และต่อท่อเพื่อให้ไหลลงสู่ถังด้านล่างซึ่งบรรจุของไหลที่ใช้ในการทดลองเช่นกัน ภายในถังด้านล่างจะมีท่อน้ำล้น เมื่อของไหลจากถังด้านบนไหลลงสู่ถังด้านล่าง ส่วนที่เกินจะล้นออกทางท่อน้ำล้น ทำให้ถังด้านล่างมีระดับของไหลที่คงที่ตลอดเวลา โดยที่ส่วนเกินจะไหลออกทางท่อน้ำล้นนั่นเอง จากถังด้านล่างจะถูกต่อเข้าเครื่องวัดอัตราการไหล และวาล์วซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหล สำหรับวาล์วที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลในการทดลองนี้จะใช้วาล์วเข็ม (needle valve) เนื่องจากสามารถปรับอัตราการไหลได้ค่อนข้างละเอียด

ดังนั้นตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ของไหลจะไหลจากถังด้านล่างซึ่งมีหัวน้ำคงที่เข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหล และไหลลงสู่กระจบอทดวงด้วยอัตราการไหลที่คงที่ตลอดเวลา โดยที่อัตราการไหลจะถูกควบคุมด้วยวาล์วเข็ม สำหรับกระจบอทดวงที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการทดลองดังหัวข้อ 4.2

#### 4.2 การออกแบบกระจบอทดวงเพื่อใช้ในการปรับเทียบ

เนื่องจากในการทดลองพบว่าเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้ มีข้อจำกัดในการวัดค่อนข้างมาก กล่าวคือ ค่อนข้างมีช่วงการวัดที่แคบ แต่มีความไว (sensitivity) ค่อนข้างมาก ซึ่งหากใช้กระจบอทดวงทั่วไปอาจไม่สามารถวัดอัตราการไหลที่ละเอียดได้มากนัก ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องออกแบบกระจบอทดวงเพื่อใช้ในการปรับเทียบเป็นการเฉพาะ



รูป 4.2 รูปแสดงแบบกระบอกตวงที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

กระบอกตวงที่สร้างขึ้นนี้จะประกอบด้วยท่อเสตนเลส 3 ส่วน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ประกอบเข้ากับหน้างานทองเหลือง ดังรูป 4.2 โดยกระบอกตวง (ท่อเสตนเลสส่วนที่ 2) จะถูกใช้เป็นปริมาตรในการวัดจึงต้องออกแบบให้มีปริมาตรในการวัดค่อนข้างมากทั้งนี้เนื่องจากช่วงอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลมีช่วงค่อนข้างแคบ แต่มีความไวมาก ดังนั้นหากใช้กระบอกตวงที่มีปริมาตรในการวัดน้อย อาจทำให้ไม่สามารถแยกช่วงอัตราการไหลได้ชัดเจนมากนัก จึงจำเป็นที่จะต้องให้กระบอกตวงมีปริมาตรในการวัดมาก ซึ่งจากการเปรียบเทียบกระบอกตวงที่ใช้ในการวัดจะมีปริมาตร 253.00 มิลลิลิตร สำหรับหลอดแก้วที่ใช้ในการอ่านระดับของของไหลนั้น จะใช้หลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ของไหลไหลผ่านจุดที่ทำเครื่องหมายไว้ได้อย่างชัดเจน



วิธีการใช้งานกระบอกตวงนั้น หากต้องการวัดอัตราการไหล ทำได้โดยการปิดบอลวาล์ว ของไหลจะอยู่ในท่อแสดงตัวเลขส่วนที่ 1 จนกระทั่งเมื่อของไหลไหลผ่านจุดที่ทำเครื่องหมายไว้บนหลอดแก้วอ่านระดับของไหลตัวล่าง ก็จะเริ่มทำการจับเวลา ของไหลจะค่อย ๆ เพิ่มระดับผ่านท่อแสดงตัวเลขส่วนที่สอง และเมื่อระดับของของไหลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้บนหลอดแก้วอ่านระดับของไหลตัวบน ก็จะหยุดทำการจับเวลา เวลาที่อ่านได้จึงเป็นเวลาของไหลไหลจากระดับที่ทำเครื่องหมายบนหลอดแก้วตัวล่าง ถึงระดับที่ทำเครื่องหมายบนหลอดแก้วตัวบน และหากนำเอาปริมาตร 253.00 มิลลิลิตรหารด้วยเวลาที่ได้จากการจับเวลา ก็จะทำให้ได้อัตราการไหลเฉลี่ยในช่วงเวลาดังกล่าว

### 4.3 รูปแบบการทดลอง

ในการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้ จะทำการทดลองโดยใช้ของไหล 2 ชนิดเป็นหลักคือ น้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยในแต่ละชนิดของของไหลที่ใช้ในการทดลองจะมีรูปแบบการทดลองดังนี้คือ

#### 1. ทำการทดลองกับน้ำ (ผลการทดลองแสดงในหัวข้อ 5.1 )

##### 1.1 ทำการทดลองกับเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

##### 1.1.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล และทำการเปรียบเทียบ

##### 1.1.2 ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล

##### 1.1.2.1 ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

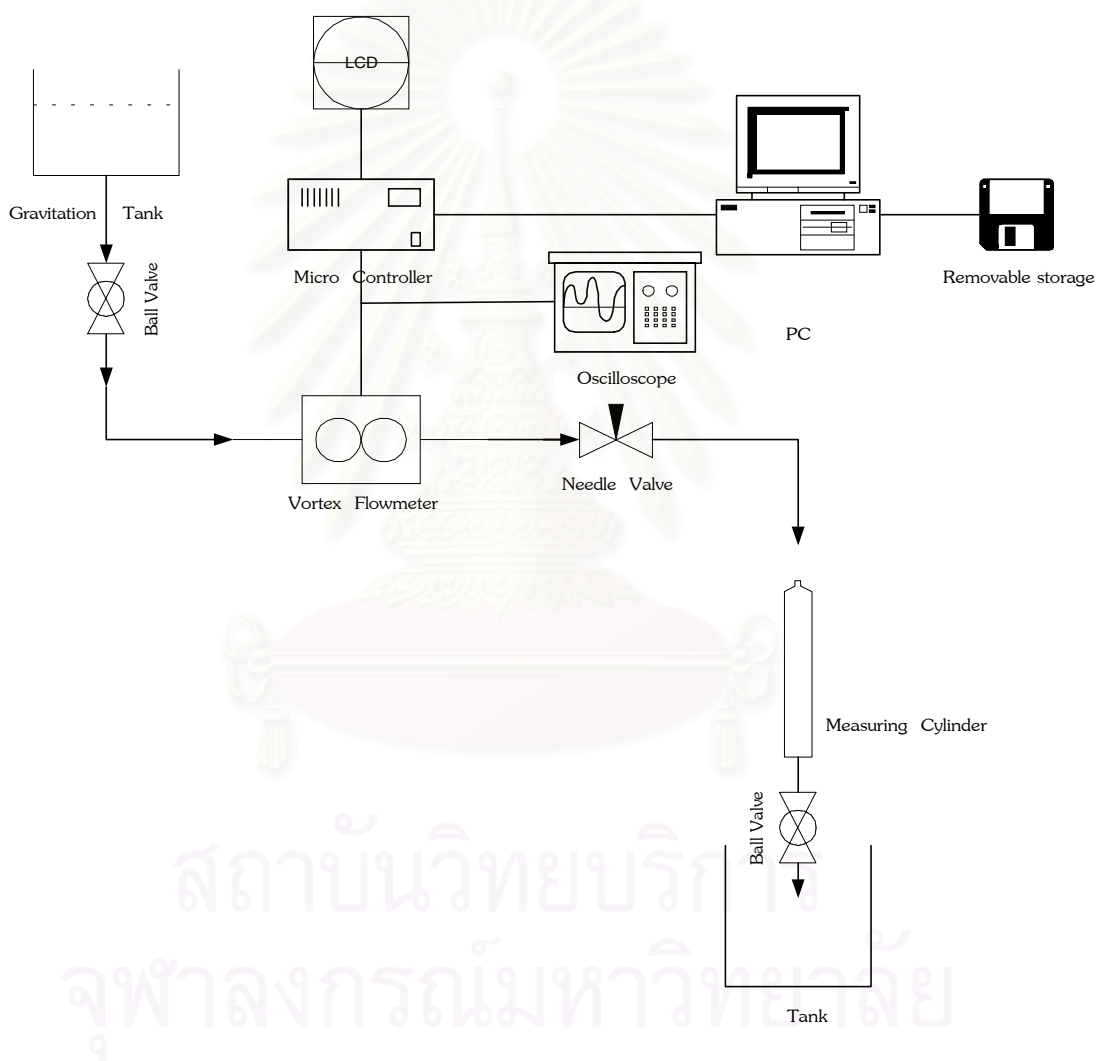
##### 1.1.2.2 ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

- 1.2 ทำการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์
  - 1.2.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล และทำการเปรียบเทียบ
  - 1.2.2 ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล
    - 1.2.2.1 ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว
    - 1.2.2.2 ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว
2. ทำการทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน (ผลการทดลองแสดงในหัวข้อ 5.2)
  - 2.1 ทำการทดลองกับเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์
    - 2.1.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล และทำการเปรียบเทียบ
    - 2.1.2 ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล
      - 2.1.2.1 ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว
      - 2.1.2.2 ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว
  - 2.2 ทำการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์
    - 2.2.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล และทำการเปรียบเทียบ
    - 2.2.2 ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล
      - 2.2.2.1 ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว
      - 2.2.2.2 ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

สำหรับวิธีการทดลองในแต่ละรูปแบบจะกล่าวในหัวข้อ 4.4

#### 4.4 วิธีการทดลองและบันทึกผล

วิธีการทดลองสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองได้ดังแสดงในรูป 4.3



รูป 4.3 รูปแผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากรูป 4.3 ของไหลจะไหลจากถังสูงที่มีระดับของของไหลคงที่เข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น และไหลลงสู่กระบอกตวง โดยที่อัตราการไหลจะถูกควบคุมด้วยวาล์วเข็ม ลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคป ส่วนความถี่จะเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการนับความถี่ของสัญญาณพัลส์ และแสดงค่าความถี่ทางจอ แอล ซี ดี จากนั้นจะส่งค่าไปยังไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผล และเนื่องจากความถี่ที่นับได้เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 1 วินาที ดังนั้นความถี่ที่แสดงทางจอ แอล ซี ดี จะแสดงค่าใหม่ในทุก ๆ 1 วินาที และส่งไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ทุก 1 วินาทีเช่นกัน ส่วนอัตราการไหลที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะใช้การจับเวลาที่ของไหลไหลลงสู่กระบอกตวง โดยนาฬิกาที่ใช้มีความละเอียดอยู่ในช่วง 1/100 วินาที สำหรับรายละเอียดของวิธีการทดลองในแต่ละรูปแบบจะเป็นดังนี้

#### 4.4.1 วิธีการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล และการเปรียบเทียบ

วิธีการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ทั้งน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน จะใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ จัดเรียงตามรูป 4.3 โดยของไหลจะไหลจากถังสูงเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหล และไหลลงสู่กระบอกตวง เมื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับค่าอัตราการไหล จะทำการปิดวาล์วที่กระบอกตวง ของไหลจะอยู่ในกระบอกตวงจนกระทั่งระดับของของไหลขึ้นสู่ระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่หลอดแก้วด้านล่าง จะเริ่มทำการจับเวลาพร้อม ๆ กับ กดปุ่ม Start ที่หน้าจคอมพิวเตอร์ (ดังแสดงในรูป 3.9) ความถี่ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลจะถูกส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผล โดยจะบันทึกค่าในทุก ๆ 1 วินาที จนระดับของของไหลขึ้นถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่หลอดแก้วด้านบน ก็จะทำการหยุดการจับเวลาพร้อมกับกดปุ่ม Stop ที่หน้าจคอมพิวเตอร์เช่นกัน เวลาที่ได้จากนาฬิกาจะเป็นเวลาที่ของไหลไหลในปริมาตร 253.00 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาทีและมีจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง เมื่อนำเอาปริมาตรหาร ด้วยเวลา จะทำให้ทราบค่าอัตราการไหล และเนื่องจากในการทดลองจริงถึงแม้ว่าจะควบคุมอัตราการไหลให้คงตัว แต่ความถี่ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลอาจมีความถี่ที่ไม่คงที่เท่ากันทุกครั้ง ดังนั้นความถี่ที่ได้จากการบันทึกจากไมโครคอมพิวเตอร์ จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างเช่น ที่อัตราการไหล 2.19 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ความถี่ที่นับได้ในแต่ละวินาทีมีค่าดังนี้

วินาทีที่	ความถี่
1	38
2	38
3	37
4	38
.	.
.	.
.	.
116	37

ที่อัตราการไหล 2.19 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เวลาในการจับเวลา 115.53 วินาที ดังนั้น ไมโครคอมพิวเตอร์จะสามารถบันทึกค่าความถี่ได้ 116 ครั้ง (พิเศษขึ้น) โดยความถี่ที่บันทึกได้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 37 เฮิรตซ์ ถึง 38 เฮิรตซ์ ซึ่งสามารถคิดเป็นค่าความถี่เฉลี่ยทั้ง 116 ครั้ง เท่ากับ 37.49 เฮิรตซ์ เป็นต้น ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่อัตราการไหลต่าง ๆ จากนั้นจะทำการหาสมการที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อหาเส้นโค้งในการปรับเทียบ (calibration curve) อัตราการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบจะถูกนำไปบันทึกลงในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะใช้ในการประมวลผลแบบค้นหาค่าจากตาราง (lookup table) และแสดงออกทางจอ แอล ซี ดี ดังรูป 3.11 โดยค่าที่แสดงออกนี้เป็นค่าที่ได้จากตารางในการปรับเทียบซึ่งไม่ใช่ค่าที่ต่อเนื่อง ค่าอัตราการไหลที่ได้นี้จะถูกนำไปทดสอบความถูกต้องต่อไป ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.4.2

สำหรับการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหล ที่มีวัดถุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร ตลอดจนการทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัดถุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร จะใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน

#### 4.4.2 วิธีการทดสอบความถูกต้องที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล

ในทดสอบความถูกต้องที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล ในงานวิทยานิพนธ์นี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. การทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว
2. การทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

การทดสอบทั้งสองรูปแบบจะใช้ในการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหล ที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร โดยทดสอบทั้งกับน้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน สำหรับรายละเอียดของวิธีการทดสอบ จะเป็นดังหัวข้อ 4.4.2.1 และ 4.4.2.2

##### 4.4.2.1 วิธีการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

เมื่อทำการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการเปรียบเทียบในหัวข้อ 4.4.1 ลงในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว จะทำการทดสอบความถูกต้อง โดยการวัดอัตราการไหลแบบปริมาตรสะสม ซึ่งทำได้โดยการนำเอาอัตราการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ จากหน่วยความจำในแต่ละวินาทีมารวมกันไปเรื่อย ๆ และนำเอาปริมาตรที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลมาทำการเปรียบเทียบกับปริมาตรจริง โดยวิธีการทดลองทำได้ดังนี้คือ เมื่อต้องการทดสอบความถูกต้องจะทำการปิดบอลวาล์วที่กระบอกตวงของไหลจะอยู่ในกระบอกตวงจนกระทั่งระดับของของไหลขึ้นถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่หลอดแก้วด้านล่างก็จะทำการกดปุ่ม Start ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ (ดังแสดงในกรอบปริมาณการไหลสะสมในรูป 3.9) พร้อม ๆ กับเริ่มจับเวลาจนกระทั่งเมื่อระดับของของไหลขึ้นถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่หลอดแก้วด้านบน จะหยุดการจับเวลา พร้อม ๆ กับกดปุ่ม Stop จากนั้นบันทึกค่าเวลาที่ได้จากการจับเวลา และปริมาตรสะสมลงในตาราง

ทำการทดลองความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัวที่อัตราการไหลต่าง ๆ 20 ครั้งเมื่อทดสอบกับน้ำ และ 10 ครั้งเมื่อทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

