

เครื่องวัดปริมาณการจราจรบนท้องถนนโดยใช้อุปกรณ์แบบไฟโรอิเล็กทรอนิกส์



นายภูมินทร์ เพิ่มศิริ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

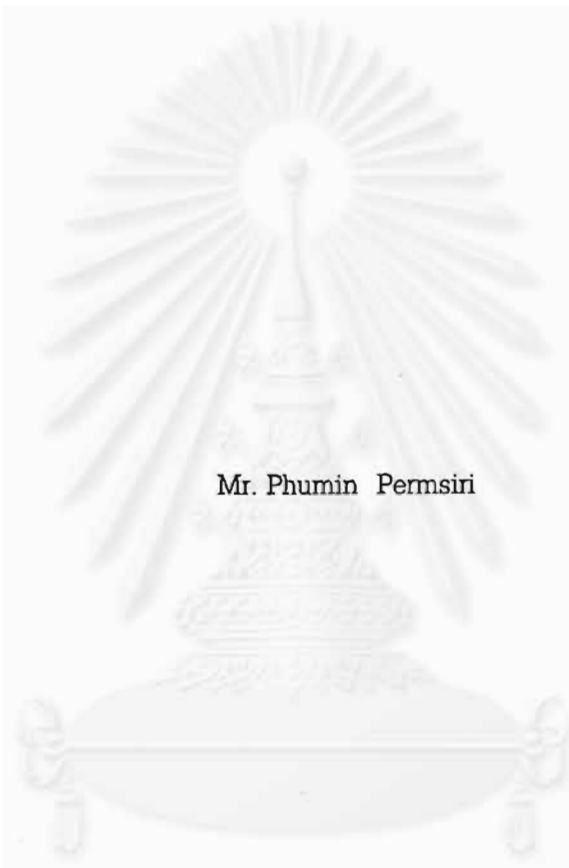
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-970-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROAD TRAFFIC DETECTOR USING A PYROELECTRIC DEVICE



Mr. Phumin Permsiri

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School


Chulalongkorn University

Academic Year 1999

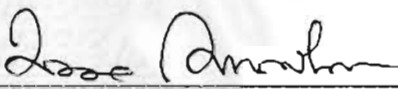
ISBN 974-332-970-6

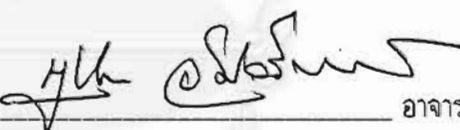
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องวัดปริมาณการจราจรบนท้องถนนโดยใช้อุปกรณ์แบบไฟโรอิเล็กทรอนิกส์
โดย นาย ภูมินทร์ เพิ่มศิริ
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์

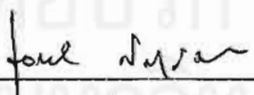
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

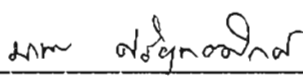

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)


กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)


กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)

ภูมินทร์ เพิ่มศิริ : เครื่องวัดปริมาณการจราจรบนท้องถนนโดยใช้อุปกรณ์แบบไพโรอิเล็กทริก
(Road Traffic Detector Using A Pyroelectric Device)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. กฤษดา วิศวธีรานนท์ , 71 หน้า. ISBN 974-332-970-6.

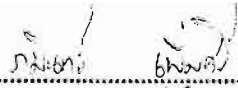
วิทยานิพนธ์นี้เสนอการประยุกต์ใช้ตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก ในการตรวจจับรถ เพื่อวัดปริมาณรถยนต์บนท้องถนน ตัวตรวจจับรถชนิดนี้ไม่ต้องสัมผัสกับตัวรถ จึงติดตั้งง่ายและมีความคงทนในการใช้งาน ตัวตรวจจับใช้หลักการตรวจวัดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของรถและผิวถนน สัญญาณจากตัวตรวจวัดจะถูกขยายและจัดรูปคลื่นให้พอเหมาะกับการนับจำนวน จากการทดสอบนับจำนวนรถบนถนนที่คลองตัว พบว่าสามารถวัดปริมาณการจราจรถูกต้องถึง 98 % สามารถวัดได้ทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน และสามารถตรวจจับรถที่วิ่งด้วยความเร็วสูงสุดมากกว่า 100 km/hr ได้

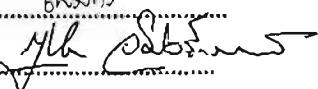
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

PHUMIN PERMSIRI : ROAD TRAFFIC DETECTOR USING A PYROELECTRIC
DEVICE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. KRISADA VISAVATEERANON.
71 pp. ISBN 974-332-970-6.

This thesis presents application of a pyroelectric sensor as a vehicle detector to measure the traffic flow on roads. The pyroelectric sensor is a non-contact type of vehicle detector which is easy to install and maintain. Detection of the vehicle is achieved by temperature difference between the vehicle and the road surface. The signal from the sensor is amplified and wave-shaped, then fed to the counting circuit. The prototype of the vehicle detector is tested on a real road. It gives an accuracy of 98% for traffic flow measurement, can detect vehicles during daytime and nighttime, and can detect vehicles that move faster than 100 km/hr.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.กฤษดา วิศวธีรานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ พร้อมทั้งช่วยในการติดต่อกับหน่วยงานต่างๆ เพื่อหาข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยออกแบบวงจร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการขอยืมเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และผู้ที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ทุกๆ ด้าน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
แนวเหตุผล	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ประเภทของตัวตรวจที่ใช้ในการจราจร.....	3
2.1 ประเภทใช้วัดด้วยลูป (Inductive Loop Detector)	3
2.2 ประเภทใช้ความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetic Detector)	4
2.3 ประเภทที่ใช้ท่อลม (Pneumatic tube detector)	5
2.4 ประเภทใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezo detector).....	6
2.5 ประเภทใช้ตัววัดแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Detector)	7
2.6 ประเภทใช้แสงอินฟราเรด (Infrared Detector)	8
2.7 ประเภทใช้ไมโครเวฟ (Microwave (Radar) Detector)	9
2.8 ประเภทใช้แสงเลเซอร์ (Laser Detector)	10
2.9 ประเภทใช้การประมวลผลภาพ (Video Image Detector)	10
2.10 ประเภทใช้บัตรอิเล็กทรอนิกส์ (Tag Card).....	11
2.11 ประเภทใช้ตัววัดแบบพาสซีฟอะคูสติก (Passive Acoustic Detector)	11
2.12 สรุป	13
3 ตัวตรวจวัดชนิดไฟโรอิเล็กทริก	16
3.1 ทฤษฎีแสงอินฟราเรด	16
3.2 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริก	18