#### 4.4.2.2 วิธีการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

วิธีการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว จะมีวิธีการคล้ายคลึงกับวิธีการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว แต่จะต่างกันที่อัตราการไหลระหว่างการจับเวลาจะไม่คงตัว ซึ่งทำได้โดยการปรับวาล์วเข็ม เมื่อปรับวาล์วเข็ม อัตราการไหลจะเปลี่ยนไปแบบสุ่ม (random) ซึ่งจะเสมือนการจำลองอัตราการไหลในเครื่องยนต์ในสถานการณ์จริงที่อัตราการไหลเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยในการทดสอบจะทดสอบเปลี่ยนระดับอัตราการไหล จากระดับหนึ่งสู่อีกระดับหนึ่ง เป็นจำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11 ครั้งตามลำดับ ซึ่งวิธีการทดสอบทำได้ดังนี้คือ ปิดบอลวาล์วที่กระบอกตรวจจนกระทั่งเมื่อระดับของของไหลขึ้นถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่หลอดแก้วด้านล่าง ก็จะทำการจับเวลา พร้อมกับกดปุ่ม Start เช่นเดียวกันกับ วิธีการทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว แต่ในระหว่างที่ของไหลไหลในกระบอกตรวจจะทำการปรับอัตราการไหลจากระดับหนึ่งสู่อีกระดับหนึ่ง ตามจำนวนครั้งที่ต้องการ

#### 4.5 สรุปขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับ อัตราการไหล
2. นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมากำหนดช่วง และหาสมการที่สอดคล้องกับการทดลอง จากนั้นนำสมการดังกล่าวมาหาอัตราการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ และบรรจุข้อมูลลงในหน่วยความจำ
3. ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว
4. ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

ขั้นตอนการทดลองทั้ง 4 ข้อดังกล่าวข้างต้นจะใช้ในการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดมุมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร โดยใช้น้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน เป็นของไหล

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ตลอดจนทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นเมื่อทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

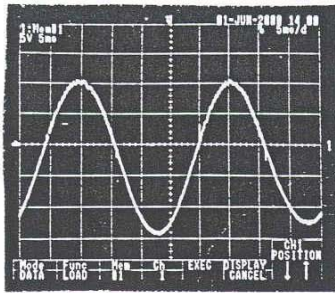
#### 5.1 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ

5.1.1 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

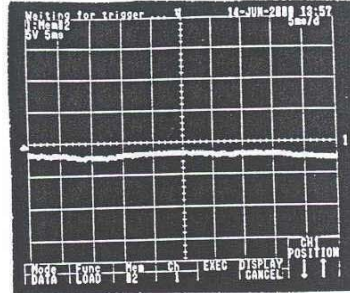
สำหรับผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น ผลการทดลองสามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 38 เฮิร์ตซ์ ถึง 70 เฮิร์ตซ์

และเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าสัญญาณความถี่ที่ได้ เป็นสัญญาณความถี่ที่เกิดจากตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์จริง จึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตถุมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ กับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเดียวกันที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์เมื่อทดลองกับน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสัญญาณที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปของการทดลองทั้งสองที่อัตราการไหลต่างๆ สามารถแสดง ได้ดังรูป 5.1.1 (ก)–(ข) ถึง รูป 5.5.2 (ก)–(ข)

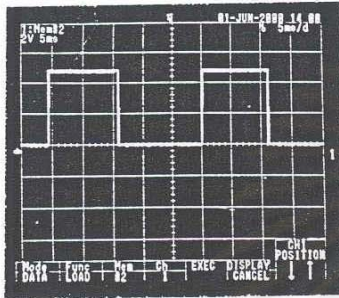




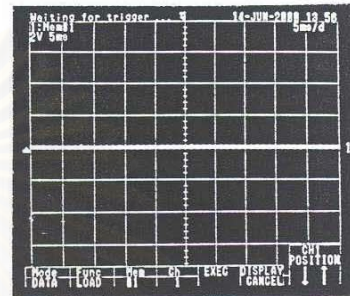
(ก)



(ง)



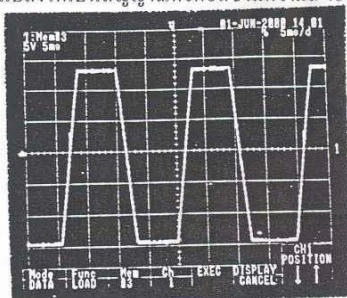
(ข)



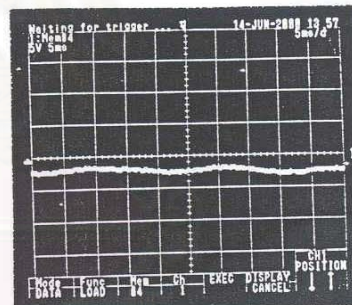
(จ)

รูป 5.1.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งมีความถี่ 40 เฮิรตซ์

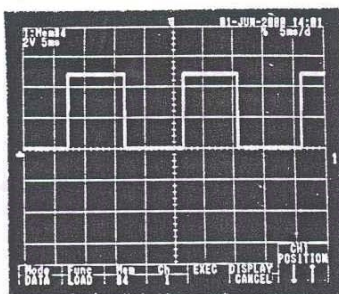
รูป 5.1.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล



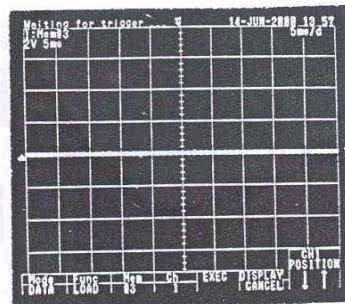
(ค)



(ง)



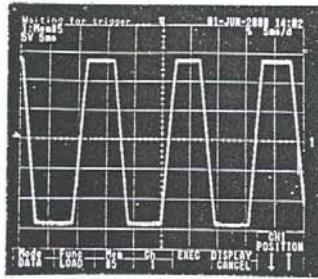
(ข)



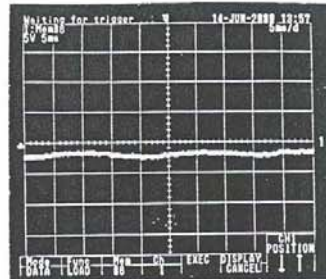
(จ)

รูป 5.2.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งมีความถี่ 50 เฮิรตซ์

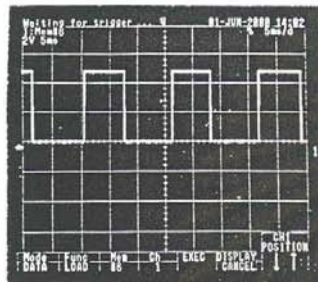
รูป 5.2.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล



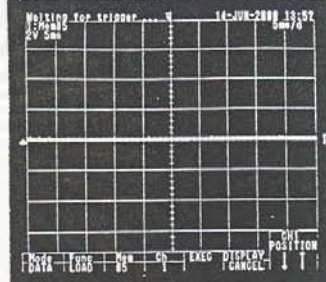
(ก)



(ก)



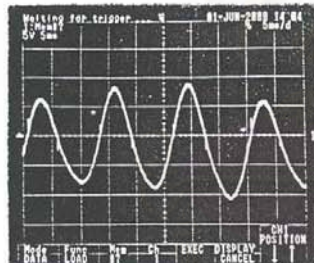
(ข)



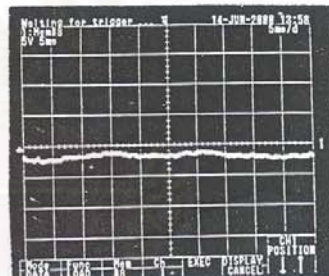
(ข)

รูป 5.3.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งมีความถี่ 60 เฮิรตซ์

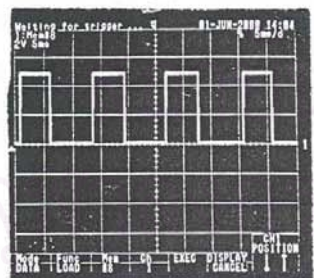
รูป 5.3.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล



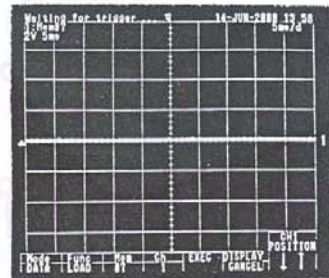
(ก)



(ก)



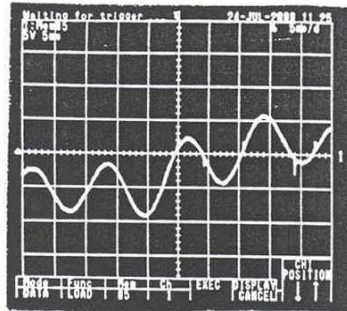
(ข)



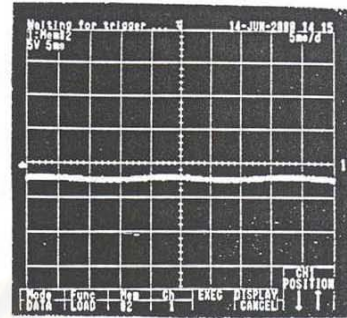
(ข)

รูป 5.4.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งมีความถี่ 70 เฮิรตซ์

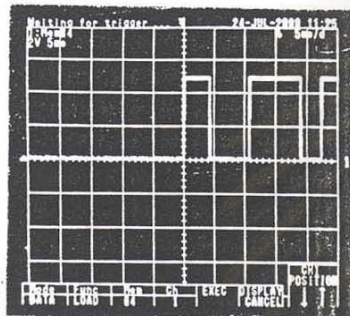
รูป 5.4.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดอุณหภูมิต่อวินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล



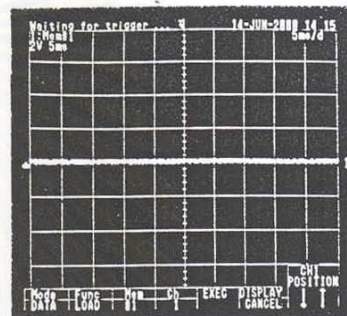
(ก)



(ก)



(ข)



(ข)

รูป 5.5.1 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัดอุณหภูมิต่อวินาทีผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตรเป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหล 3.62 มิลลิเมตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล

รูป 5.5.2 (ก) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยไม่มีวัดอุณหภูมิต่อวินาทีที่อัตราการไหล 3.62 มิลลิเมตร ต่อ วินาที (ข) รูปแสดงสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล

จากรูป 5.1.1 (ก) เป็นรูปแสดงถึงลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหล 2.34 มิลลิเมตร ต่อ วินาที จะพบว่าสัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบที่มีความถี่ของคาบคงที่ สัญญาณดังกล่าวเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อเข้าสู่วงจรนับ สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังรูป 5.1.1 (ข) ซึ่งมีความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณในรูป 5.1.2 (ก) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลเดียวกันที่อัตราการไหลเท่ากัน แต่นำเอาตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ออก จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น จะไม่ปรากฏสัญญาณความถี่ใดๆ ขึ้นเลย ดังนั้นเมื่อสัญญาณดังกล่าวถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ดังรูป 5.1.2 (ข) จึงไม่ปรากฏสัญญาณพัลส์ขึ้นทำให้จำนวนพัลส์ที่ได้จากวงจรนับมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อปรับอัตราการไหลเพิ่มขึ้น สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ จะมีลักษณะดังรูป 5.2.1(ก) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหล 2.78 มิลลิลิตรต่อ วินาที สัญญาณในรูป 5.2.1(ก) นี้เมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจะมีลักษณะดังรูป 5.2.1(ข)ซึ่งสามารถวัดความถี่ได้ 50 เฮิร์ตซ์ และหากเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหลเดียวกันดังรูป 5.2.2(ก) จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากเครื่อง วัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น จะไม่ปรากฏสัญญาณความถี่ใด ๆ เลยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อสัญญาณดังกล่าวถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ดังรูป 5.2.2 (ข) จึงไม่ปรากฏสัญญาณพัลส์ ความถี่ที่นับได้จากวงจรนับจึงเป็นศูนย์ เมื่อปรับอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้นอีก สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล ที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์อยู่จะมีลักษณะดังรูป 5.3.1(ก)-(ข) ซึ่งเป็นสัญญาณ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหล 3.16 มิลลิลิตรต่อ วินาที และสามารถวัดความถี่ได้ 60 เฮิร์ตซ์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่อัตราการไหลเดียวกัน ดังรูป 5.3.2 (ก)-(ข) จะพบว่าเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์อยู่ไม่น่าปรากฏสัญญาณความถี่ใด ๆ อีกเช่นกัน และเมื่อปรับอัตราการไหลขึ้นจนถึงช่วงประมาณ 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังรูป 5.4.1 (ก)-(ข) ซึ่งมีความถี่ 70 เฮิร์ตซ์ และหากเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ ดังรูป 5.4.2 (ก)-(ข) จะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว คือไม่ปรากฏสัญญาณความถี่ใด ๆ ขึ้นเลย ความถี่ที่ได้จากวงจรนับจึงมีค่าเป็นศูนย์ และหากปรับอัตราการไหลขึ้นอีก สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะที่ไม่คงที่ โดยลักษณะของสัญญาณที่ได้ จะมีสัญญาณความถี่ในโหมดอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องดังรูป 5.5.1(ก) ดังนั้นเมื่อสัญญาณดังกล่าวถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจะมีลักษณะดังรูป 5.5.1 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ที่ได้จะปรากฏอยู่ทางด้านขวามือของรูปเท่านั้น เนื่องจากสัญญาณทางด้านซ้ายมือไม่ผ่านจุดทริกนั่นเอง และเมื่อสัญญาณพัลส์ในรูป 5.5.1 (ข) เข้าสู่วงจรนับค่าที่ได้จากวงจรนับจึงเป็นค่าที่ผิดพลาด ส่วนสาเหตุที่สัญญาณเกิดความไม่เป็นระเบียบนั้นอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการปั่นป่วนของของไหล เมื่อของไหลไหลด้วยความเร็วมากขึ้นทำให้ลักษณะของสัญญาณที่ได้ไม่มีความเป็นระเบียบ และทำให้เกิดความผิดพลาดในการนับพัลส์ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อ 5.5 ดังนั้นที่อัตราการไหลตั้งแต่ช่วงดังกล่าวขึ้นไป จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการวัดได้ และหากเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีวัดอุณหภูมิที่อัตราการไหลเดียวกันดังรูป 5.5.2 (ก)-(ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้ไม่ปรากฏสัญญาณความถี่ใดๆ เช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ลักษณะของสัญญาณที่ได้ระหว่าง เครื่องวัด อัตราการไหลที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ และเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ที่ อัตราการไหลเดียวกันนั้น มีลักษณะที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง กล่าวคือลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์จะให้สัญญาณความถี่ที่มีค่าคงที่ตลอดเมื่อ อัตราการไหลมีค่าคงตัว และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการทำงานของ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ ในขณะที่สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่ไม่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น จะไม่ปรากฏสัญญาณความถี่ใดเลยเมื่อทดลองที่อัตราการไหลเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นการพิสูจน์ว่าสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น เป็นสัญญาณที่เกิดจากพัลส์ความดันของวอร์เท็กซ์จริง