3.3	หลักการทํางานของสิ่งประดิษฐ์ไฟโรอีเล็กทริก	21
3.4	วัสดุที่ใช้ทำตัวตรวจวัดแบบไฟโรอีเล็กทริก	22
3.5	ชนิดของตัวตรวจวัดแบบไฟโรอีเล็กทริก	22
3.6	เลนส์เฟรเนล	26
4	ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณการจราจร	27
4.1	ส่วนวงจรตัวตรวจวัด	28
4.2	ส่วนประกอบของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร	38
5	ส่วนประกอบทางด้านซอฟต์แวร์	42
5.1	ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในเครื่องตรวจจับ	42
5.2	ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในเครื่องบันทึกข้อมูล	43
5.3	ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการแสดงข้อมูลและพิมพ์รายงานบนเครื่อง PC	49
6	ผลการทดสอบ	53
6.1	การทดสอบการทํางาน	53
6.2	การทดสอบการทํางานของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร	54
6.3	การทดสอบการทํางานของตัวตรวจวัด	54
6.4	การทดสอบการทํางานของตัวตรวจวัดบนถนนจริง	55
6.5	สรุปผลการทดสอบ	62
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	63
7.1	สรุป	63
7.2	ข้อเสนอแนะ	64
	รายการอ้างอิง	66
	ภาคผนวก	68
	ประวัติผู้เขียน	71

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวตรวจวัดแบบรูป	4
รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กจากขดลวดที่ฝังอยู่ที่พื้นผิวการจราจร	4
รูปที่ 2.3 ตัวตรวจวัดแบบใช้ความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแบบเพียโซ แบบที่ติดตั้งชั่วคราว	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแบบเพียโซ แบบที่ติดตั้งถาวรบนถนน	7
รูปที่ 2.6 ตัวตรวจวัดแบบอัลตราโซนิก	8
รูปที่ 2.7 ตัวตรวจวัดแบบอินฟราเรด	9
รูปที่ 2.8 โครงร่างของยานพาหนะขนาดเล็กที่ได้จากตัวตรวจวัดแบบเลเซอร์	10
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหน้าจอของโปรแกรมประมวลผลภาพ	11
รูปที่ 2.10 ตัวตรวจวัดแบบพาสซีฟอะคูสติก	12
รูปที่ 3.0 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด	16
รูปที่ 3.1 การเกิดโพลาริเซชันเมื่อวางสารไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.2 ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	19
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียส	19
รูปที่ 3.4 การเกิดปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก	21
รูปที่ 3.5 ตัวตรวจวัดไฟโรอิเล็กทริกชนิดผลึกเดี่ยว	23
รูปที่ 3.6 ตัวตรวจวัดไฟโรอิเล็กทริกชนิดผลึกคู่	23
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของตัวตรวจวัด	24
รูปที่ 3.8 รูปร่างจริงของตัวตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็กทริก	24
รูปที่ 3.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซชนิดต่างๆ	25
รูปที่ 3.10 รูปร่างจริงของเลนส์เฟรเนล	26
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณการจราจร	28
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบวงจรตัวตรวจจับ	29
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความถี่ด้านต่ำของวงจรรองกับค่าความผิดพลาดในการนับรถ	30
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆเมื่อรถวิ่งเข้ามาและวิ่งออกไปจากตัวตรวจจับและสัญญาณที่ได้	31
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความถี่ด้านสูงของวงจรรองกับค่าแนวโน้มความผิดพลาดในการนับรถ	32
รูปที่ 4.6 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์	33
รูปที่ 4.7 โครงสร้างวงจรค่าสัมบูรณ์	34
รูปที่ 4.8 สัญญาณเมื่อผ่านวงจรขยายและวงจรค่าสัมบูรณ์	36

	หน้า
รูปที่ 4.9 วงจรสมิตต์ทริกเกอร์	36
รูปที่ 4.10 สัญญาณแสดงการหน่วงเวลาของไมโครคอนโทรลเลอร์	37
รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร.....	38
รูปที่ 4.12 บล็อกไดอะแกรมส่วนของอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์	39
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของลำดับสัญญาณในการติดต่อกับอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์.....	40
รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมส่วนวงจรสร้างฐานเวลาและสำรองข้อมูล	41
รูปที่ 5.1 ไดอะล็อก สำหรับสร้างแผนภูมิ.....	50
รูปที่ 5.2 ไดอะล็อก สำหรับการสร้างและพิมพ์รายงาน	50
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างของรายงานที่สร้างจากโปรแกรมส่วนแสดงผล.....	51
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างแผนภูมิที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมส่วนแสดงผล.....	52
รูปที่ 6.1 รูปร่างภายนอกของเครื่องวัดปริมาณการจราจร.....	53
รูปที่ 6.2 ส่วนประกอบภายในของเครื่องตรวจวัดการจราจร.....	53
รูปที่ 6.3 สัญญาณก่อนและหลังจากผ่านวงจรค่าสัมบูรณ์	54
รูปที่ 6.4 สัญญาณจากการเฉลี่ยค่าแรงดันและสัญญาณจากวงจรค่าสัมบูรณ์	55
รูปที่ 6.5 สัญญาณก่อนและหลังจากผ่านวงจรสมิตต์ทริกเกอร์	55
รูปที่ 6.6 การติดตั้งตัวตรวจวัด	56
รูปที่ 6.7 การติดตั้งตัวตรวจวัด	57
รูปที่ 6.8 ค่าผิดพลาดจากการวัดในสภาพการจราจรคล่องตัว ครั้งที่ 1	57
รูปที่ 6.9 ค่าผิดพลาดจากการวัดในสภาพการจราจรคล่องตัว ครั้งที่ 2	58
รูปที่ 6.10 ผลความผิดพลาดโดยแยกเป็นประเภทต่างๆ ครั้งที่ 3	59
รูปที่ 7.1 แนวทางแก้ปัญหาในการตรวจจับสนิมล์.....	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปข้อดีข้อเสียของตัวตรวจวัดแต่ละประเภท	13
ตารางที่ 3.1 ค่าอุณหภูมิคูรีของสารไพโรอิเล็กทริกชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติฟิสิกส์ของวัสดุไพโรอิเล็กทริก	22
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวไพโรอิเล็กทริกเซ็นเซอร์	29
ตารางที่ 6.1 สรุปสาเหตุความผิดพลาดในสภาวะการจรวจรคล่องตัว	59
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบในสภาวะที่รบกวนซ้ำแต่คล่องตัว	60
ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองในสภาพการจรวจรที่ติดขัด	61
ตารางที่ 6.4 สรุปผลการทดสอบ	62



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผล

ในปัจจุบันยานพาหนะบนถนนได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก โดยเฉพาะตามเมืองที่มีความเจริญสูง เป็นเหตุให้ปริมาณการจราจรบนท้องถนนมีความหนาแน่น

เพื่อที่จะลดปัญหาการจราจร ทางหนึ่งก็คือหลีกเลี่ยงการใช้เส้นทางที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่น เราจำเป็นต้องทราบว่าถนนเส้นใดมีปริมาณยานพาหนะมากน้อยเพียงใด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงไปใช้เส้นทางที่มีการจราจรคล่องตัวกว่า ดังนั้นเครื่องวัดปริมาณการจราจรจึงได้ถูกนำมาติดตั้งไว้ตามถนนสายต่างๆ เพื่อที่จะใช้วัดปริมาณการจราจรว่ามีความหนาแน่นมากน้อยเพียงไร จึงได้มีการคิดค้นเครื่องตรวจวัดปริมาณการจราจรขึ้นมา