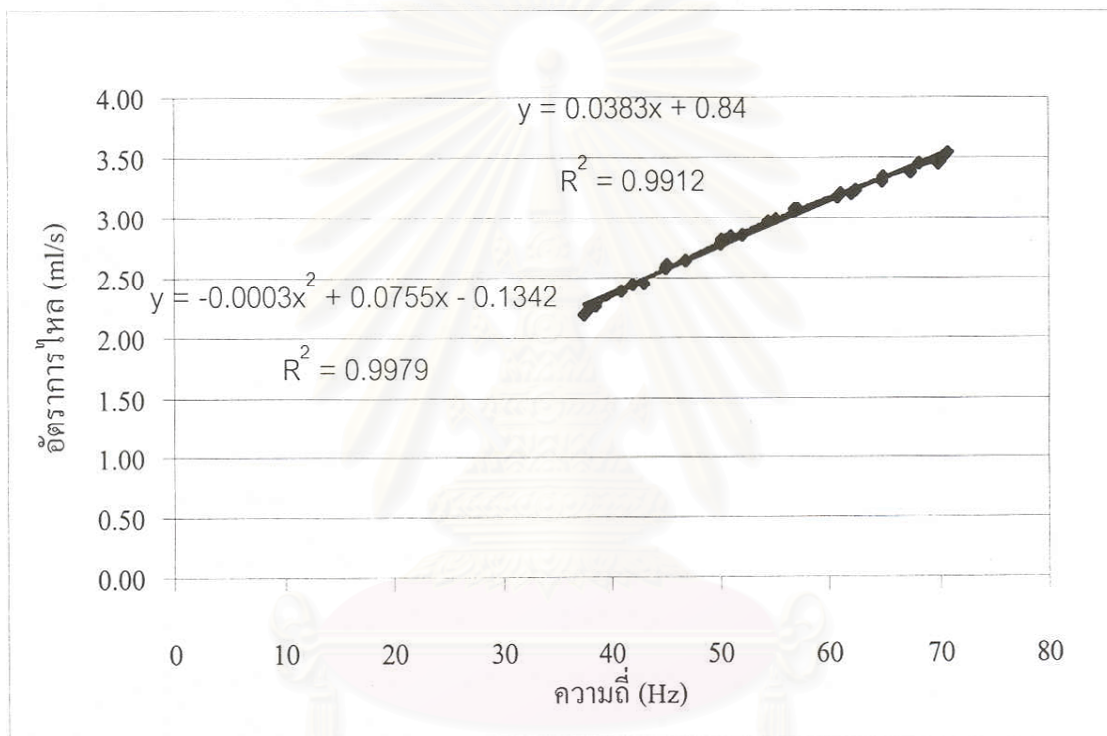
สำหรับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้นั้นถึงแม้จะเปลี่ยนไปตามอัตราการไหลเช่นกัน แต่จากการทดลองพบว่า ยังมีปัจจัยอีกหลายประการที่มีอิทธิพลต่อแอมพลิจูด หรือลักษณะของ สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจที่จะวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการวัด กับอัตราการไหลเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับ อัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น จากการทดลอง พบว่ามีความสัมพันธ์ดังกราฟรูป 5.6 (รายละเอียดอยู่ในตาราง ผก - 1 ในภาคผนวก ก)



รูป 5.6 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

เส้นความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลจากกราฟในรูป 5.6 จะใช้สำหรับเป็นเส้นโค้งในการเปรียบเทียบ ซึ่งจากการหาสมการที่สอดคล้องกับเส้นโค้งในกราฟรูป 5.6 โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression) จะได้สมการ 5.1 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในช่วงความถี่ 38 เฮิรตซ์ ถึง 70 เฮิรตซ์

$$\hat{Q} = 0.0383f + 0.841 \quad (5.1)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination)	$R^2 = 0.991$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (sum of square error ,SSE)	$SSE = 0.0411 \text{ ml}^2/\text{s}^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0390 \text{ ml/s}$

และหากหาสมการที่สอดคล้องโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) แล้วจะได้สมการดังสมการ 5.2 ซึ่งใช้ใน ช่วงความถี่ 38 เฮิร์ตซ์ ถึง 70 เฮิร์ตซ์

$$\hat{Q} = -3.43 \times 10^{-4} f^2 + 0.076f - 0.135 \quad (5.2)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด	$R^2 = 0.997$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	$SSE = 0.0100 \text{ ml}^2/\text{s}^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0197 \text{ ml/s}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลในกราฟรูป 5.6 จะเห็นได้ว่าหากใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามดังสมการ 5.2 แล้วจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น อีกทั้งยังมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นอยู่ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า หากใช้สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นแล้วจะมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ประมาณ 6.5 เปอร์เซ็นต์ ของช่วงการวัด ดังนั้นในการใช้งานเครื่องวัดอัตราการไหลในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับ อัตราการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบพหุนามเป็นข้อมูลในตารางปรับเทียบดังแสดงในตาราง 5.1 โดยจะทำการบรรจุข้อมูลในตาราง 5.1 ลงในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำการทดสอบความถูกต้องต่อไป ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตาราง 5.2 และ 5.3

ความถี่ $f(\text{Hz})$	อัตราการไหล $Q^A(\text{ml/s})$
38	2.24
39	2.29
40	2.34
41	2.39
42	2.43
43	2.48
44	2.52
45	2.57
46	2.61
47	2.66
48	2.70
49	2.74
50	2.78
51	2.83
52	2.87
53	2.91
54	2.94
55	2.98
56	3.02
57	3.06
58	3.09
59	3.13
60	3.16

ตาราง 5.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์



ความถี่ $f$ (Hz)	อัตราการไหล $Q$ (ml/s)
61	3.20
62	3.23
63	3.26
64	3.29
65	3.33
66	3.36
67	3.39
68	3.42
69	3.44
70	3.47

ตาราง 5.1 (ต่อ) ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นจากเส้นโค้งในการเปรียบเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.1.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอก  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำ

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )		
1	104.30	253.00	2.43	105.00	251.85	2.40	-0.03	-0.45
2	106.22	253.00	2.38	107.00	256.85	2.40	0.02	1.52
3	105.55	253.00	2.40	106.00	253.58	2.39	-0.01	0.23
4	99.65	253.00	2.54	100.00	257.18	2.57	0.03	1.67
5	98.59	253.00	2.57	99.00	253.50	2.56	-0.01	0.20
6	98.81	253.00	2.56	99.00	254.12	2.57	0.01	0.44
7	90.60	253.00	2.79	91.00	254.52	2.80	0.01	0.60
8	90.43	253.00	2.80	91.00	253.95	2.79	-0.01	0.38
9	89.79	253.00	2.82	90.00	250.95	2.79	-0.03	-0.81
10	90.91	253.00	2.78	91.00	253.42	2.78	0.00	0.17
11	84.36	253.00	3.00	85.00	252.22	2.97	-0.03	-0.31
12	85.17	253.00	2.97	86.00	253.84	2.95	-0.02	0.34
13	84.88	253.00	2.98	85.00	251.14	2.95	-0.03	-0.74
14	85.34	253.00	2.96	86.00	255.32	2.97	-0.01	-0.92
15	80.78	253.00	3.13	81.00	256.15	3.16	0.03	1.25

ตาราง 5.2 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรง  
กระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบ  
กับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด (ml/s)	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา (s)	ปริมาตรสะสม (ml)	อัตราการไหล (ml/s)	เวลา (s)	ปริมาตรสะสม (ml)	อัตราการไหล (ml/s)		
16	80.04	253.00	3.16	81.00	257.08	3.17	0.01	1.61
17	79.73	253.00	3.17	80.00	253.23	3.17	0.00	0.09
18	76.46	253.00	3.31	77.00	255.96	3.32	0.01	1.17
19	76.28	253.00	3.32	77.00	255.00	3.31	-0.01	0.79
20	76.52	253.00	3.31	77.00	257.91	3.35	0.04	1.94

ตาราง 5.2 (ต่อ) ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดดุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

จากราย 5.2 สามารถหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} &= \frac{\sum |\text{ความผิดพลาด}|}{\text{จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง}} \\ &= \frac{0.35}{20} = 0.0175 \quad \text{ml/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความผิดพลาดเชิงปริมาตรเฉลี่ย} &= \frac{\sum |\text{ความผิดพลาดเชิงปริมาตร}|}{\text{จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง}} \\ &= \frac{15.63}{20} = 0.78 \quad \text{เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตรเป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

จำนวนครั้ง ในการปรับ อัตราการไหล	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )		
1	83.93	253.00	3.01	84.00	253.68	3.02	0.01	0.26
1	83.74	253.00	3.02	84.00	251.50	2.99	-0.03	-0.59
3	86.52	253.00	2.92	87.00	249.89	2.87	-0.05	-1.23
3	81.73	253.00	3.10	82.00	250.33	3.05	-0.05	-1.06
5	87.36	253.00	2.90	88.00	248.35	2.82	-0.08	-1.84
5	85.18	253.00	2.97	86.00	250.92	2.92	-0.05	-0.82
7	91.15	253.00	2.78	92.00	249.12	2.71	-0.07	-1.53
7	84.31	253.00	3.00	85.00	248.38	2.92	-0.08	-1.83
9	83.67	253.00	3.02	84.00	248.95	2.96	-0.06	-1.60
9	84.83	253.00	2.98	85.00	248.20	2.92	-0.06	-1.90
11	82.09	253.00	3.08	83.00	247.53	2.98	-0.10	-2.16
11	85.40	253.00	2.96	86.00	249.92	2.91	-0.05	-1.22

ตาราง 5.3 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

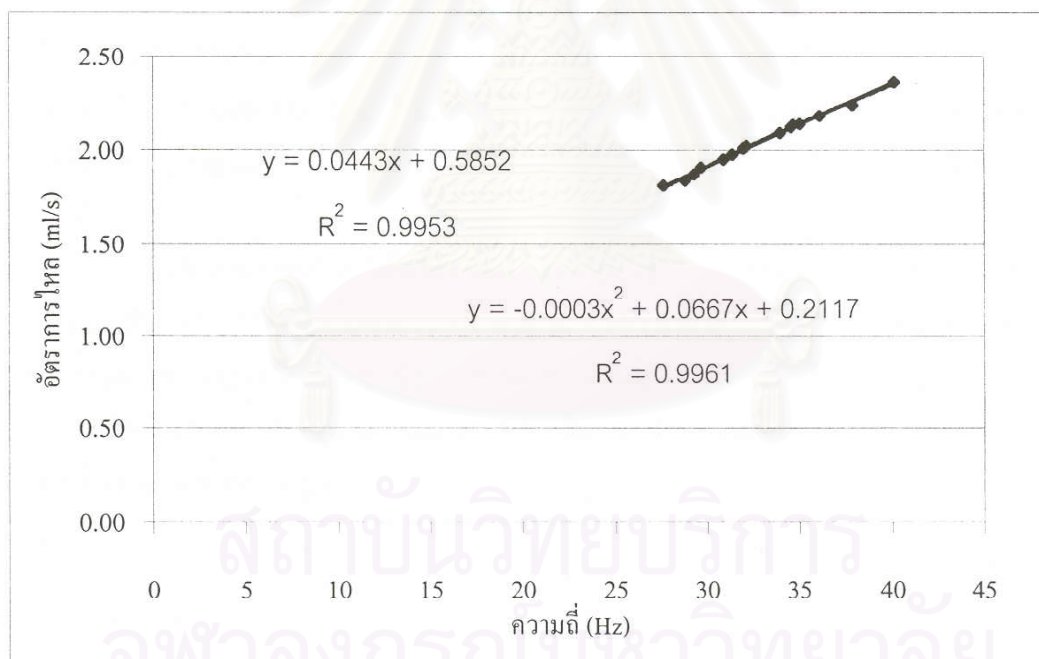
$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = \frac{0.69}{12} = 0.058 \quad ml/s$$

### 5.1.2 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น ผลการทดลองสามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.82 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.35 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 28 เฮิรตซ์ ถึง 40 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

#### 5.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้น จากการทดลอง พบว่ามีความสัมพันธ์ดังกราฟรูป 5.7 (รายละเอียดอยู่ในตาราง ผก-2 ในภาคผนวก ก)



รูป 5.7 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับ อัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

หากนำเส้นโค้งในกราฟรูป 5.7 นี้มาหาสมการที่สอดคล้องกับเส้นกราฟ โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจะได้สมการดังสมการ 5.3 ซึ่งใช้ใน ช่วงความถี่ 28 เฮิร์ตซ์ ถึง 40 เฮิร์ตซ์

$$\overset{A}{Q} = 0.0443f + 0.585 \quad (5.3)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด

$$R^2 = 0.995$$

ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

$$SSE = 0.0016 \text{ ml}^2/\text{s}^2$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S = 0.0111 \text{ ml/s}$$

ความไม่เป็นเชิงเส้น

4 % ของช่วงการวัด

หากใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม จะได้สมการดังสมการ 5.4 ซึ่งใช้ใน ช่วงความถี่ 28 เฮิร์ตซ์ ถึง 40 เฮิร์ตซ์

$$\overset{A}{Q} = -3.345 \times 10^{-4} f^2 + 0.067f + 0.212 \quad (5.4)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด

$$R^2 = 0.9961$$

ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

$$SSE = 0.0013 \text{ ml}^2/\text{s}^2$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S = 0.0101 \text{ ml/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงใช้สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามดังสมการ 5.4 เป็นสมการสำหรับหาค่าอัตราการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 5.4

ความถี่ $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q^A(ml/s)$
28	1.82
29	1.87
30	1.91
31	1.96
32	2.00
33	2.05
34	2.09
35	2.14
36	2.18
37	2.22
38	2.26
39	2.31
40	2.35

ตาราง 5.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นจากเส้นโค้งในการเปรียบเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดลมนรูปรทงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำ

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดลมนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )		
1	137.66	253.00	1.84	138.00	253.46	1.84	0.00	0.18
2	138.09	253.00	1.83	139.00	257.20	1.85	0.02	1.66
3	135.92	253.00	1.86	136.00	253.77	1.87	0.01	0.30
4	135.17	253.00	1.87	136.00	254.14	1.87	0.00	0.45
5	126.96	253.00	1.99	127.00	253.40	2.00	0.01	0.16
6	126.31	253.00	2.00	127.00	253.93	2.00	0.00	0.37
7	126.43	253.00	2.00	127.00	252.60	1.99	-0.01	-0.16
8	126.81	253.00	2.00	127.00	253.36	1.99	-0.01	0.14
9	122.64	253.00	2.06	123.00	252.51	2.05	-0.01	-0.19
10	121.20	253.00	2.09	122.00	253.46	2.08	-0.01	0.18
11	123.65	253.00	2.05	124.00	254.88	2.06	0.01	0.74
12	121.77	253.00	2.08	122.00	252.74	2.07	-0.01	-0.10
13	118.73	253.00	2.13	119.00	254.78	2.14	0.01	0.70
14	116.49	253.00	2.17	117.00	254.34	2.17	0.00	0.53
15	117.04	253.00	2.16	118.00	254.84	2.16	0.00	0.73

ตาราง 5.5 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดลมนรูปรทงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว



ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )		
16	116.68	253.00	2.17	117.00	253.98	2.17	0.00	0.39
17	112.42	253.00	2.25	113.00	254.82	2.26	0.01	0.72
18	111.85	253.00	2.26	112.00	252.40	2.25	-0.01	-0.24
19	112.30	253.00	2.25	113.00	254.74	2.25	0.00	0.69
20	112.07	253.00	2.26	113.00	253.14	2.24	-0.02	0.06

ตาราง 5.5 (ต่อ) ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตุนุมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = \frac{0.15}{20} = 0.0075 \text{ ml/s}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

จำนวนครั้ง ในการปรับ อัตราการไหล	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )		
1	130.48	253.00	1.94	131.00	252.73	1.93	-0.01	-0.11
1	121.25	253.00	2.09	122.00	252.87	2.07	-0.02	-0.05
3	126.74	253.00	2.00	127.00	253.64	2.00	0.00	-0.25
3	117.33	253.00	2.16	118.00	248.57	2.11	-0.05	-1.75
5	118.55	253.00	2.13	119.00	247.02	2.08	-0.05	-2.36
5	114.16	253.00	2.22	115.00	250.03	2.17	-0.05	-1.17
7	114.81	253.00	2.20	115.00	246.47	2.14	-0.06	-2.58
7	115.98	253.00	2.18	116.00	248.02	2.14	-0.04	-1.97
9	119.20	253.00	2.12	120.00	248.60	2.07	-0.05	-1.74
9	117.63	253.00	2.15	118.00	248.17	2.10	-0.05	-1.91
11	114.81	253.00	2.20	115.00	245.54	2.14	-0.06	-2.95
11	117.19	253.00	2.16	118.00	248.32	2.10	-0.06	-1.85