สำหรับเครื่องวัดปริมาณการจราจรที่นิยมใช้กันในประเทศไทย คือเครื่องวัดปริมาณการจราจรแบบลูป (Inductive loop) เป็นเครื่องวัดที่มีกันมานานแล้ว แต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง อีกทั้งยังต้องปิดการจราจรในบริเวณดังกล่าวเพื่อติดตั้งเครื่องวัด อีกแบบหนึ่งก็เป็นแบบท่อลม ใช้ติดตั้งบนถนนชั่วคราว การนับทำโดยการให้รถวิ่งมาทับบนท่ออย่าง แต่ข้อเสียคือต้องเปลี่ยนท่ออย่างบ่อย

ดังนั้น จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนา เครื่องตรวจวัดปริมาณการจราจร ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย คือสามารถตรวจจذبรถได้โดยที่ไม่ต้องมีส่วนใดของตัวตรวจวัดสัมผัสกับตัวรถ และสามารถทำการติดตั้งได้ง่ายโดยที่ไม่ต้องปิดการจราจรในบริเวณดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องวัดปริมาณการจราจรโดยใช้ตัวตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็กทรอนิกส์

1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องวัดปริมาณการจราจรที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
- 1.3.2 ศึกษาและทำความเข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็กทรอนิกส์
- 1.3.3 กำหนดขอบเขตของระบบที่ต้องการจะสร้าง
- 1.3.4 ออกแบบฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวข้องกับส่วนของตัวเซนเซอร์
- 1.3.5 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์
- 1.3.6 ออกแบบฮาร์ดแวร์ของระบบทั้งหมด
- 1.3.7 ออกแบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

- 1.3.8 ทดสอบระบบทั้งหมด
- 1.3.9 ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง
- 1.3.10 ประเมินผลและสรุป
- 1.3.11 เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาและพัฒนาไฟโรอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องวัดปริมาณการจราจร
- 1.4.2 สร้างเครื่องวัดปริมาณการจราจรที่สามารถวัดได้พร้อมกัน 4 ช่องจราจร
- 1.4.3 ศึกษาตัวแปรเกี่ยวกับการจราจรที่มีผลต่อการตรวจวัดปริมาณการจราจรเช่น ขนาดของรถ, ความเร็วรถ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เครื่องต้นแบบ เครื่องนับจำนวนยานพาหนะ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้งานได้จริง
- 1.5.2 สามารถพัฒนาเครื่องนับจำนวนยานพาหนะที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในประเทศได้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ประเภทของตัวตรวจวัดที่ใช้ในการจราจร

ตัวตรวจวัดที่ใช้ในงานจราจรได้มีการพัฒนากันมานานแล้ว และมีการพัฒนาต่อกันมาจนมีรูปแบบมากมาย และสามารถนำมาใช้งานร่วมกันเพื่อให้ได้ข้อมูลทางด้านจราจรที่ต้องการ อุปกรณ์ตรวจวัดที่สร้างขึ้นมากในยุคแรกๆอาศัยการกดทับในการตรวจนับโดยติดตั้งไว้ในถนนเพื่อให้ยานพาหนะวิ่งผ่าน ในปี ค.ศ.1930 ได้มีการใช้งานตัวตรวจวัดแบบท่อลม(Pneumatic Tube) และแบบที่ใช้ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก(Magnetic Detector) ต่อมาในปีค.ศ. 1960 ตัวตรวจวัดแบบลูป (Inductive Loop),อินฟราเรด (Infrared),อัลตราโซนิก (Ultrasonic) และ ไมโครเวฟ ได้ถูกนำมาใช้ ระบบที่ใช้ตัวตรวจวัดแบบลูป (Inductive Loop) กลายเป็นระบบที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่ ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา

ตัวตรวจวัดจะรับรู้การมีอยู่ของยานพาหนะที่หยุดหรือเคลื่อนที่โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก และให้ข้อมูลต่างๆสำหรับการวิเคราะห์สภาพการจราจร เช่น ปริมาณ(Volume) , ความเร็ว (Speed) , การครอบครอง(Occupancy) , ความหนาแน่น(Density) , ความยาวขบวน(Queue Length) ตัวตรวจวัดสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการติดตั้ง ดังนี้

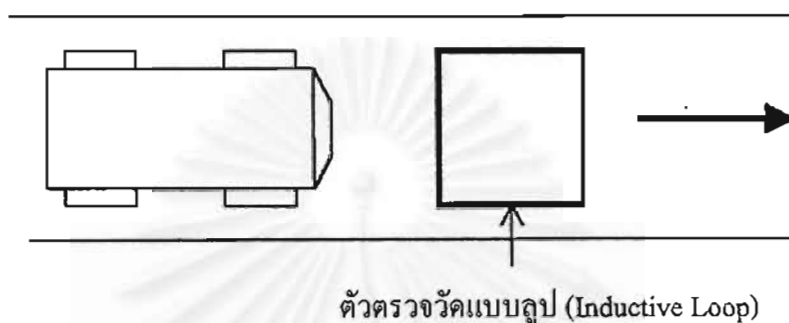
1. ติดตั้งโดยยุ่งเกี่ยวกับส่วนใดส่วนหนึ่งของถนน(Intrusive Detector) ได้แก่ตัวตรวจวัดแบบลูป(Inductive Loop) ,แบบท่อลม(Pneumatic Tube),แบบเพียโซอิเล็กทริก(Piezoelectric) และแบบตรวจวัดโดยใช้ความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetic Detector)
2. ติดตั้งโดยไม่ยุ่งเกี่ยวกับส่วนใดส่วนหนึ่งของถนน(Non-Intrusive Detector) ได้แก่แบบใช้กล้องวิดีโอ (Video Camera) ,แบบไมโครเวฟ (Microwave Radar) ,แบบใช้แสงเลเซอร์(Laser) ,แบบใช้แสงอินฟราเรด (Infrared) และแบบใช้คลื่นเสียง(Ultrasonic Detector)

ในปัจจุบันความคับคั่งของการจราจร ในถนนสายต่างๆเพิ่มขึ้นอย่างมาก เครื่องตรวจวัดชนิดที่ติดตั้งโดยไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับถนนจึงได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในการติดตั้งและซ่อมบำรุงทำได้โดยสะดวก ไม่ต้องรบกวนการจราจรในบริเวณนั้น รายละเอียดทั่วไปของตัวตรวจวัดแบบต่างๆ มีดังนี้

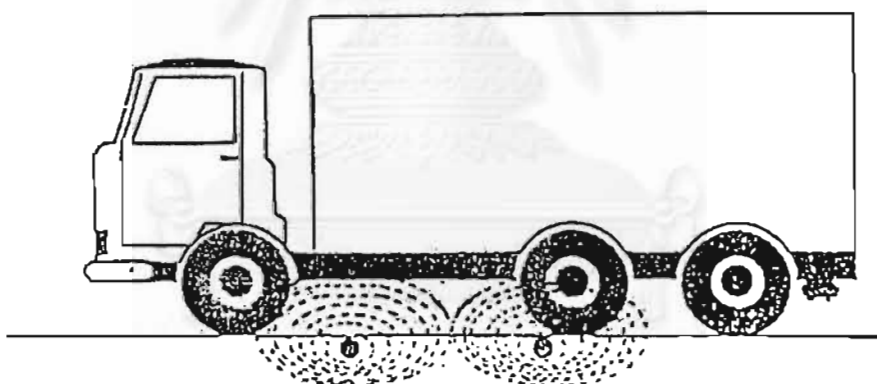
2.1 ประเภทใช้วัดด้วยลูป (Inductive Loop Detector)

ตัวตรวจวัดประเภทนี้มีหลายลักษณะ ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด โดยเฉพาะใน USA ถือว่าเป็นระบบมาตรฐาน โครงสร้างประกอบด้วยสายที่พันเป็นขดหลายๆรอบ โดยทั่วไปจะขดเป็นรูปสี่เหลี่ยม(Inductive Loop) มีหน้าตัดขนาดประมาณ 6X6 ฟุต ผึงไว้ใต้ผิวถนนและมีวงจรออสซิลเลเตอร์ บ้อนสัญญาณความถี่ค่าหนึ่งให้แก่

ขดลวด เมื่อมียานพาหนะวิ่งผ่านจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของตัวขดลวดเปลี่ยนไป ค่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนจะทำให้ค่าของความถี่เปลี่ยนไป จึงทำให้สามารถตรวจวัดการผ่านเข้าออกของยานพาหนะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวตรวจวัดแบบลูป (Inductive Loop)



รูปที่ 2.2 ความเหนี่ยวนำจากขดลวดที่ฝังอยู่ที่พื้นผิวการจราจร

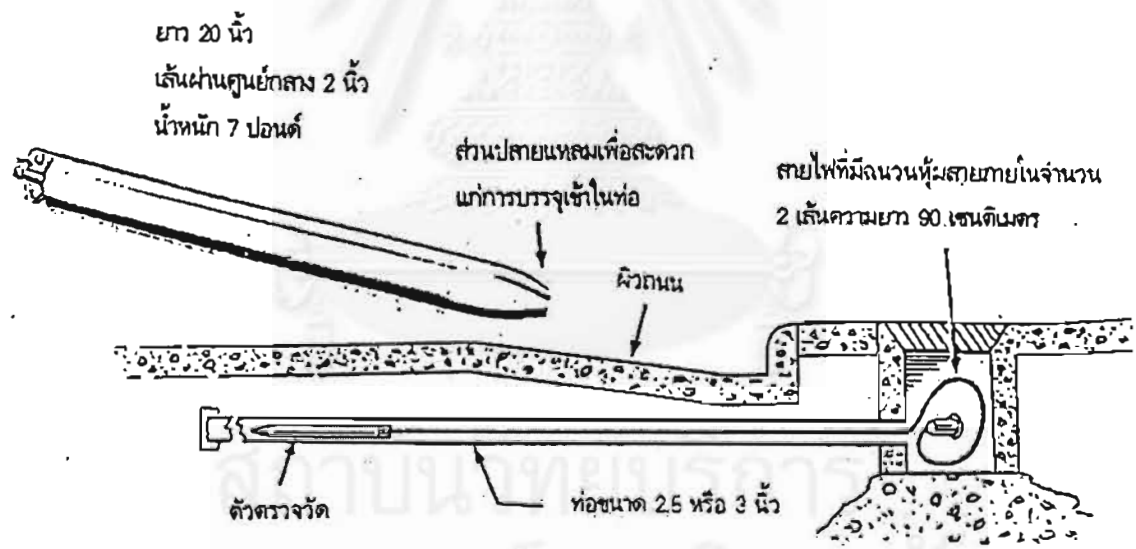
2.2 ประเภทใช้ความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetic Detector)

ตัวตรวจวัดแบบนี้จะมีรูปร่างเป็นแท่งกลมยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.25 นิ้ว ความยาวประมาณ 21 นิ้ว มีสายสัญญาณออกมาจากตัวตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตัวตรวจวัดชนิดนี้จะถูกฝังไว้ใต้พื้นผิวถนน หลักการของตัวตรวจวัดในลักษณะนี้จะใช้หลักการของการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กโลก คือเมื่อมียานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในบริเวณที่ตรวจวัด ก็จะทำให้รูปแบบของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กโลกในบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวของยานพาหนะได้ ตัวตรวจวัดลักษณะนี้มี 2 แบบย่อย คือ

1. แบบแอกทีฟ รู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่าแมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) มีหลักการคล้ายกับแบบลูป (Inductive Loop) มากเพียงแต่จะให้ลวดพันเป็นขดรอบแกนแม่เหล็ก ลักษณะเป็นแท่งกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นิ้วและมีความยาวไม่เกิน 4.25 นิ้ว ซึ่งจะทำให้การผลิตสนามแม่เหล็กและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมียานพาหนะปรากฏอยู่ในพื้นที่ตรวจวัด ตรวจวัดได้ทั้งยานที่เคลื่อนที่และหยุดนิ่ง เหมาะกับพื้นผิวการจราจร ในส่วนที่ไม่สามารถขุดเจาะลึกๆ ได้ เช่น บริเวณสะพาน เป็นต้น

2. แบบพาสซีฟ จะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของโลกที่เกิดจากยานที่เคลื่อนผ่านไป ใช้ตรวจจับได้เพียงยานที่เคลื่อนที่เท่านั้น มีพื้นที่การตรวจจับที่กว้าง ดังนั้นอาจนำไปใช้ตรวจจับการจราจรแบบหลายช่องทาง(Multiple Lanes)ได้

ปัจจุบันมีการใช้งานตัวตรวจวัดประเภทนี้อย่างแพร่หลายกับงานต่างๆหลายประเภท ทั้งในงานการควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบอัตโนมัติ และในระบบที่มีการเก็บค่าผ่านทาง เช่น ในระบบทางด่วนที่บริษัททางยกระดับดอนเมือง จำกัด (มหาชน) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ตัวตรวจวัดแบบใช้ความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

2.3 ประเภทที่ใช้ท่อลม (Pneumatic tube detector)