ตาราง 5.6 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

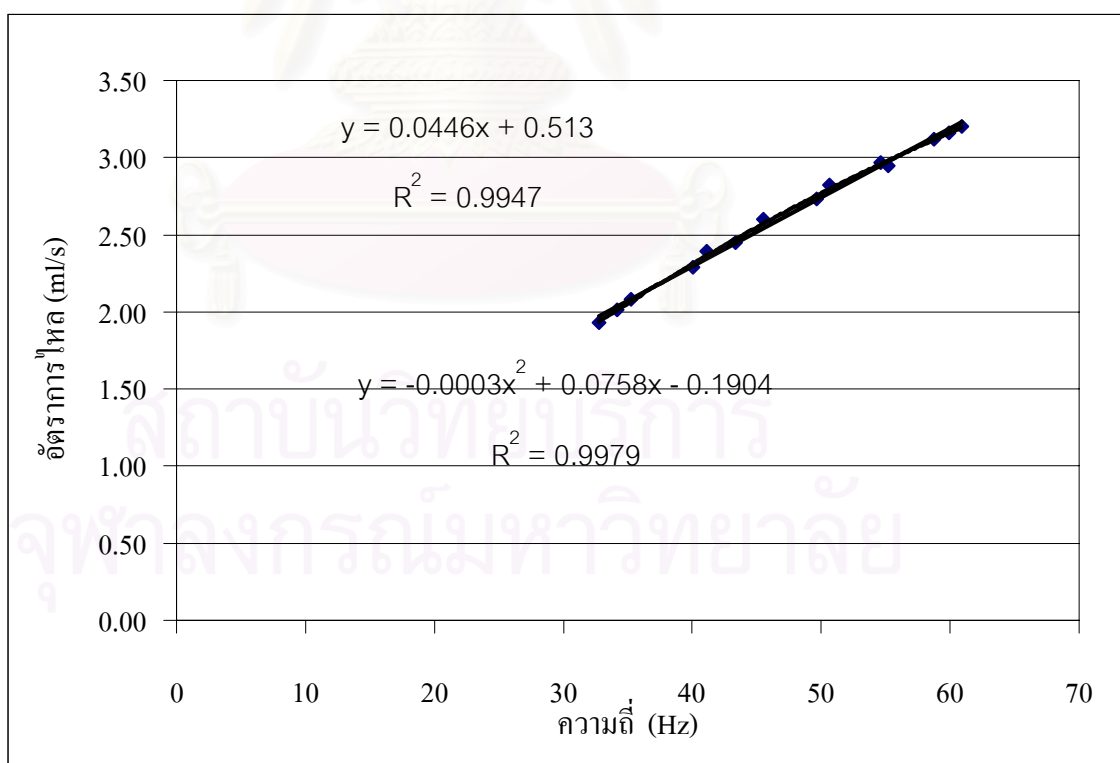
$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = 0.042 \text{ ml/s}$$

## 5.2 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

### 5.2.1 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์นั้นผลการทดลองสามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.00 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.15 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 34 เฮิรตซ์ ถึง 60 เฮิรตซ์

#### 5.2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์



รูป 5.8 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัตถุมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์แสดงได้ดังกราฟรูป 5.8 (รายละเอียดอยู่ในตาราง ผก - 3 ในภาคผนวก ก )

จากกราฟรูป 5.8 เมื่อวิเคราะห์หาสมการที่สอดคล้องกับเส้นโค้งในกราฟรูป 5.8 โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจะได้สมการดังสมการ 5.5 ซึ่งใช้ใน ช่วงความถี่ 34 เฮิร์ตซ์ ถึง 60 เฮิร์ตซ์

$$Q = 0.0446f + 0.513 \quad (5.5)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด	$R^2 = 0.995$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	$SSE = 0.0132 \quad ml^2/s^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0331 \quad ml/s$
ความไม่เป็นเชิงเส้น	4.5 % ของช่วงการวัด

เมื่อใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามสามารถหาสมการได้ดังสมการ 5.6 ซึ่งใช้ใน ช่วงความถี่ 34 เฮิร์ตซ์ ถึง 60 เฮิร์ตซ์

$$Q = -3.321 \times 10^{-4} f + 0.076 f - 0.190 \quad (5.6)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด	$R^2 = 0.998$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	$SSE = 0.0052 \quad ml^2/s^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0217 \quad ml/s$

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเมื่อใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงใช้สมการ 5.6 เป็นสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ในตารางการเปรียบเทียบ ดังแสดงในตาราง 5.7

ความถี่ $f(\text{Hz})$	อัตราการไหล $Q(\text{ml/s})$
34	2.00
35	2.06
36	2.11
37	2.16
38	2.21
39	2.26
40	2.31
41	2.36
42	2.41
43	2.46
44	2.50
45	2.55
46	2.59
47	2.64
48	2.68
49	2.73
50	2.77
51	2.81
52	2.85
53	2.89
54	2.93
55	2.97

ตาราง 5.7 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นจากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ความถี่ $f(\text{Hz})$	อัตราการไหล $Q(\text{ml/s})$
56	3.01
57	3.05
58	3.09
59	3.13
60	3.16

ตาราง 5.7 (ต่อ) ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นจากเส้นโค้งในการปรับเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.1.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตตุมรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิง เบนซิน

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตตุมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )		
1	119.65	253.00	2.11	120.00	256.10	2.13	0.02	1.23
2	118.50	253.00	2.14	119.00	253.34	2.13	-0.01	0.13
3	109.94	253.00	2.30	110.00	256.15	2.33	0.03	1.25
4	108.11	253.00	2.34	109.00	253.59	2.33	-0.01	0.23
5	98.07	253.00	2.58	99.00	253.48	2.56	-0.02	0.19
6	98.33	253.00	2.57	99.00	252.45	2.55	-0.02	-0.22
7	83.14	253.00	3.04	84.00	256.80	3.06	0.02	1.50
8	83.89	253.00	3.02	84.00	256.12	3.05	0.03	1.23
9	86.10	253.00	2.94	87.00	255.23	2.93	-0.01	0.88
10	85.75	253.00	2.95	86.00	252.14	2.93	-0.02	-0.34

ตาราง 5.8 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัตตุมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = 0.019 \text{ ml/s}$$

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

จำนวนครั้ง ในการปรับ อัตราการไหล	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ความผิดพลาด (ml/s)
	เวลา (s)	ปริมาตรสะสม (ml)	อัตราการไหลเฉลี่ย (ml/s)	เวลา (s)	ปริมาตรสะสม (ml)	อัตราการไหลเฉลี่ย (ml/s)		
1	97.50	253.00	2.59	98.00	254.61	2.60	0.01	0.64
1	99.64	253.00	2.54	100.00	252.35	2.52	-0.02	-0.26
3	104.19	253.00	2.43	105.00	251.94	2.40	-0.03	-0.42
3	97.81	253.00	2.59	98.00	249.90	2.55	-0.04	-1.23
5	90.45	253.00	2.80	91.00	247.20	2.72	-0.08	-2.29
5	88.37	253.00	2.86	89.00	248.31	2.79	-0.07	-1.85
7	86.41	253.00	2.93	87.00	249.95	2.87	-0.06	-1.21
7	88.93	253.00	2.84	89.00	248.47	2.79	-0.05	-1.79
9	87.70	253.00	2.88	88.00	250.58	2.85	-0.03	-0.96
9	88.95	253.00	2.84	89.00	247.98	2.79	-0.05	-1.98
11	91.07	253.00	2.78	92.00	249.88	2.72	-0.06	-1.23
11	89.40	253.00	2.83	90.00	248.20	2.76	-0.07	-1.90

ตาราง 5.9 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

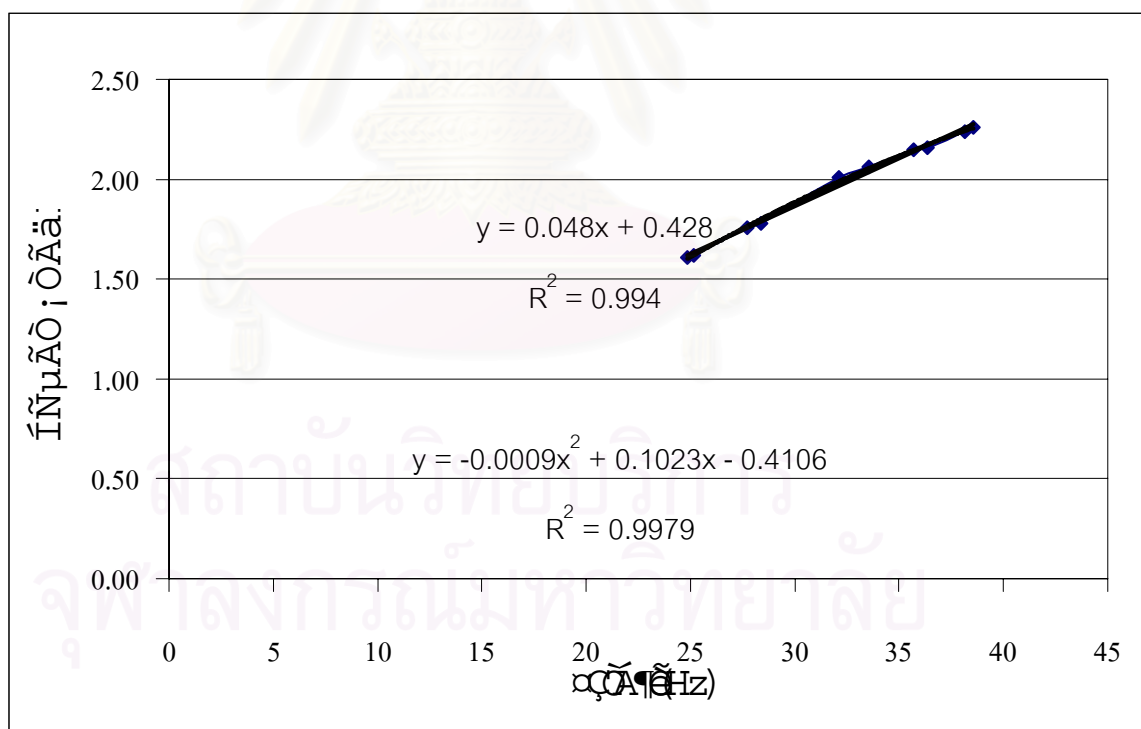
$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = 0.048 \text{ ml/s}$$



## 5.2.2 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สำหรับผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ นั้นผลการทดลองสามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.61 มิลลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.24 มิลลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับควมถี่ที่ 25 เฮิรตซ์ ถึง 38 เฮิรตซ์

### 5.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์



รูป 5.9 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์แสดงได้ดังกราฟรูป 5.9 (รายละเอียดอยู่ในตาราง ผก-4 ในภาคผนวก ก)

จากกราฟรูป 5.9 เมื่อวิเคราะห์หาสมการที่สอดคล้องกับเส้นโค้งในกราฟรูป 5.9 โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจะได้สมการดังสมการ 5.7 ซึ่งใช้กับช่วงความถี่ 25 เฮิร์ตซ์ ถึง 38 เฮิร์ตซ์

$$Q = 0.048f + 0.428 \quad (5.7)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด	$R^2 = 0.994$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	$SSE = 0.0034 \text{ ml}^2/\text{s}^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0207 \text{ ml/s}$
ความไม่เป็นเชิงเส้น	6.5 % ของช่วงการวัด

เมื่อวิเคราะห์หาสมการที่สอดคล้อง โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามจะได้สมการดังสมการ 5.8 ซึ่งใช้กับช่วงความถี่ 25 เฮิร์ตซ์ ถึง 38 เฮิร์ตซ์

$$Q = -8.589 \times 10^{-4} f^2 + 0.102f - 0.411 \quad (5.8)$$

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด	$R^2 = 0.998$
ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน	$SSE = 0.0012 \text{ ml}^2/\text{s}^2$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$S = 0.0132 \text{ ml/s}$

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเมื่อใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นอีกเช่นกัน ดังนั้นจึงใช้สมการ 5.8 เป็นสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ในตารางการเปรียบเทียบ ดังแสดงในตาราง 5.10

ความถี่เฉลี่ย $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q(ml/s)$
25	1.61
26	1.67
27	1.73
28	1.78
29	1.83
30	1.89
31	1.94
32	1.98
33	2.03
34	2.07
35	2.12
36	2.16
37	2.20
38	2.24

ตาราง 5.10 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลที่ได้จากเส้นจากเส้นโค้งในการเปรียบเทียบ เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ลำดับ	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหล ( $ml/s$ )		
1	153.77	253.00	1.65	154.00	255.02	1.66	0.01	0.80
2	152.65	253.00	1.66	153.00	251.73	1.65	-0.01	-0.52
3	143.38	253.00	1.76	144.00	254.62	1.77	0.01	0.64
4	143.80	253.00	1.76	144.00	254.30	1.77	0.01	0.51
5	136.04	253.00	1.86	137.00	253.89	1.85	-0.01	0.35
6	136.72	253.00	1.85	137.00	254.97	1.86	0.01	0.78
7	123.91	253.00	2.04	124.00	254.20	2.05	0.01	0.47
8	121.43	253.00	2.08	122.00	252.33	2.07	-0.01	-0.30
9	116.46	253.00	2.17	116.00	254.20	2.19	0.02	0.47
10	115.81	253.00	2.18	116.00	254.48	2.19	0.01	0.58

ตาราง 5.11 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = 0.011 \text{ ml/s}$$

ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

จำนวนครั้ง ในการปรับ อัตราการไหล	ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลา			ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล			ความผิดพลาด ( $ml/s$ )	ความผิดพลาด เชิงปริมาตร (เปอร์เซ็นต์) ( $ml/s$ )
	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )	เวลา ( $s$ )	ปริมาตรสะสม ( $ml$ )	อัตราการไหลเฉลี่ย ( $ml/s$ )		
1	122.59	253.00	2.06	123.00	252.66	2.05	-0.01	-0.13
1	120.07	253.00	2.11	121.00	253.94	2.10	-0.01	0.37
3	132.64	253.00	1.91	133.00	249.97	1.88	-0.03	-1.20
3	123.24	253.00	2.05	124.00	253.90	2.05	0.00	0.36
5	127.75	253.00	1.98	128.00	246.70	1.93	-0.05	-2.49
5	123.11	253.00	2.06	124.00	250.53	2.02	-0.04	-0.98
7	122.57	253.00	2.06	123.00	247.31	2.01	-0.05	-2.25
7	121.36	253.00	2.08	122.00	248.65	2.04	-0.04	-1.72
9	123.28	253.00	2.05	124.00	248.27	2.00	-0.05	-1.87
9	125.02	253.00	2.02	126.00	249.14	1.98	-0.04	-1.53
11	123.46	253.00	2.05	124.00	248.46	2.00	-0.05	-1.79
11	123.63	253.00	2.05	124.00	248.53	2.00	-0.05	-1.77

ตาราง 5.12 ตารางแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

$$\text{ความผิดพลาดเฉลี่ย} = 0.035 \text{ ml/s}$$

### 5.3 ผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล

นอกเหนือจากการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน แล้ว ในงานวิทยานิพนธ์นี้ยังได้พยายามทำการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหล กับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลนั้นมีคุณสมบัติที่ติดไฟได้ยากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน อีกทั้งยังไม่ระเหยเป็นไอได้ง่ายเหมือนกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน จึงเหมาะสำหรับการทดลองมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน แต่ผลการทดลองนั้นไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์กับอัตราการไหลได้ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นไม่ปรากฏสัญญาณที่มีความถี่ที่ชัดเจน และไม่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบที่คงที่ ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลนั้นมีค่าความหนืดสูงกว่า น้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินมาก ดังนั้นจึงทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย และไม่เกิดวอร์เท็กซ์ สัญญาณที่ได้จึงไม่ปรากฏสัญญาณที่มีความถี่ที่ชัดเจน และทำให้ไม่สามารถอ่านค่าความถี่ที่ได้จากวงจรนับได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลได้