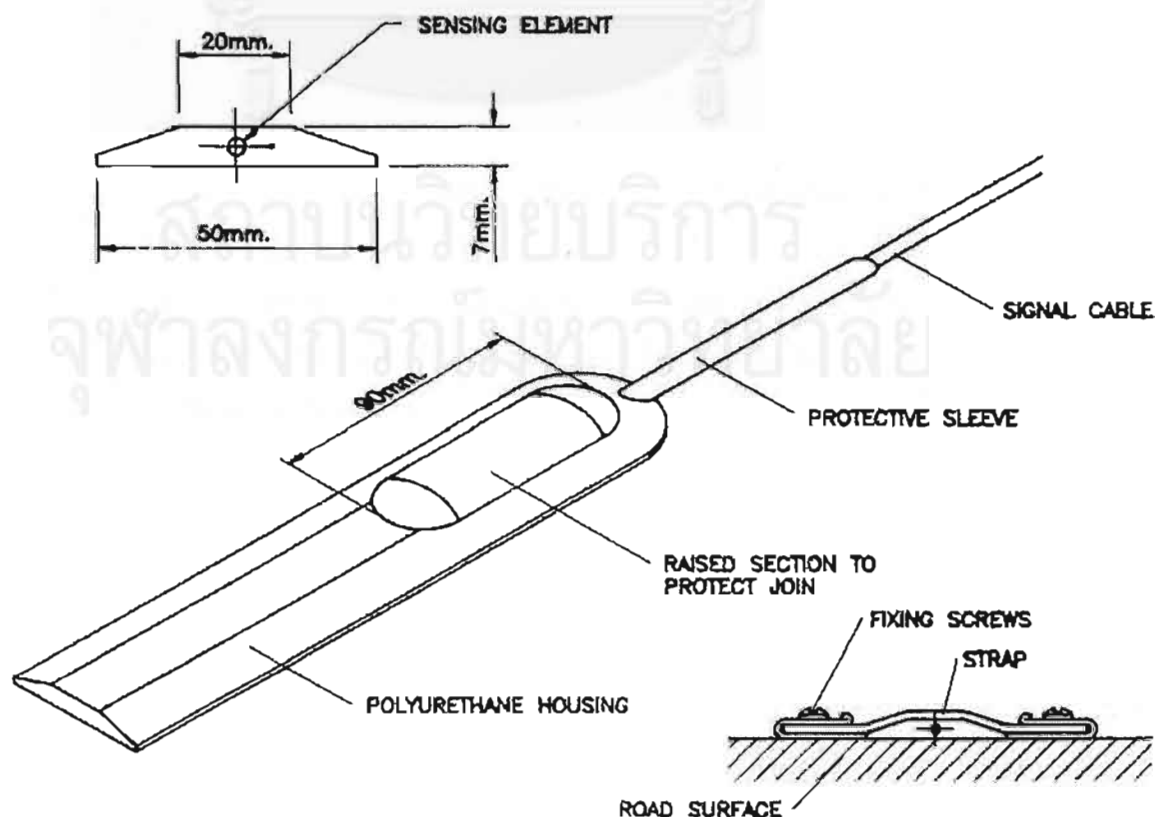
เป็นอุปกรณ์ตรวจจับในยุคแรกๆและมีหลักการที่ง่ายที่สุด มีลักษณะเป็นท่ออย่างกลวง ทำงานโดยใช้หลักการของแรงดันอากาศ เมื่อมีน้ำหนักมากทับก็จะให้แรงดันอากาศออกมาหนึ่งครั้ง โดยจะนำมาวางวางทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ เมื่อมียานพาหนะวิ่งผ่านก็จะมีกรกดทับลงบนตัวตรวจวัด ซึ่งเปรียบเสมือน

กับการกดสวิตช์ ทำให้สามารถนับจำนวนเพลารถได้ ในปัจจุบันยังคงใช้ในงานตรวจนับจำนวนยานพาหนะแบบติดตั้งชั่วคราว ซึ่งได้รับการปรับปรุงให้มีความแม่นยำและทนทานขึ้น แต่ก็ยังคงใช้หลักการเดิม คือ อาศัยการตรวจนับแรงอัดอากาศที่เกิดขึ้นจากการที่ล้อรถวิ่งมาทับท่ออย่าง ซึ่งค่าวัดที่ได้รับคือจำนวนเพลลา อย่างเดียวเท่านั้น

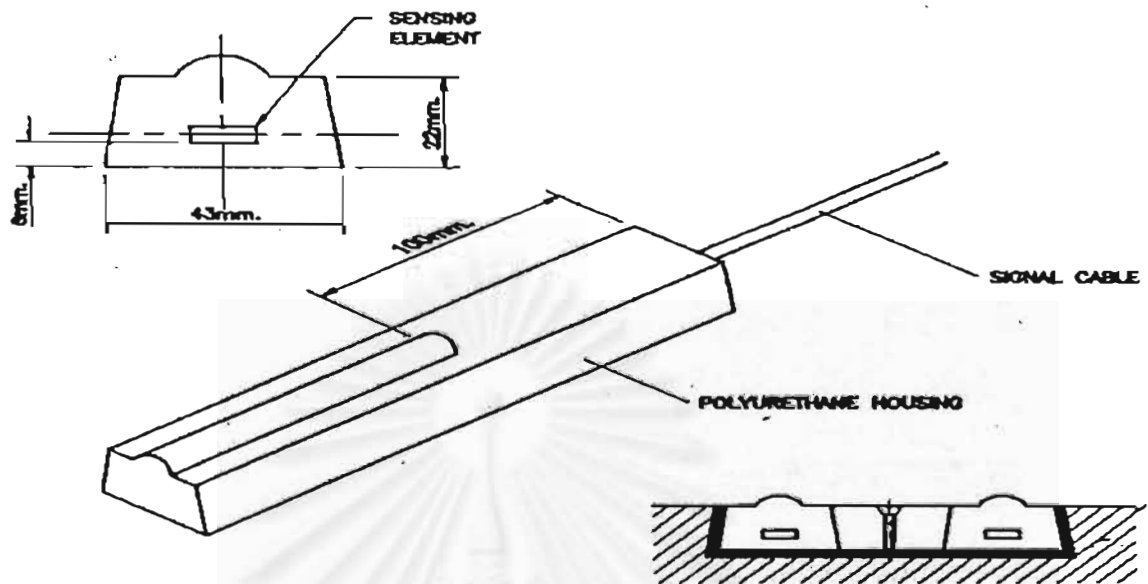
2.4 ประเภทใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezo detector)

ตัวตรวจวัดประเภทนี้ได้รับการพัฒนาต่อจากแบบท่อลม (Pneumatic Tube) มีลักษณะเป็นแท่งหรือเส้น ทำด้วยวัสดุหยุ่นมีหลายแบบ สามารถใช้ได้ทั้งชั่วคราวและถาวร ถ้าใช้ชั่วคราวจะวางขวางบนพื้นถนน เช่นเดียวกับแบบท่อลม(Pneumatic Tube) ถ้าใช้แบบถาวรก็จะฝังตัวตรวจวัดไว้ที่พื้นผิวการจราจร โดยให้พื้นผิวด้านบนยื่นพื้นผิวการจราจรเล็กน้อย และจะวางขวางทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ เป็นอุปกรณ์ตรวจนับเพลลา มี 2 แบบคือ แบบแรกเป็นสายเคเบิลที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เมื่อมียานพาหนะวิ่งทับจะเกิดแรงกดกระทำต่อสายเคเบิลที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก(Piezoelectric) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น อีกแบบหนึ่งใช้หลักที่ว่าความต้านทานของเนื้อสารจะเปลี่ยนไปเมื่อมีน้ำหนักมากกดทับ (Resistive Piezoelectric) โดยทั่วไปแล้วจะให้ค่าความต้านทานลดลงจนใกล้ศูนย์เมื่อมีน้ำหนักมากกดทับ ตัวตรวจวัดที่ใช้หลักการนี้ มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะมีราคาค่อนข้างถูกกว่าตัวตรวจวัดแบบอื่นๆ ในประเภทเดียวกัน

ในระยะต่อมาได้มีการพัฒนาตัวตรวจวัดประเภทนี้โดยมีการใช้สารพวก PVDF (Polyvinylidene Fluoride) และสารพวก PZT (Lead Zirconate Titanate) มาใช้แทนสารโพลีเมอร์ ตัวตรวจวัดที่ใช้สารเหล่านี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักที่กดทับ ดังนั้นนอกจากใช้ในการนับจำนวนเพลลาแล้วยังสามารถใช้วัดน้ำหนักของยานพาหนะได้อีกด้วย สัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่ได้จะส่งออกมาในรูปของแรงดัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแบบเพียโซ แบบที่ติดตั้งชั่วคราว

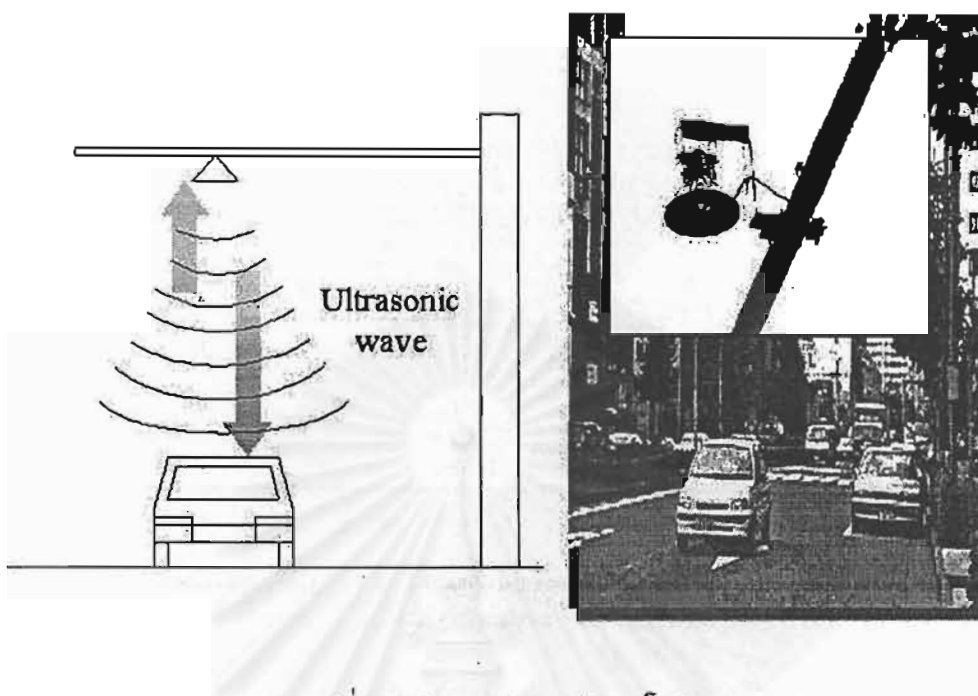


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแบบเพียโซ แบบที่ติดตั้งถาวรบนถนน

ดังนั้นตัวตรวจวัดชนิดนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการวัดน้ำหนักรถแบบ WIM (Weight - In - Motion) คือการวัดน้ำหนักที่ไม่ต้องให้ยานพาหนะจอดนิ่งอยู่กับที่ และยังสามารถใช้ในการแยกประเภทของล้อยานพาหนะแบบล้อเดี่ยวและแบบล้อคู่ได้อีกด้วย

2.5 ประเภทใช้ตัววัดแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Detector)

ตัวตรวจวัดประเภทนี้จะติดตั้งไว้ด้านบนเหนือถนน ทำงานด้วยการปล่อยคลื่นเสียงระดับอัลตราโซนิกในช่วงประมาณ 25 kHz ถึง 50 kHz (ขึ้นกับผู้ผลิต) ลงมายังบริเวณของถนนที่มีการตรวจวัดแล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับมา เพื่อหาเวลาที่เสียงใช้เดินทางทั้งหมด โดยอาศัยความแตกต่างของเวลาที่เสียงใช้ในการเดินทางระหว่างที่มียานพาหนะ และไม่มียานพาหนะ ทำให้ตรวจจับยานพาหนะได้ ในปัจจุบันมีการผลิตตัวตรวจวัดชนิดนี้ออกมาในเชิงพาณิชย์แล้ว ตัวตรวจวัดดังกล่าวมีความสามารถในการนับจำนวนยานพาหนะที่วิ่งอยู่ในช่องทางแต่ละช่องทางได้ รวมทั้งมีความสามารถในการวัดความเร็วและแบ่งประเภทยานพาหนะได้อย่างหยาบๆ การติดตั้งและการปรับแต่งทำได้โดยง่าย ไม่มีผลกระทบจากสภาพบรรยากาศ



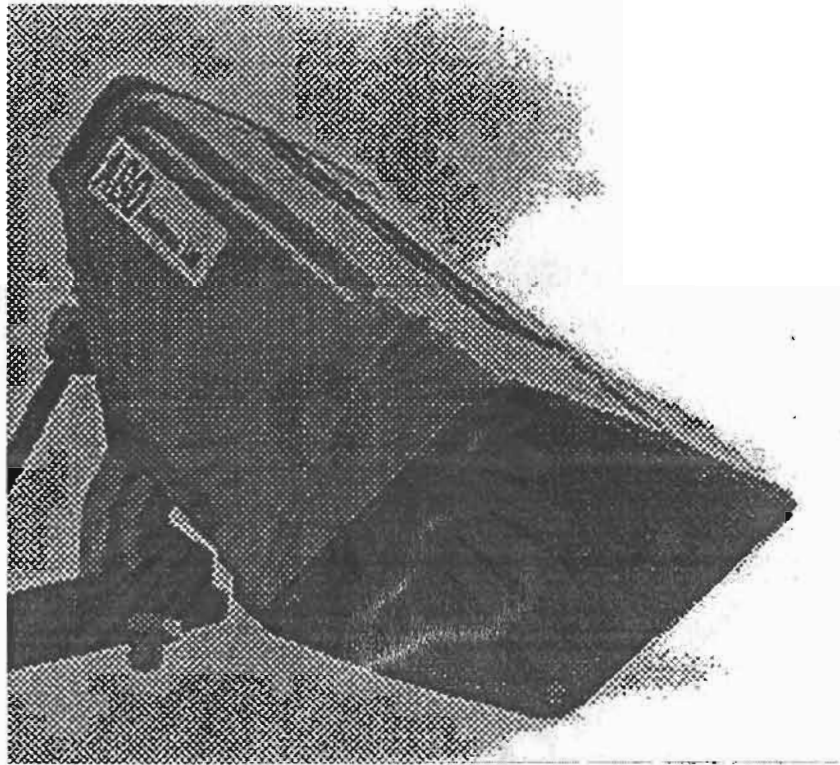
รูปที่ 2.6 ตัวตรวจวัดแบบอัลตราโซนิก

2.6 ประเภทใช้แสงอินฟราเรด (Infrared Detector)

ตัวตรวจวัดประเภทนี้ถูกติดตั้งไว้ด้านบนเหนือถนนหรือทางด้านข้าง แล้วเล็งตัวตรวจจับลงมายังผิวถนนมี 2 แบบย่อย คือแบบแอคทีฟ (Active Infrared) และแบบพาสซีฟ (Passive Infrared)