## 5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 ถึง 5.2 ซึ่งเป็นผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงตามลำดับ ผลการทดลองสามารถรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ดังตาราง 5.13

ชนิดของไหล	น้ำ		น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน	
	วัดอุโมง 1.00 mm.	วัดอุโมง 1.50 mm.	วัดอุโมง 1.00 mm.	วัดอุโมง 1.50 mm.
ช่วงอัตราการไหล	2.24 -3.47 ml/s.	1.82 -2.35 ml/s.	2.00 -3.16 ml/s.	1.61 -2.24 ml/s.
ช่วงความถี่(ทดลอง)	38 Hz - 70 Hz	28 Hz - 40 Hz	34 Hz - 60 Hz	25 Hz - 38 Hz
ช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ (คิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ)	720-1,116	586-756	1391-2,197	1120-1,558
เรโซลูชัน (resolution) กรณีที่คิดเป็นเชิงเส้น	0.038 ml/s	0.044 ml/s	0.044 ml/s	0.048 ml/s
ความไม่เป็นเชิงเส้น (%ของช่วงการวัด) กรณีที่คิดเป็นเชิงเส้น	6.50%	4.0%	4.50%	6.50%
ความผิดพลาดเฉลี่ยที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว	0.018 ml/s	0.0075 ml/s	0.019 ml/s	0.011 ml/s
ความผิดพลาดเฉลี่ยที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว	0.058 ml/s	0.042 ml/s	0.048 ml/s	0.035 ml/s
ความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุดที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว	1.9 %	1.7 %	1.5 %	0.8 %
ความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุดที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว	2.2 %	3.0 %	2.3 %	2.5 %

ตาราง 5.13 ตารางสรุปข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

### การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล

ก่อนที่จะกล่าวถึงในรายละเอียดของการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน จะขอนำเอาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ และ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร ที่ได้จากการทดลองในตาราง ผก -1 ถึง ผก - 4 มาวิเคราะห์ดังนี้

เมื่อพิจารณาให้อัตราการไหล  $Q$  เป็นอินพุต และให้ความถี่ที่นับได้จากวงจรนับ  $f$  เป็น เอาท์พุท โดยให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปสมการดังสมการ 5.9

$$f = KQ \quad (5.9)$$

โดยที่  $K \equiv$  ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ( $K$  factor)

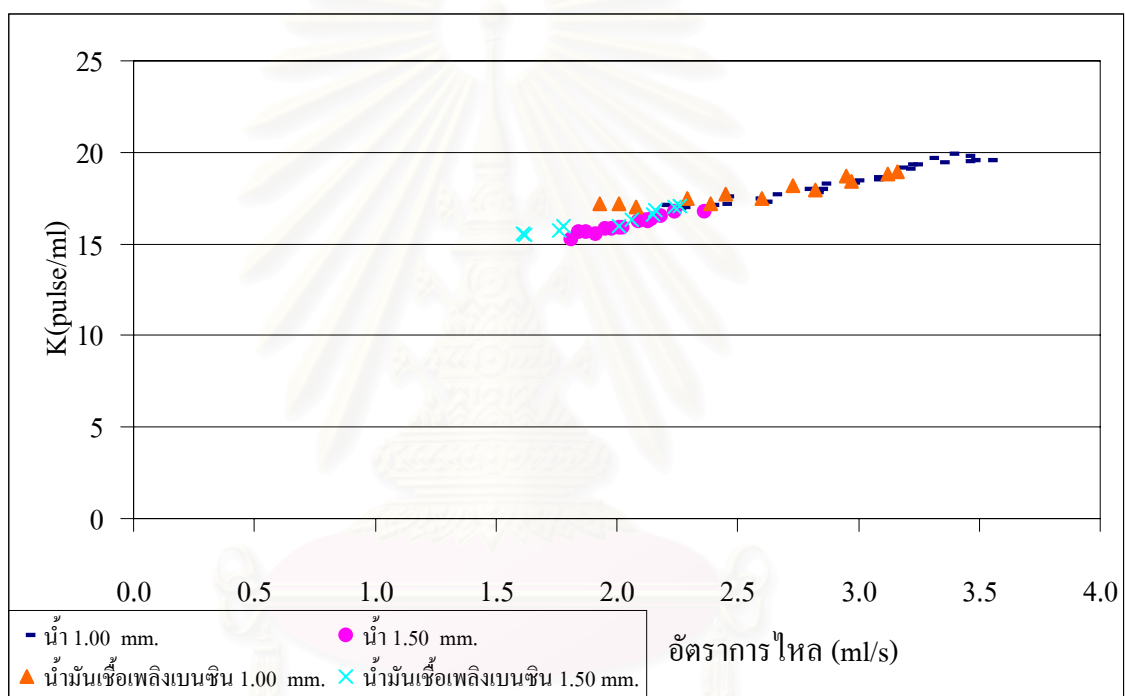
จากสมการ 5.9 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูป  $K = \frac{f}{Q}$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล จะทำให้ทราบค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นกับอัตราการไหลได้ ( $K$  factor) ซึ่งจากข้อมูลในตาราง ผก - 1 ถึง ผก - 4 สามารถหาค่าคงที่ดังกล่าว และนำเสนอในรูปกราฟได้ดังกราฟรูป 5.10

จากกราฟรูป 5.10 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ดังกล่าว ( $K$  factor) ของเครื่องวัดอัตราการไหล นั้นถึงแม้จะมีค่าเกือบคงที่ แต่ก็ยังเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้เครื่องวัดอัตราการไหลที่ได้มีความไม่เป็นเชิงเส้น



เมื่อพิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_D$  (คิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในตาราง 5.13) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 500 ถึง 2,200 แล้วจะพบว่าช่วงอัตราการไหลที่วัดได้อยู่ในช่วงที่เป็นลามินาร์ ซึ่งในการไหลที่อยู่ในช่วงลามินาร์นั้น ความเร็วของของไหลจะไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีรูปร่างความเร็ว (velocity profile) เป็นแบบพาราโบลาอยด์ ซึ่งจะมีความเร็วที่จุดกึ่งกลางท่อมากกว่าความเร็วเฉลี่ย 2 เท่าด้วย ดังนั้นเมื่อของไหลกระทบกับวัตถุมนที่ติดไว้ตรงกลางท่อแล้ว ความเร็วของของไหลที่กระทบกับวัตถุมน จึงมีค่ามากกว่าความเร็วเฉลี่ยประมาณ 2 เท่าด้วย ซึ่งสามารถเขียนเป็น



รูป 5.10 รูปกราฟแสดงค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ที่อัตราการไหลต่างๆ (K factor)

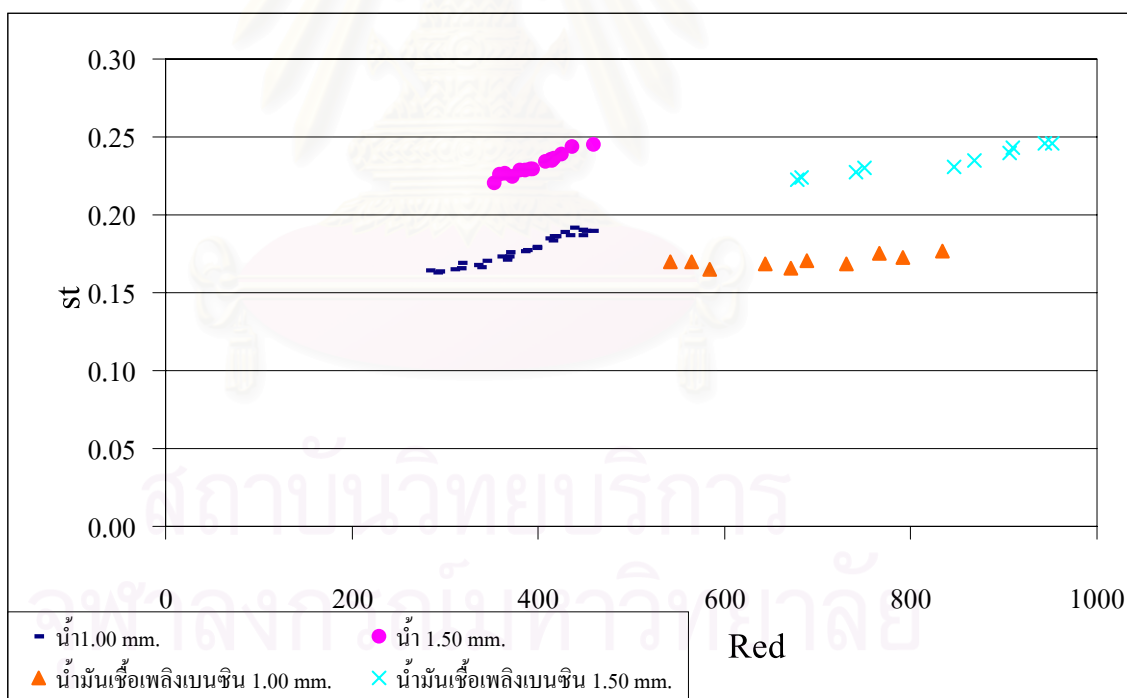
สมการได้ดังสมการ 5.10

$$V = 2\bar{V} = 2 \frac{Q}{A} \quad (5.10)$$

และจากสมการ 2.1  $St = \frac{fd}{V}$  โดยนิยามให้  $V \equiv$  ความเร็วของของไหลที่กระทบกับวัตถุมน  
รูปทรงกระบอกแล้ว จากสมการ 5.10 จะทำให้สามารถหาตัวเลขสโตรฮาลได้ดังสมการ 5.11

$$St = \frac{fd}{V} = \frac{fd}{2\bar{V}} = \frac{fdA}{2Q} \quad (5.11)$$

จากสมการ 5.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบค่าความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น  $f$  เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุมน  $d$  พื้นที่หน้าตัดของท่อ  $A$  และอัตราการไหล  $Q$  จะทำให้ทราบตัวเลขสโตรฮาล  $St$  เช่นกัน ดังนั้นหากนำเอาความสัมพันธ์ของตัวเลขสโตรฮาล กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการทดลองทั้ง 4 การทดลองสามารถแสดงดังกราฟรูป 5.11 โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์



รูป 5.11 รูปกราฟแสดงตัวเลขสโตรฮาลที่ได้จากการทดลอง ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ

ในกราฟรูป 5.11 คือตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  เมื่อคิดจากวัตถุนรูปร่างทรงกระบอก โดยให้ความเร็วของของไหลที่กระทบกับวัตถุนมีค่ามากกว่าความเร็วเฉลี่ยประมาณ 2 เท่า เนื่องจากการไหลในท่ออยู่ในช่วงการไหลที่เป็นลามินาร์ ข้อมูลจากกราฟรูป 5.11 จะใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการอภิปรายในรายละเอียดของการอภิปรายดังต่อไปนี้

## 5.5 อภิปรายผลการทดลอง

5.5.1 อภิปรายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุนรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

### เมื่อทดลองกับน้ำ

เมื่อพิจารณารูป 5.6 ซึ่งเป็นรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำโดยใช้วัตถุนรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ จะพบว่าความถี่ของวอร์เท็กซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการเกิดวอร์เท็กซ์ สำหรับช่วงการวัดจะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น และความถี่ที่ได้จากวงจรนับโดยที่อัตราการไหลต่ำสุดที่วัดได้จะอยู่ที่ประมาณ 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งที่อัตราการไหลต่ำกว่านี้จะทำให้สัญญาณที่ได้ไม่มีความชัดเจน และอาจทำให้ความถี่ที่นับได้จากวงจรนับผิดพลาดได้ ส่วนอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ในการวัดจะอยู่ที่ประมาณ 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งหากเพิ่มอัตราการไหลมากกว่านี้จะทำให้สัญญาณที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง และมีความถี่ของโหมดอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังรูป 5.5.1(ก)-(ข) และ 5.5.2(ก)-(ข) ทำให้ความถี่ที่ได้จากวงจรนับมีค่าไม่คงที่ ถึงแม้ว่าอัตราการไหลจะคงตัวก็ตาม ดังนั้นช่วงการวัดจึงใช้เฉพาะช่วงที่สัญญาณมีความต่อเนื่อง และความถี่ที่นับได้มีค่าคงที่เท่านั้น ซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตรงกับช่วงความถี่ที่ 38 เฮิรตซ์ ถึง 70 เฮิรตซ์ โดยมีเรโซลูชัน(เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ประมาณ 0.04 มิลลิลิตร ต่อ วินาที สำหรับสมการที่สอดคล้องกับกราฟรูป 5.6 หากใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามจะได้สมการกำลังสองดังสมการ 5.2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดใกล้เคียง 1 มากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟ

หมายเลข 1 ในกราฟรูป 5.11 ซึ่งเป็นตัวเลขสโตรฮาลที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าตัวเลขสโตรฮาลที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.17 ถึง 0.20

### เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

เมื่อทำการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุทรงรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์ ผลการทดลองเป็นดังกราฟรูป 5.8 โดยสามารถหาสมการที่สอดคล้องได้ดังสมการ 5.6 สำหรับช่วงการใช้งานจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2.00 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.16 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตรงกับความถี่ที่ 34 เฮิร์ตซ์ ถึง 60 เฮิร์ตซ์ คิดเป็นเรโซลูชัน (เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ประมาณ 0.04 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งหากเปรียบกับการทดลองกับน้ำแล้ว จะพบว่าช่วงอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินมีค่าต่ำกว่าเมื่อทดสอบกับน้ำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าความหนืดที่แตกต่างกันระหว่างน้ำ กับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินจะมีค่าความหนืดน้อยกว่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน อันอาจส่งผลทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งจะทำให้ความถี่ที่นับได้มีค่าไม่คงที่ที่อัตราการไหลน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นอัตราการไหลสูงสุดที่วัดได้เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินจึงมีค่าน้อยกว่าเมื่อทดลองกับน้ำ อีกทั้งในการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินนั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินนั้นจะระเหยได้ง่ายมากทำให้อัตราการไหลที่วัดได้อาจมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เมื่อพิจารณาเส้นกราฟหมายเลข 3 ในกราฟรูป 5.11 จะพบว่าตัวเลขสโตรฮาลที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 0.18

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.5.2 อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล เมื่อทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

#### เมื่อทดลองกับน้ำ

เมื่อเปลี่ยนขนาดวัตุนจากวัตุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็น 1.50 มิลลิเมตร ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ กับอัตราการไหล จะเป็นดังรูปกราฟ รูป 5.7 ซึ่งจากกราฟจะพบว่า ความถี่ของวอร์เท็กซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยที่สมการที่สอดคล้องกับกราฟรูป 5.7 จะเป็นดังสมการ 5.4 สำหรับช่วงในการวัดจะมีความแตกต่างจากช่วงที่ได้จากการใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร คือจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.82 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.35 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตรงกับความถี่ที่ 28 เฮิรตซ์ ถึง 40 เฮิรตซ์ โดยมีเรโซลูชัน (เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ประมาณ 0.05 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการใช้วัตุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เรโซลูชันของการวัดมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การใช้วัตุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็อาจทำให้พลัสความดันของวอร์เท็กซ์มีแรงมากขึ้น และเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในแอมพลิฟายด์ที่สูงมากพอที่จะวัดได้ในอัตราการไหลที่ต่ำกว่าการใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ดังนั้นอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 1.82 มิลลิลิตร ต่อ วินาที จึงต่ำกว่าอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถวัดได้เมื่อใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าประมาณ 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที สำหรับอัตราการไหลสูงสุดที่สามารถวัดได้เมื่อใช้วัตุนขนาด 1.50 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 2.35 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งต่ำกว่าเมื่อใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการใช้วัตุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอาจทำให้ของไหลไหลแบบปั่นป่วนที่อัตราการไหลต่ำกว่าเมื่อใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ดังนั้นอัตราการไหลที่มากที่สุดที่ใช้ในการวัดเมื่อใช้วัตุน 1.50 มิลลิเมตร จึงต่ำกว่าอัตราการไหลที่มากที่สุดที่ใช้ในการวัดเมื่อใช้วัตุน 1.00 มิลลิเมตร สำหรับตัวเลขสโตรฮาลจากการทดลองจากเส้นกราฟหมายเลข 2 ในกราฟรูป 5.11 พบว่ามีค่าอยู่ประมาณ 0.21 ถึง 0.24