แบบแอคทีฟ (Active Infrared) ทำงานโดยส่งแสงอินฟราเรดลงมายังผิวถนน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ถ้าหากมียานพาหนะวิ่งผ่านเข้ามาในบริเวณที่ตรวจวัด เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางจะลดลงทำให้ตรวจจับการมีอยู่ของยานพาหนะที่ผ่านเข้ามาในบริเวณนั้นได้ และเมื่อติดตั้งตัวตรวจวัดจำนวน 2 ตัว จะทำให้สามารถวัดค่าความเร็วและจำนวนชนิดของยานพาหนะได้ มีการผลิตตัวตรวจวัดชนิดนี้ออกมาในเชิงพาณิชย์แล้ว แต่เวียยังมีราคาค่อนข้างสูงอยู่

แบบพาสซีฟ (Passive Infrared) ตัวตรวจวัดประเภทนี้ จะไม่มีการส่งคลื่นแสงอินฟราเรดออกมา แต่จะตรวจจับรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากบริเวณที่ตรวจวัด โดยปริมาณของรังสีความร้อนในขณะที่มียานพาหนะและไม่มียานพาหนะจะแตกต่างกัน ทำให้ตรวจนับยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาได้ มีการผลิตตัวตรวจวัดชนิดนี้ออกมาในเชิงพาณิชย์แล้วเช่นกัน



รูปที่ 2.7 ตัวตรวจวัดแบบอินฟราเรด

2.7 ประเภทใช้ไมโครเวฟ (Microwave (Radar) Detector)

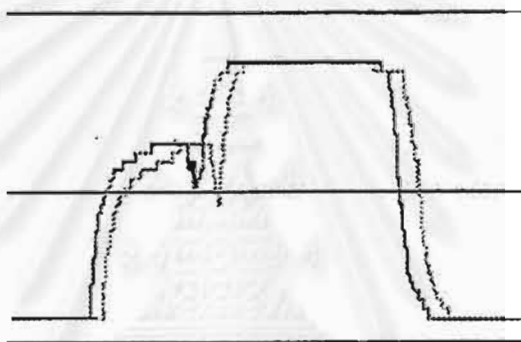
เป็นระบบที่ใช้นิยมใช้ในยุโรป จะติดตั้งอยู่เหนือถนนจากทางด้านข้างหรือด้านบน แล้วส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ในย่าน 10 - 24 GHz ทำการตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับจากยานพาหนะ มี 2 แบบ

แบบแรก จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่คงที่ แล้ววัดความเร็วของยานพาหนะภายในบริเวณที่สามารถตรวจจับได้โดยอาศัยหลักการ Doppler กล่าวคือ ผลต่างของความถี่ระหว่างคลื่นที่ส่งออกไปกับความถี่ของคลื่นที่รับเข้ามา จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของยานพาหนะ ดังนั้นการตรวจจับความถี่ที่เปลี่ยนไปก็คือการตรวจจับยานพาหนะที่ผ่านไบนั่นเอง ตัวตรวจจับแบบนี้จะไม่สามารถตรวจจับยานพาหนะที่หยุดนิ่งได้

แบบที่สอง จะส่งรูปคลื่นฟันเลื่อย ซึ่งแปรเปลี่ยนความถี่การส่งไปกับเวลาอย่างต่อเนื่อง (frequency modulated continuous wave (FMCW)) สามารถใช้ตรวจจับยานพาหนะที่หยุดนิ่งได้ โดยการวัดเวลาที่ใช้ในการเดินทางผ่านจุด 2 จุดที่รู้ระยะทาง จะสามารถคำนวณความเร็วออกมาได้ เนื่องจากตัวตรวจจับแบบนี้ใช้ตรวจจับยานพาหนะที่อยู่กับที่ไว้ บางครั้งจึงรู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า "True-Presence Microwave Radar"

2.8 ประเภทใช้แสงเลเซอร์ (Laser Detector)

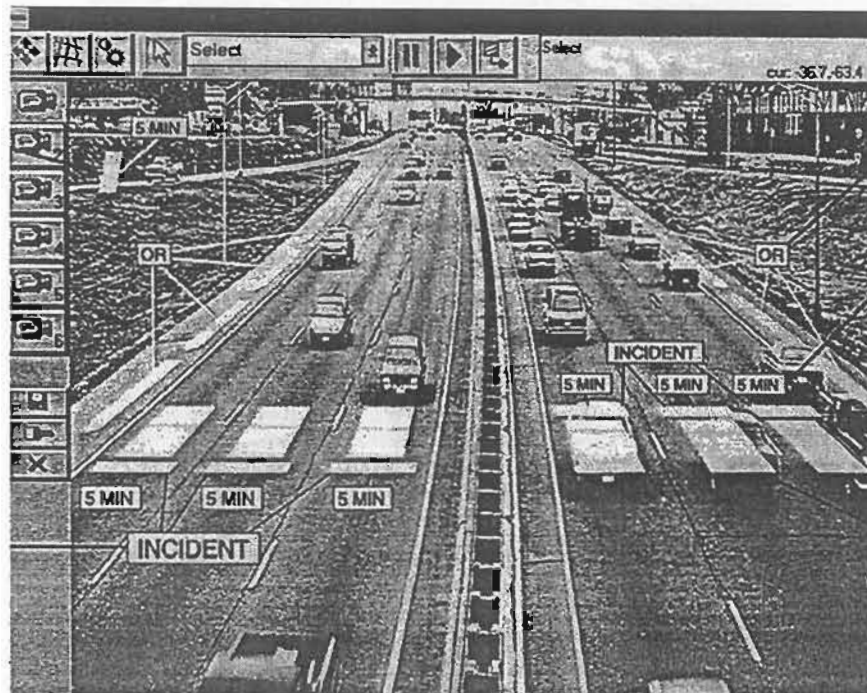
ตัวตรวจวัดประเภทนี้ใช้หลักการส่งแสงเลเซอร์ออกไป แล้ววัดสัญญาณสะท้อนกลับ โดยใช้ตัวส่งแสงเลเซอร์ที่เรียงติดกันเป็นแถวในการส่งผ่านแสงออกไป ทำให้สามารถตรวจจับวัตถุที่มีความกว้างตามขนาดที่กำหนดไว้ ซึ่งผ่านเข้ามาในบริเวณการตรวจวัด เมื่อติดตั้งตัวตรวจวัดชนิดนี้ในแนวตั้งและแนวนอน จะสามารถตรวจจับการวิ่งผ่านเข้ามาของยานพาหนะได้ อีกทั้งสามารถนำสัญญาณที่ได้นี้ไปประมวลผล เพื่อหารูปโครงภายนอกของวัตถุได้อย่างหยาบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นรูปของรถเก๋งเล็ก ปัจจุบันมีการนำตัวตรวจวัดชนิดนี้มาใช้งานจริงในประเทศไทย กับงานวัดปริมาณการจราจรของกรมทางหลวง



รูปที่ 2.8 โครงร่างของยานพาหนะขนาดเล็กที่ได้จากตัวตรวจวัดแบบเลเซอร์

2.9 ประเภทใช้การประมวลผลภาพ (Video Image Detector)