### เมื่อทดลองกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

เมื่อทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยเปลี่ยนวัตตุมนให้เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร ผลการทดลองจะเป็นดังรูปกราฟรูป 5.9 โดยสามารถหาสมการที่สอดคล้องได้ดังสมการ 5.8 สำหรับช่วงการวัดจะอยู่ระหว่าง 1.61 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตรงกับความถี่ที่ 25 เฮิรตซ์ ถึง 38 เฮิรตซ์ คิดเป็นเรโซลูชัน (เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ประมาณ 0.05 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งแตกต่างจากเมื่อใช้วัตตุมน 1.00 มิลลิเมตร โดยที่ความแตกต่างจะคล้ายคลึงกับความแตกต่างเมื่อทดลองกับน้ำ กล่าวคือช่วงการวัดเมื่อใช้วัตตุมนขนาด 1.50 มิลลิเมตร มีช่วงการวัดที่ต่ำกว่าเมื่อใช้วัตตุมนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ทั้งนี้อาจเกิดจากการใช้วัตตุมนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ช่วงการวัดเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกันกับเมื่อทดลองกับน้ำ สำหรับตัวเลขสโตรฮาลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวเส้นกราฟหมายเลข 4 ในกราฟรูป 5.11 จะพบว่าตัวเลขสโตรฮาล มีค่าประมาณ 0.22 ถึง 0.25

เมื่อพิจารณาตัวเลขสโตรฮาลจากเส้นกราฟ หมายเลข 1 และ 2 กับเส้นกราฟหมายเลข 3 และ 4 ในกราฟรูป 5.11 แล้วจะพบว่าสำหรับการไหลในท่อแล้วที่ตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  เดียวกัน แต่ขนาดของวัตตุมนที่ใช้ต่างกัน ตัวเลขสโตรฮาลจะมีค่าต่างกัน แสดงให้เห็นได้ว่าการไหลในท่อแล้วตัวเลขสโตรฮาลนอกจากจะขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  แล้วอัตราส่วนระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก็ยังมีอิทธิพลกับตัวเลขสโตรฮาลด้วยเช่นกัน โดยที่ของไหลในเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมาก จะมีตัวเลขสโตรฮาลมากกว่าของไหลในเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้อยกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  เดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Grzegorz L.Pankanin [4] ที่ตัวเลขสโตรฮาลของของไหลในเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมาก จะมีค่ามากกว่าตัวเลขสโตรฮาลของของไหลในเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้อยกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  เดียวกันเช่นกัน ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นกราฟ หมายเลข 1, 2, 3, 4 ให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปไร้มิติ โดยให้ตัวเลขสโตรฮาลขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุมนรูปทรง

กระบอก กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  $\left(\frac{d}{D}\right)$  และตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  ซึ่งสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรแสดงได้ดังสมการ 5.12.1

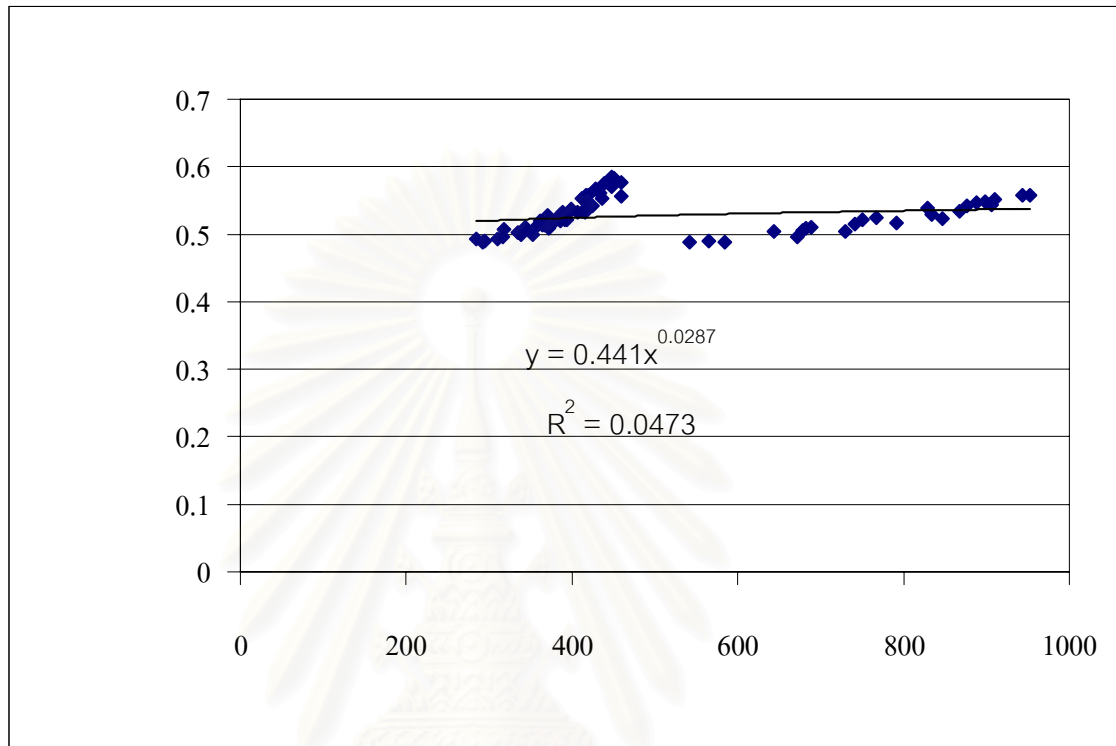
$$St = 0.441 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.69} Re_d^{0.029} \quad R^2 = 0.897 \quad (5.12.1)$$

สมการ 5.12.1 คือสมการหาตัวเลขสโตรฮาลของเส้นกราฟหมายเลข 1, 2, 3, 4 ในกราฟรูป 5.11 ซึ่งทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 300 ถึง 1,000 และหากจัดรูปสมการ 5.12.1 ให้อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless group) ดังแสดงในสมการ 5.12.2

$$\frac{St}{\left(\frac{d}{D}\right)^{0.69}} = 0.441 Re_d^{0.029} \quad (5.12.2)$$

และหากนำเอากลุ่มตัวแปรไร้มิติ  $\frac{St}{\left(\frac{d}{D}\right)^{0.69}}$  และ ตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_d$  มานำเสนอในรูปกราฟสามารถแสดงได้ดังกราฟรูป 5.12

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 5.12 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ กับตัวเลขเรย์โนลด์

จากกราฟรูป 5.12 จะเห็นได้ว่า กลุ่มตัวแปรไร้มิติ  $\frac{St}{\left(\frac{d}{D}\right)^{0.69}}$  กับตัวเลขเรย์โนลด์

$Re_d$  นั้นค่อนข้างจะไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันมากนัก ดังจะเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดที่มีค่าน้อยนั่นเอง ดังนั้นจากกราฟรูป 5.11 และกราฟรูป 5.12 แสดงให้เห็นว่า ตัวเลขสโตรฮาลสำหรับการไหลในท่อแล้ว อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุมน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จะมีอิทธิพลมากกว่าตัวเลขเรย์โนลด์



### 5.5.3 อภิปรายความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล

#### อภิปรายความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว

ผลการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.00 มิลลิเมตร เมื่อทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว ที่อัตราการไหลต่าง ๆ จำนวน 20 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงได้ดังตาราง 5.2 โดยในการทดสอบทั้ง 20 ครั้ง พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ย จะมีค่าประมาณ 0.018 มิลลิลิตร ต่อ วินาที โดยที่มีค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุดประมาณ 1.9 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรที่วัด และหากเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเมื่อใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร โดยทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัวเช่นกันดังตาราง 5.5 จะพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร นั้นมีค่าน้อยกว่าคือ มีค่าประมาณ 0.008 มิลลิลิตร ต่อ วินาที โดยที่มีค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 1.7 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรที่วัด ซึ่งถือว่ามี ความแม่นยำสูงมากพอสมควร แต่ช่วงการวัดเมื่อใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร นั้นค่อนข้าง แคบมากเมื่อเทียบกับเมื่อใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.00 มิลลิเมตร

สำหรับผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหล กับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.00 มิลลิเมตร และวัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัวดังตาราง 5.8 และตาราง 5.11 ผลการทดสอบพบว่ามีความคล้อยคลึงกับเมื่อทดสอบกับน้ำ คือเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่าเมื่อใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.00 มิลลิเมตร โดยตลอดการทดสอบทั้ง 10 ครั้ง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.50 มิลลิเมตร จะมีค่าประมาณ 0.011 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 0.8 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิขนาด 1.00 มิลลิเมตร นั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเฉลี่ยสูงถึงประมาณ 0.019 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และมีความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 1.5 เปอร์เซ็นต์

### อภิปรายความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว

สำหรับการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลในสภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว โดยใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงได้ดังตาราง 5.3 ซึ่งจากตารางจะพบว่าความผิดพลาดของเครื่องวัดอัตราการไหลจะมีค่าค่อนข้างมากโดยเฉพาะเมื่อจำนวนครั้งในการปรับระดับมากขึ้น โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 0.058 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และมีความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 2.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่า เมื่อทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลคงตัวอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ความผิดพลาดที่เกิดจากการทดสอบในสภาวะอัตราการไหลไม่คงตัวนี้ มักจะผิดพลาดโดยที่เครื่องวัดอัตราการไหลจะวัดอัตราการไหลได้น้อยกว่าความเป็นจริงเสมอ ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากในช่วงการไหลที่มีสภาวะไม่คงตัวนั้น รูปร่างความเร็ว (velocity profile) ของของไหลอาจไม่มีลักษณะเป็นพาราโบลาคล้ายกับการไหลที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว ถึงแม้ว่าตัวเลขเรย์โนลด์  $Re_D$  จะอยู่ในช่วงที่เป็นลามินาร์ก็ตาม ดังนั้นอัตราการไหลที่อยู่ในหน่วยความจำ ซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลที่ได้จากการเปรียบเทียบในสภาวะอัตราการไหลคงตัว จึงอาจเป็นค่าที่น้อยกว่าอัตราการไหลในสภาวะไม่คงตัวที่ความถี่เดียวกัน อันจะส่งผลทำให้อัตราการไหลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง และเมื่อทำการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้วัตุนขนาด 1.50 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัวเช่นกัน ผลการทดสอบจากตาราง 5.6 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 0.042 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และมีความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 3.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมักจะเกิดโดยที่เครื่องวัดอัตราการไหลวัดได้น้อยกว่าความเป็นจริงเช่นกัน

สำหรับผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินโดยใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัวดังตาราง 5.9 และตาราง 5.12 พบว่าการทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัวมีค่าความผิดพลาดมากกว่า เมื่อทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลคงตัวเช่นกัน โดยเมื่อใช้วัตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ความผิดพลาดเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 0.048 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และ มีค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 2.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้วัตุนขนาด 1.50 มิลลิเมตร ความผิดพลาดเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 0.035 มิลลิเมตร ต่อ วินาที และมีความผิดพลาดเชิงปริมาตรสูงสุด 2.5 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งผิดพลาดมากกว่าเมื่อทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว โดยที่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเครื่องวัดอัตราการไหลจะวัดอัตราการไหลได้น้อยกว่าความเป็นจริงอีกเช่นกัน

หนึ่งในการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดในงานวิทยานิพนธ์นี้ จำนวนครั้งในการทดสอบค่อนข้างน้อย โดยทำการทดสอบกับน้ำที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว 20 ครั้ง และทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว 10 ครั้ง ซึ่งค่อนข้างน้อย ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอที่จะวิเคราะห์ในเชิงสถิติได้มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้ไม่มีเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการเปรียบเทียบที่สามารถวัดอัตราการไหลได้อย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงต้องใช้กระบอกตวงในการวัดอัตราการไหลเฉลี่ยของเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งทำให้ต้องใช้เวลานาน ในขณะที่แผ่นสะท้อนแสงเองกลับไม่มีความทนทานในการใช้งาน โดยเมื่อใช้ไปนาน ๆ อาจทำให้แผ่นสะท้อนแสงเสียรูป หรือหลุดออกมาได้ จึงทำให้จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องไม่สามารถทดสอบได้มากนัก นอกจากนี้ในการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นเพียงการทดสอบความถูกต้องบนสมมติฐานที่ว่า ไม่เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากปัจจัยอื่น ๆ เลย ไม่ว่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือที่ใช้ในการเปรียบเทียบ หรือกระบวนการเปรียบเทียบ โดยความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วในกระบวนการเปรียบเทียบ หรือเครื่องมือที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็ย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเช่นกัน จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้

#### 5.5.4 อภิปรายสรุปอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัดอุณหภูมิทรงกระบอกที่มีต่อเครื่องวัดอัตราการไหล

จากตารางสรุปข้อมูลที่ได้จากการทดลองในตาราง 5.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนขนาดของวัดอุณหภูมิจากวัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร ไปเป็น 1.50 มิลลิเมตร นั้นจะทำให้ช่วงการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง โดยช่วงการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิ 1.50 มิลลิเมตร มีช่วงการวัดที่ต่ำกว่าและแคบกว่าช่วงการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิ 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้งการทดลองกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน สำหรับความถูกต้องพบว่าเครื่องวัดอัตรา

การไหลที่ใช้วัตตุนขนาด 1.50 มิลลิเมตร มีความถูกต้องมากกว่าเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัตตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตรเมื่อทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว โดยผลการทดสอบเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้งการทดสอบกับน้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล ( $K$  factor) ในกราฟรูป 5.10 จะพบว่าเมื่อใช้วัตตุนขนาด 1.50 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้วัตตุนขนาด 1.00 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลเดียวกัน นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก็ยังมีอิทธิพลกับตัวเลขสโตรฮาลด้วยเช่นกัน โดยเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมาก จะทำให้ตัวเลขสโตรฮาลของของไหลมีค่ามากกว่าตัวเลขสโตรฮาลของของไหลในเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตตุน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่น้อยกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน ดังแสดงในรูป 5.11

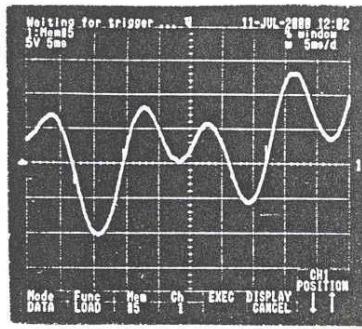
### 5.5.5 อภิปรายความถี่ที่ได้จากการทดลองกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสง

จากข้อมูลในตาราง 5.13 จะเห็นได้ว่าความถี่ที่ได้จากการทดลองจะอยู่ในช่วงประมาณ 25 เฮิร์ตซ์ ถึง 70 เฮิร์ตซ์ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 ที่มีความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 ประมาณ 14 เฮิร์ตซ์ และความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 2 ประมาณ 87 เฮิร์ตซ์ จะพบว่าความถี่ที่ได้จากการทดลองไม่ได้อยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 หรือ 2 เลย แต่เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงที่ได้จากการคำนวณนั้นเป็นความถี่ธรรมชาติที่สั่นสะเทือนอยู่ในอากาศทั่วไป ซึ่งหากแผ่นสะท้อนแสงดังกล่าวสั่นสะเทือนในน้ำ หรือ น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินแล้ว ผลของมวลเพิ่ม (added mass) อาจทำให้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นสะท้อนแสงมีค่าลดลงจากที่คำนวณไว้ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาความถี่ที่ได้จากการทดลองแล้ว จึงอาจเป็นไปได้ที่ความถี่ที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 2 ซึ่งลดลงจากที่ได้จากการคำนวณอันเป็นผลมาจากมวลเพิ่มนั่นเอง

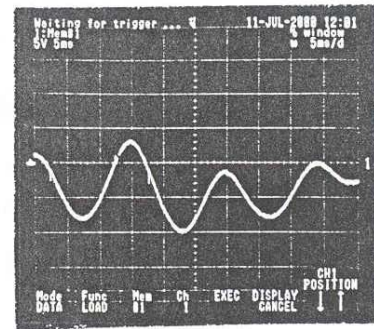
### 5.5.6 อภิปรายปัญหาและอุปสรรคในการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์ พบว่าปัญหาและอุปสรรคสำคัญในการทดลองก็คือ สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ ดังเช่น รูป 5.13 (ก)-(ข) ถึง รูป 5.14 (ก)-(ข) อันจะส่งผลทำให้ความถี่ที่นับได้จากวงจรนับผิดพลาดไปด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่ากรณีที่สัญญาณที่ได้ไม่เป็นระเบียบนั้นอาจเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การติดตั้งวาล์วที่ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง การเช่าร่องที่ไม่ได้ขนาดไม่เรียบ การติดแผ่นสะท้อนแสงที่ไม่ได้ตำแหน่ง ซึ่งล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลกับลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น และเนื่องจากการวิจัยที่ผ่านมาในอดีตยังไม่มีการวิจัยใดที่นำเอาวิธีการวัดอัตราการไหลแบบวอร์เท็กซ์มาใช้วัดกับของไหลที่อัตราการไหลน้อยเท่ากับอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงเลย รวมทั้งหลักการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง มาประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ความถี่ของวอร์เท็กซ์นั้นยังไม่มีการวิจัยใดในอดีตที่ใช้หลักการดังกล่าวในการวัดอัตราการไหลที่น้อย และขนาดท่อที่เล็กอีกเช่นกัน ดังนั้นในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลองจึงต้องอาศัยการลองผิดลองถูก

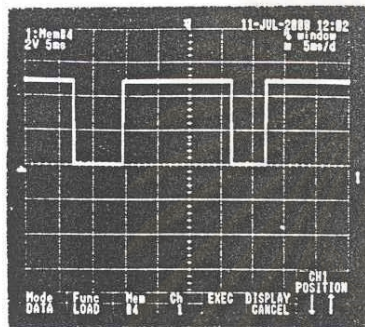
จากรูป 5.13 (ก) และ 5.14 (ก) จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณที่ได้มีลักษณะเหมือนมีสัญญาณความถี่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากลักษณะของสัญญาณที่ไม่มีความเป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ดังรูป 5.13 (ข) และ 5.14 (ข) แล้วสัญญาณดิจิทัลที่ได้จึงมีค่าไม่สม่ำเสมอ และทำให้วงจรนับไม่สามารถนับความถี่ที่คงที่ได้ ถึงแม้ว่าอัตราการไหลจะคงที่ก็ตาม หรือตัวอย่างสัญญาณ รูป 5.15 (ก) ซึ่งเป็นรูปสัญญาณที่ดูเหมือนเป็นระเบียบ แต่ยังคงความชัดเจนในบางช่วง โดยดูจากรูป 5.15 (ข) จะพบว่ามียอดสัญญาณประมาณ 4 ลูก แต่ยอดของสัญญาณลูกที่ 2 นั้นมีค่าไม่สูงมากพอที่จะถึงจุดทริกของสมิทซ์ทริกเกอร์ ดังนั้นสัญญาณดิจิทัลที่ได้ดังรูป 5.15 (ข) จึงมีสัญญาณพัลส์เพียง 3 ลูกเท่านั้น ทำให้ความถี่ที่ได้จากวงจรนับมีค่าผิดพลาด สำหรับสัญญาณที่มีความเป็นระเบียบจะเป็นดังรูป 5.16 (ก) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่เป็นฟังก์ชันคาบที่คงที่ และเมื่อสัญญาณดังกล่าวถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจะมีลักษณะดังรูป 5.16 (ข) ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าคงที่ ทำให้วงจรนับสามารถที่จะนับความถี่ได้อย่างถูกต้องเช่นกัน



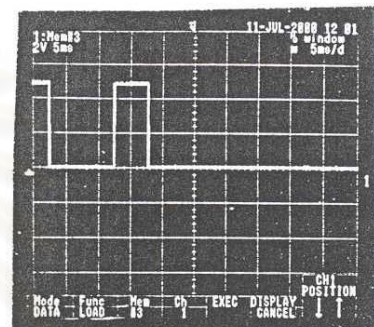
(ก)



(ก)



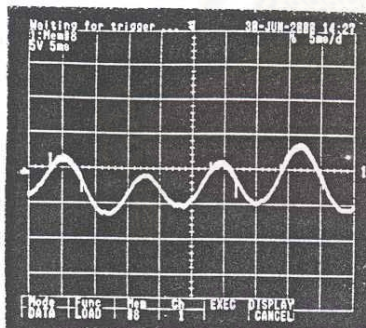
(ข)



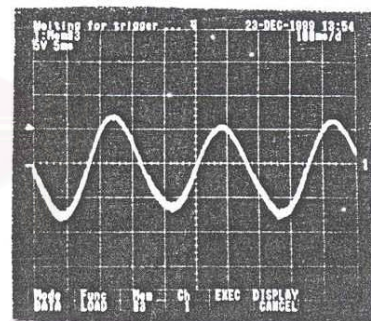
(ข)

รูป 5.13 (ก) รูปตัวอย่างที่ 1 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ  
(ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล

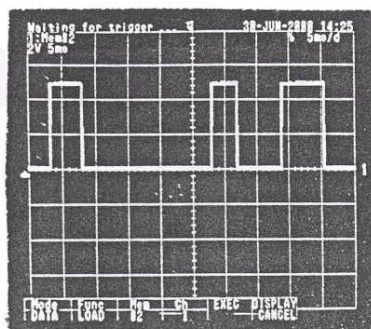
รูป 5.14 (ก) รูปตัวอย่างที่ 2 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ  
(ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล



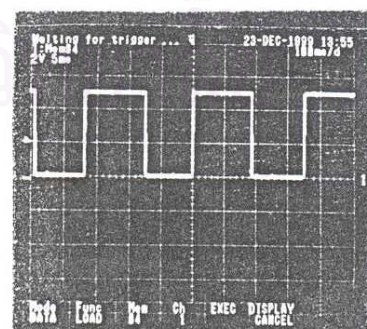
(ก)



(ก)



(ข)



(ข)

รูป 5.15 (ก) รูปตัวอย่างที่ 3 ของสัญญาณที่ไม่เป็นระเบียบ  
(ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล

รูป 5.16 (ก) รูปตัวอย่างของสัญญาณที่มีความเป็นระเบียบ  
(ข) รูปสัญญาณเมื่อถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล

จากตัวอย่างสัญญาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ลักษณะของสัญญานั้นจะส่งผลโดยตรงกับความถี่ที่ได้จากวงจรนับ ซึ่งหากได้สัญญาที่มีความเป็นระเบียบแล้ว จะทำให้สามารถนับความถี่ได้ถูกต้องด้วย และนอกจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของสัญญาแล้ว ตำแหน่งในการติดตั้งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง หรือ แม้กระทั่งชนิดของตัวไดโอดเปล่งแสงยังมีอิทธิพลกับลักษณะของสัญญาเช่นกัน โดยการติดตั้งนั้นจะต้องติดตั้งให้มุมตกกระทบของแสงจากตัวไดโอดเปล่งแสง สะท้อนไปตกที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์พอดี เพื่อให้ได้สัญญาที่มีความชัดเจน ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลในบทที่ 5 พบว่าเมื่อทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นกับน้ำ ผลการทดลองสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.47 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 38 เฮิรตซ์ ถึง 70 เฮิรตซ์ เมื่อใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดควอร์เท็กซ์ และสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 1.82 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.35 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 28 เฮิรตซ์ ถึง 40 เฮิรตซ์ เมื่อใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดควอร์เท็กซ์ โดยที่เรโซลูชัน (เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัตถุน 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 0.04 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และ 0.05 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตามลำดับ

เมื่อทดลองเครื่องวัดอัตราการไหลกับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน พบว่าสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 2.00 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 3.16 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งตรงกับความถี่ที่ 34 เฮิรตซ์ ถึง 60 เฮิรตซ์ เมื่อใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 1.61 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 2.24 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ตรงกับความถี่ที่ 25 เฮิรตซ์ ถึง 38 เฮิรตซ์ เมื่อใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร โดยที่เรโซลูชัน (เมื่อคิดเป็นเชิงเส้น) ของเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัตถุนรูปรทงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และ 1.50 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 0.04 มิลลิลิตร ต่อ วินาที และ 0.05 มิลลิลิตร ต่อ วินาที เช่นกัน จะเห็นได้ว่าช่วงการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นค่อนข้างแคบมาก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 0.8 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ถึง 4.0 มิลลิลิตร ต่อ วินาที ซึ่งถือว่าเป็นข้อเสียของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น



สำหรับความถูกต้องของเครื่องวัดอัตราการไหลนั้น จากการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นทั้งกับ น้ำ และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยทำการทดสอบแบบปริมาตรสะสม ที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว พบว่ามีความผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรที่วัด ซึ่งถือว่ามีความถูกต้องมากพอสมควร โดยเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอุณหภูมิทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร จะมีความถูกต้องมากกว่าเมื่อใช้วัดอุณหภูมิทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร และเมื่อทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว พบว่ามีความผิดพลาดค่อนข้างมาก โดยเครื่องวัดอัตราการไหลวัดปริมาตรได้น้อยกว่าความเป็นจริงเสมอ ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อเสียอีกข้อหนึ่งของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์นั้นย่อมมีค่าไม่คงตัว โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบ ดังนั้นการนำเอาเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นไปใช้ก็อาจทำให้การวัดมีความผิดพลาดได้มาก นอกจากนี้แผ่นสะท้อนแสงที่ใช้ในเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นก็ค่อนข้างจะบางมากและเสีรูปได้ง่ายซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความทนทานในการใช้งานเป็นอย่างมาก

จากงานวิจัยเครื่องวัดอัตราการไหลในงานวิทยานิพนธ์นี้ พอที่จะสรุปถึงข้อดี และข้อเสียของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นดังตาราง 6.1

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ค่าใช้จ่ายน้อย	1. ช่วงการใช้งานแคบ
2. มีความถูกต้อง (เมื่อใช้วัดที่สภาวะอัตราการไหลคงตัว)	2. มีความผิดพลาดมาก (เมื่อใช้วัดที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว)
3. มีเอาท์พุทเป็นสัญญาณดิจิตอล ทำให้ง่ายต่อการประมวลผล	3. การใช้งานไม่มีความทนทานมากนัก
	4. การใช้งานต้องไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากภายนอก

ตาราง 6.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น

จากข้อดีข้อเสียในตาราง 6.1 จะเห็นได้ว่าหากจะนำเอาเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้กับการวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ยังอาจต้องปรับปรุงในหลาย ๆ ส่วน โดยเฉพาะช่วงการวัดซึ่งยังแคบอยู่ และความถูกต้องในการใช้งานที่สภาวะอัตราการไหลไม่คงตัว นอกจากนี้เครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นยังจะต้องใช้งานในสภาวะที่ไม่มีแรงสั่นสะเทือนภายนอกมารบกวน ซึ่งในการใช้งานจริงแรงสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์อาจเป็นอุปสรรคสำคัญในการใช้งานเป็นอย่างมาก

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย และการพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหล

สำหรับข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหลนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

### 1. พัฒนาการออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหล

เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบพอสมควร ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องอยู่บนพื้นฐานของความเป็นไปได้ในการทำงานกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องวัดอัตราการไหล ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยท่อ 2 ชั้น โดยที่ผนังของท่อชั้นในจะติดแผ่นสะท้อนแสงไว้บนผนังท่อ และทำการเจาะรูเพื่อให้พัลส์ความดันของวอร์เท็กซ์ผ่านไปกระทบกับแผ่นสะท้อนแสง ทำให้แผ่นสะท้อนแสงสั่นสะเทือนในความถี่เดียวกันกับความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งตำแหน่งหรือ ขนาดของการเจาะรูนั้นจะใช้การลองผิดลองถูกเป็นส่วนมาก และจากการวิจัยก็พบว่า การเจาะรู และการติดแผ่นสะท้อนแสงเองก็มีอิทธิพลกับลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลกับการนับพัลส์อีกเช่นกัน ดังนั้นหากมีเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูงสามารถทำงานกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ หรือมีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูงแล้ว จะทำให้ได้เครื่องวัดอัตราการไหลที่มีรูปแบบที่แน่นอน และประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

นอกเหนือจากการใช้เครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูงจะเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหลแล้ว การเปลี่ยนวัตถุดิบให้มีรูปร่างที่เหมาะสม ดังเช่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมแทนวัตถุดิบที่เป็นแท่งทองเหลืองทรงกระบอก และการเปลี่ยนวิธีการรับรู้ออร์เทกซ์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งของการรับรู้ออร์เทกซ์ที่ตัวกำเนิดออร์เทกซ์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้ในอุตสาหกรรม ก็จะทำให้การรับรู้ความถี่ของออร์เทกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

## 2. พัฒนาการประมวลผลสัญญาณ

วิธีการในการประมวลผลสัญญาณในงานวิทยานิพนธ์นี้ค่อนข้างเป็นการประมวลผลแบบไม่สลับซับซ้อนมากนัก ดังนั้นในรูปสัญญาณที่มีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ วิธีการประมวลผลก็จะไม่สามารถนับความถี่ได้ถูกต้อง แต่หากใช้วิธีการเปลี่ยนสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัล เข้าสู่เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจึงใช้การประมวลผลแบบดิจิทัลเข้ามาช่วยในการประมวลผลและนับพัลส์ เช่นการใช้วิธีการตรวจวัดการเปลี่ยนเครื่องหมายของความชันของสัญญาณ เป็นต้น ก็จะช่วยทำให้การนับพัลส์สามารถนับได้ในช่วงกว้างขึ้น และทำให้เครื่องวัดอัตราการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. P.W. Baier , K.F. Bonnet . PTC – Resistor Probe for the Measurement of the Instantaneous Fuel Consumption in Motor Vehicles . Flow measurement of fluids (1978) : 455-459 .
2. B.W. van Oudheusden . Silicon flow sensors . IEE Proceedings 5 (September 1988) : 373-380.
3. Osamu Tabata . Fast-Response Silicon Flow Sensor with an On-Chip Fluid Temperature Sensing Element . IEEE Transactions on Electronic Devices 3 (March 1986) : 361-365.
4. Grzegorz L.Pankanin . Influence of Vortex Meter Configuration on Measure Signal Parameters . IEEE Transaction on instrumentation (1993) : 337-340.
5. Frank M. White. Fluid Mechanics. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore : McGraw-Hill , 1986.
6. ชงชัย สถาพรนานนท์ . การศึกษาเปรียบเทียบผลของคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ เอส ไอ . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2540.
7. เกียรติศักดิ์ ไชโยษฐ์ . การศึกษาสมรรถนะและแบบจำลองคณิตศาสตร์เทอร์โบชาร์จเจอร์ของรถบรรทุกขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541.