ตัวตรวจวัดประเภทนี้ใช้กล้องโทรทัศน์วงจรปิด(CCTV) ในการจับภาพการจราจรต่างๆ แล้วนำภาพที่ได้มาทำการประมวลผล ผลที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ ตั้งแต่การจัดการในเรื่องที่จอดรถ, การอ่านป้ายทะเบียนรถ, การหาค่าของปริมาณการจราจรต่างๆ, วัดอัตราการเคลื่อนไหวไหลของการจราจร ฯลฯ ระบบการตรวจวัดประเภทนี้มีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้ทั้งกล้องถ่ายภาพ ที่มีความสามารถสูง สามารถปรับตัวได้อัตโนมัติในสภาวะของแสงต่างๆกัน และยังต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงๆ เพื่อที่จะประมวลผลสัญญาณได้ในเวลาจริง ในปัจจุบันมีการผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงหน้าจอของโปรแกรมประมวลผลภาพ



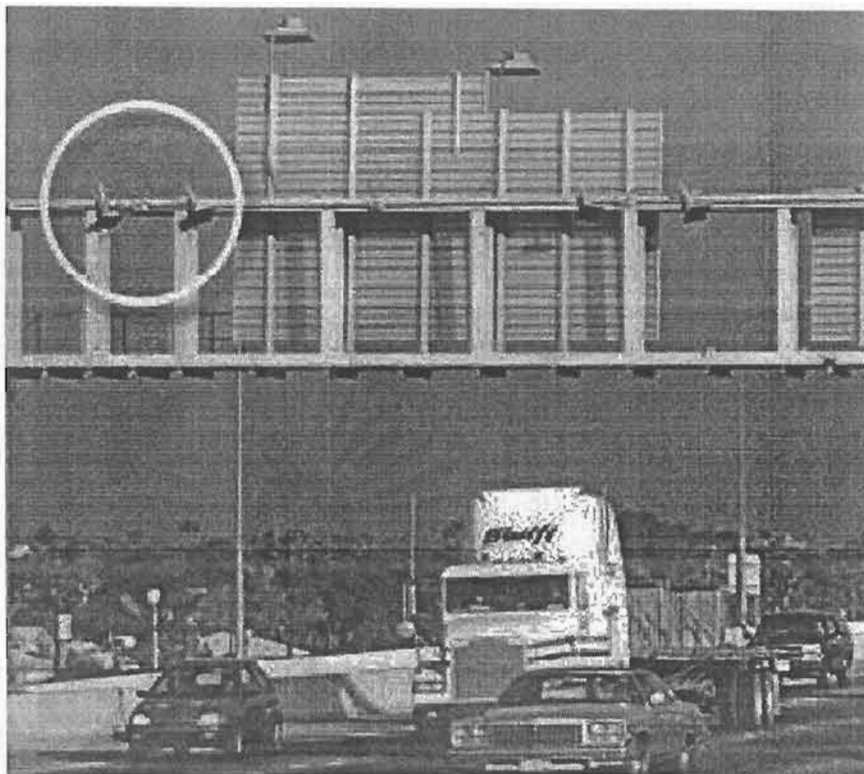
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหน้าจอของโปรแกรมประมวลผลภาพ

2.10 ประเภทใช้บัตรอิเล็กทรอนิกส์ (Tag Card)

ภายในตัวบัตรอิเล็กทรอนิกส์จะมีไมโครโปรเซสเซอร์ และหน่วยความจำอยู่ภายใน มีความสามารถในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ผ่านสัญญาณคลื่นวิทยุ หรือใช้สัญญาณไมโครเวฟ การประยุกต์ใช้งานจะมีหลายแบบ เช่น การติดตามการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทุกหนกัว่าอยู่ที่ใด ณ เวลาใดหรือผ่านจุดใดไปแล้ว , ใช้ในการวัดปริมาณการจราจรต่างๆไป , ใช้ในงานด้านรักษาความสงบเรียบร้อย เช่น ในเรื่องของรถหาย รวมทั้งมีการนำไปใช้ในเรื่องของระบบทางด่วนด้วย ในประเทศไทยมีการใช้งานบัตรอิเล็กทรอนิกส์(Tag card) ที่เรียกว่า " บัตรทางด่วน" ที่ระบบทางด่วนขั้นที่หนึ่งของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย

2.11 ประเภทใช้ตัววัดแบบพาสซีฟอะคูสติก (Passive Acoustic Detector)

ตัวตรวจวัดชนิดนี้จะใช้แผงไมโครโฟนซึ่งติดตั้งอยู่เหนือถนนจากทางด้านข้างหรือด้านบนแล้วเล็งลงมายังบริเวณที่ตรวจวัด เพื่อฟังเสียงของยานพาหนะที่ผ่านเข้ามาในบริเวณ แหล่งกำเนิดเสียงหลักของการตรวจวัดด้วยวิธีนี้ ได้มาจากเสียงที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับผิวถนน ขณะที่มียานพาหนะแล่นเข้ามาในบริเวณที่ตรวจวัดระดับพลังงานเสียงจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำเสียงที่ไมโครโฟนรับได้มาผ่านกระบวนการประมวลผลสัญญาณก็จะสามารถตรวจวัดได้ทั้งปริมาณ, การครอบครอง, ความเร็วเฉลี่ย และจำแนกประเภทของยานพาหนะ



รูปที่ 2.10 ตัวตรวจวัดแบบพาสซีฟอะคูสติก



2.12 สรุป

ข้อดีข้อเสียของตัวตรวจวัดประเภทต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปข้อดีข้อเสียของตัวตรวจวัดแต่ละประเภท

ประเภทของตัวตรวจวัด	ข้อดี	ข้อเสีย
ประเภทใช้ความเหนี่ยวนำ ขดลวด (inductive loop)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้นทุนอุปกรณ์ต่ำ 2. นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง 3. ใช้ได้ทุกสภาพอากาศและสภาวะแสง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้นทุนในการติดตั้งสูง 2. การติดตั้งยุ่งยาก ต้องปิดการจราจร 3. ไม่สามารถบอกประเภทของยานพาหนะได้
ประเภทใช้ความเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กโลก (Magnetic Detector)	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีขนาดเล็ก,ติดตั้งได้ง่ายกว่าแบบลูป (Inductive Loop) สามารถติดตั้งในที่แคบๆ ได้ 2. สามารถติดตั้งโดยฝังไว้ใต้สะพานได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีพื้นที่การตรวจจับที่แคบกว่าแบบลูป (Inductive Loop) การตรวจจับยานพาหนะขนาดเล็ก เช่น มอเตอร์ไซด์ ต้องใช้มากกว่า 1 ตัว 2. ต้องหยุดการจราจรขณะติดตั้งหรือซ่อมแซม
ประเภทใช้การกดทับ (treadle)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถใช้ในการแบ่งประเภทยานพาหนะได้ 2. สามารถใช้ในการวัดน้ำหนักยานพาหนะได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ราคาตัวตรวจวัดสูง 2. การติดตั้งต้องมีการปิดการจราจร
ประเภทใช้แสงอินฟราเรด แบบแอคทีฟ (Active)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ติดตั้งได้โดยไม่ต้องปิดการจราจร 2. สามารถตรวจวัดความเร็วและขนาดของยานพาหนะได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถแบ่งประเภทยานพาหนะได้ชัดเจน 2. มีโอกาสถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