## บรรณานุกรม

1. Ernest O.Doebelin . Measurement Systems . 4<sup>th</sup>ed. Singapore: McGraw-Hill , 1990.
2. Jay L. Devore . Probability and Statistics for Engineering and the Sciences . 3<sup>rd</sup> ed. U.S.A. : Duxbury , 1991.
3. Robert W.Fox., Alan T. Mc Donald . Introduction to Fluid Mechanics . 3<sup>rd</sup> ed. Singapore : John Wiley & Sons , 1985.
4. Thomas L.Floyd . Electronic Devices . 4<sup>th</sup> ed. U.S.A. : Prentice Hall ,1996.
5. William T. Thomson . Theory of Vibration with Applications . 4<sup>th</sup> ed. U.S.A. : Prentice Hall , 1993.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความถี่เฉลี่ย $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q(ml/s)$
37.49	2.19
38.10	2.25
38.59	2.27
40.92	2.39
42.01	2.44
43.05	2.45
45.04	2.58
45.19	2.61
46.93	2.65
50.12	2.78
50.24	2.82
50.59	2.82
51.13	2.84
52.11	2.85
54.58	2.97
55.21	2.99
56.98	3.07
57.18	3.07

ตาราง ผก-1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล  
เมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00  
มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

ความถี่เฉลี่ย $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q(ml/s)$
60.83	3.17
61.14	3.20
62.06	3.21
62.51	3.23
64.92	3.30
65.01	3.34
67.43	3.38
68.26	3.45
69.97	3.45
70.15	3.47
70.83	3.54

ตาราง ผก-1 (ต่อ) ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลองกับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ความถี่เฉลี่ย $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q(ml/s)$
27.63	1.81
28.84	1.84
29.33	1.87
29.70	1.91
30.93	1.95
31.41	1.98
32.00	2.01
32.15	2.02
33.95	2.09
34.58	2.12
34.67	2.13
35.01	2.14
36.09	2.18
37.86	2.24
40.12	2.36

ตาราง ผก-2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหลเมื่อทดลอง กับน้ำ โดยใช้วัตถุมนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถี่เฉลี่ย $f$ ( Hz )	อัตราการไหล $Q$ ( ml/s )
32.73	1.93
34.18	2.01
35.25	2.08
40.07	2.29
41.10	2.39
43.35	2.45
45.50	2.60
49.67	2.73
50.61	2.82
54.62	2.97
55.22	2.95
58.74	3.12
59.93	3.16
60.86	3.20

ตาราง ผก-3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับ อัตราการไหล  
เมื่อทดลอง กับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้น  
ผ่านศูนย์กลาง 1.00 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถี่เฉลี่ย $f(Hz)$	อัตราการไหล $Q(ml/s)$
24.85	1.61
25.15	1.62
27.71	1.76
28.38	1.78
32.12	2.01
33.57	2.06
35.69	2.15
36.37	2.16
38.13	2.24
38.58	2.26

ตาราง ผก-4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้น กับอัตราการไหล เมื่อทดลอง กับน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน โดยใช้วัตถุหมุนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 มิลลิเมตร เป็นตัวกำเนิดวอร์เท็กซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

```
ORG          0000H   ;START
LJMP        MAIN
ORG          0013H
LJMP        COUNT
ORG          0030H
DATA_1     EQU      30H
DATA_2     EQU      31H
DATA_3     EQU      32H
DATA_4     EQU      33H
CS_LCD     EQU      P1.3
RS_LCD     EQU      P1.2
MAIN:      MOV      SP,#256-32      ; MAIN PROGRAM ;
           MOV      TCON,#00000100B
           MOV      TMOD,#00100101B
           MOV      IE,#10000100B
           MOV      SCON,#40H
           MOV      PCON,#00H
           MOV      TH1,#0FBH
           MOV      DATA_1,#00H
           MOV      DATA_2,#00H
           MOV      DATA_3,#00H
           MOV      DATA_4,#00H
           MOV      37H,#00H
           MOV      38H,#00H
           MOV      39H,#00H
           MOV      3AH,#00H
           MOV      3BH,#00H
           MOV      3CH,#00H
           CLR      EA
           SETB     CS_LCD
           ECALL    DELAY
```

```

        LCALL    INIT_LCD
        MOV     R0,#16
        MOV     DPTR,#TABLE1 ;WRITE TABLE1 TO LCD
STR1:   MOV     A,#00H
        MOVC   A,@A+DPTR
        LCALL  WR_LCD
        INC    DPTR
        DJNZ   R0,STR1
        MOV    22H,#00H
        MOV    23H,#00H
        LCALL  RUN ;END OF MAIN PROGRAM

```

```

;-----SUBROUTINE-----
RUN:
        LCALL  DISPLA_CO
        LCALL  DISPLA_Q
        LCALL  DISPLA_AC
ED:     JB     11H,RU_1 ;GET VALUE FROM KEYBORD
        CLR    10H
        AJMP  RU_2
RU_1:   SETB   10H
RU_2:   JB     P1.0,RU_3
        CLR    11H
        AJMP  RU_4
RU_3:   SETB   11H
RU_4:   MOV    A,22H
        CJNE  A,#01H,RU_5
        CPL    18H
RU_5:   JB     P1.1,RU_6
        SETB   1BH
RU_6:   AJMP  ED
        RET

```

```

DISPLA_CO:                                ;DISPLAY VORTEX FREQUENCY
      CLR      19H
      MOV      A,#40H
      LCALL   GOTO_LCD
      MOV      A,DATA_2
      ANL     A,#0FH
      CJNE    A,#00H,DISCO_1
      SETB    19H
      MOV      A,#20H
      LCALL   WR_LCD
      AJMP    DISCO_2

DISCO_1:  LCALL   SHOW_1
DISCO_2:  MOV      A,#41H
      LCALL   GOTO_LCD
      MOV      A,DATA_1
      SWAP    A
      ANL     A,#0FH
      CJNE    A,#00H,DISCO_4
      JB      19H,DISCO_3
      AJMP    DISCO_4

DISCO_3:  MOV      A,#20H
      LCALL   WR_LCD
      AJMP    DISCO_5

DISCO_4:  LCALL   SHOW_1
DISCO_5:  MOV      A,#42H
      LCALL   GOTO_LCD
      MOV      A,DATA_1
      LCALL   SHOW
      RET                                ;END OF DISPLA_CO

DISPLA_Q:                                ;DISPLAY FLOW RATE
      MOV      A,#45H
      LCALL   GOTO_LCD
      MOV      A,39H
      LCALL   SHOW

```

```

MOV     A,#46H
DISAC_4: LCALL    GOTO_LCD
DISAC_5: MOV     A,#2EH
        LCALL    WR_LCD
        MOV     A,#47H
        LCALL    GOTO_LCD
        MOV     A,38H
        SWAP    A
        LCALL    SHOW
        MOV     A,#48H
        LCALL    GOTO_LCD
        MOV     A,38H
        LCALL    SHOW
        RET     ;END OF DISPLA_Q

DISPLA_AC: ;DISPLAY OF ACCUMULATE VOLUME
        CLR     1AH
        MOV     A,#4AH
        LCALL    GOTO_LCD
        MOV     A,3CH
        ANL     A,#0FH
        CJNE    A,#00H,DISAC_1
        SETB    1AH
        MOV     A,#20H
        LCALL    WR_LCD
        AJMP    DISAC_2
DISAC_1: LCALL    SHOW_1
DISAC_2: MOV     A,#4BH
        LCALL    GOTO_LCD
        MOV     A,3BH
        SWAP    A
        ANL     A,#0FH
        CJNE    A,#00H,DISAC_4
        JB     1AH,DISAC_3
        AJMP    DISAC_4
DISAC_3: MOV     A,#20H
        LCALL    WR_LCD

```

```

        LCALL    DISPLA_CO
        MOV     A,DATA_3
        MOV     B,71D
        DIV     AB
        CJNE    A,#0,CO_1
        MOV     A,DATA_3
        MOV     B,38D
        DIV     AB
        CJNE    A,#1,CO_1
        LCALL    LOOKUP
        LCALL    DISPLA_Q
        JNB     18H,CO_2
        LCALL    ACCUM
        AJMP    CO_2
CO_1:   LCALL    DISPLA_OL
CO_2:   JNB     1BH,CO_3
        LCALL    ACLEAR
        CLR     1BH
CO_3:   LCALL    DISPLA_AC
        LCALL    SER
EXIT:   RETI                                ;END OF INTERRUPT

;-----CONVERT HEX TO BCD SUBROUTION -----
CONV:
        MOV     R0,#1
        MOV     34H,DATA_3
        MOV     35H,DATA_4
CONV_1: MOV     A,34H
        CJNE    A,#00H,CONV_2
        MOV     A,35H
        CJNE    A,#00H,CONV_2
        LJMP    EXIT2
CONV_2: INC     R0
        MOV     A,35H
        MOV     B,#10
        DIV     AB
        MOV     35H,A
        MOV     A,34H

```



```

        LCALL    DISPLA_CO
        MOV     A,DATA_3
        MOV     B,71D
        DIV     AB
        CJNE   A,#0,CO_1
        MOV     A,DATA_3
        MOV     B,38D
        DIV     AB
        CJNE   A,#1,CO_1
        LCALL   LOOKUP
        LCALL   DISPLA_Q
        JNB    18H,CO_2
        LCALL   ACCUM
        AJMP   CO_2
CO_1:   LCALL   DISPLA_OL
CO_2:   JNB    1BH,CO_3
        LCALL   ACLEAR
        CLR    1BH
CO_3:   LCALL   DISPLA_AC
        LCALL   SER
EXIT:   RETI    ;END OF INTERRUPT

```

;------CONVERT HEX TO BCD SUBROUTION -----;

```

CONV:
        MOV     R0,#1
        MOV     34H,DATA_3
        MOV     35H,DATA_4
CONV_1: MOV     A,34H
        CJNE   A,#00H,CONV_2
        MOV     A,35H
        CJNE   A,#00H,CONV_2
        LJMP   EXIT2
CONV_2: INC     R0
        MOV     A,35H
        MOV     B,#10
        DIV     AB
        MOV     35H,A
        MOV     A,34H

```

```

ANL     A,#0F0H
ORL     A,B
SWAP    A
MOV     B,#10
DIV     AB
SWAP    A
MOV     36H,A
MOV     A,B
SWAP    A
MOV     B,A
MOV     A,34H
ANL     A,#0FH
ORL     A,B
MOV     B,#10
DIV     AB
ORL     A,36H
MOV     34H,A
MOV     36H,B
MOV     A,R0
MOV     B,#2
DIV     AB
DEC     A
ADD     A,#DATA_1
MOV     R1,A
MOV     A,B
CJNE   A,#0,IN_2
AJMP    IN_3
IN_2:  MOV     A,@R1
        SWAP    A
        ORL     A,36H
        SWAP    A
        AJMP    IN_4
IN_3:  ORL     A,36H
IN_4:  MOV     @R1,A
        LJMP    CONV_1
EXIT2:  RET

```



```

WR_INS:                                ;WRITE INSTRUCTION SUBROUTINE
    MOV     B,A
    ANL     A,#0F0H
    SETB    ACC.3    ;CS HI
    MOV     R2,A
    MOV     A,P1
    ANL     A,#00000011B ;SET BIT
    ORL     A,R2
    MOV     P1,A ;HIGH BYTE
    LCALL   EN_LCD
    MOV     A,B ;LOW BYTE
    SWAP    A
    ANL     A,#0F0H
    SETB    ACC.3
    MOV     R2,A
    MOV     A,P1
    ANL     A,#00000011B
    ORL     A,R2
    MOV     P1,A
    LCALL   EN_LCD
    RET     ;END OF INSTRUCTION SUBROUTINE

EN_LCD:
    CLR     CS_LCD
    LCALL   BUSY
    SETB    CS_LCD
    RET

BUSY:
    PUSH    07H
    PUSH    06H
    MOV     R6,#05H
BUSY1:   MOV     R7,#0FFH
    DJNZ   R7,$
    DJNZ   R6,BUSY1
    POP     06H
    POP     07H
    RET

```

```

DELAY:   PUSH      07H
         PUSH      06H
DEL1:    MOV       R6,#0FFH
DEL2:    MOV       R7,#0FFH
         DJNZ     R7,$
         DJNZ     R6,DEL2
         POP      06H
         POP      07H
         RET

```

```

WR_LCD:
         MOV      B,A
         ANL     A,#0F0H
         ORL     A,#00001100B ;RS/CS HI
         MOV     R2,A
         MOV     A,P1
         ANL     A,#00000011B
         ORL     A,R2
         MOV     P1,A
         LCALL  EN_LCD
         MOV     A,B
         SWAP   A
         ANL     A,#0F0H
         ORL     A,#00001100B
         MOV     R2,A
         MOV     A,P1
         ANL     A,#00000011B
         ORL     A,R2
         MOV     P1,A
         LCALL  EN_LCD
         RET

```

```

GOTO_LCD:
         SETB   ACC.7
         LCALL  WR_INS
         RET

```

```

LOOKUP:
    MOV     A,B           ;LOOKUP TABLE SUBROUTINE
    MOV     B,#4
    MUL     AB
    SUBB    A,#4
    MOV     37H,A
    MOV     DPTR,#TABLE2
    MOVC   A,@A+DPTR
    ANL    A,0FH
    MOV     39H,A
    MOV     A,37H
    INC     A
    INC     A
    MOV     37H,A
    MOVC   A,@A+DPTR
    ANL    A,#0FH
    SWAP   A
    MOV     38H,A
    MOV     A,37H
    INC     A
    MOV     37H,A
    MOVC   A,@A+DPTR
    ANL    A,#0FH
    ORL    38H,A
    RET     ;END OF LOOKUP TABLE SUBROUTINE

ACCUM:
    CLR     C
    MOV     A,3AH
    ADD     A,38H
    DA      A
    MOV     3AH,A
    MOV     A,3BH
    ADDC    A,39H
    DA      A
    MOV     3BH,A

```

```

MOV      A,3CH
ADDC    A,#00H
DA      A
MOV     3CH,A
RET

DISPLA_OL:
MOV     A,#45H
LCALL  GOTO_LCD
MOV     A,#20H
LCALL  WR_LCD
MOV     A,#46H
LCALL  GOTO_LCD
MOV     A,#4FH
LCALL  WR_LCD
MOV     A,#47H
LCALL  GOTO_LCD
MOV     A,#4CH
LCALL  WR_LCD
MOV     A,#48H
LCALL  GOTO_LCD
MOV     A,#2EH
LCALL  WR_LCD
RET

ACLEAR:
MOV     3AH,#00H
MOV     3BH,#00H
MOV     3CH,#00H
RET

TABLE1: DB      'Hz ml/s ml'      ;DATA TABLE
TABLE2: DB      '2.24'           ;DATA OF FLOWRATE AT ANY PULSE
        DB      '2.29'
        DB      '2.34'
        DB      '2.39'
        DB      '2.43'
        DB      '2.48'
        DB      '2.52'

```

DB	'2.57'
DB	'2.61'
DB	'2.66'
DB	'2.70'
DB	'2.74'
DB	'2.78'
DB	'2.83'
DB	'2.87'
DB	'2.91'
DB	'2.94'
DB	'2.98'
DB	'3.02'
DB	'3.06'
DB	'3.09'
DB	'3.13'
DB	'3.16'
DB	'3.20'
DB	'3.23'
DB	'3.26'
DB	'3.30'
DB	'3.33'
DB	'3.36'
DB	'3.39'
DB	'3.42'
DB	'3.44'
DB	'3.47'
DB	'3.50'
END	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลของตัวไดโอดเปล่งแสง (LED) เบอร์ SLR 932

#### Absolute Maximum Ratings

Power Dissipation	150 <i>mW</i>
Forward Current, $I_f$	100 <i>mA</i>
Pulse Forward Current, $I_{fp}$	1.0 <i>A</i>
Reverse Voltage, $V_R$	5.0 <i>V</i>

#### Electro optical Characteristics

Parameters	Symbol	Typ
Forward Voltage	$V_f$	1.25 <i>V</i>
Pulse Forward	$V_{fp}$	2.5 <i>V</i>
Capacitance	<i>C</i>	40 <i>PF</i>

ข้อมูลของตัวโฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ SLP-0509 CO

Absolute Maximum Ratings

$V_{CEO}$  30 V

$P_c$  100 mW

Light Current

Min 1.0 mA

Typ 20 mA

$V_{ce}$  1 V

EV 1000 Lux

Dark Current

Max 0.1  $\mu A$

$V_{ce}$  10 V

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้วิจัย

นาย สิริพงษ์ เอี่ยมชัยมงคล เป็นคนจังหวัดกรุงเทพฯ ๗ เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2515 สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2537 เข้าศึกษาต่อยัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย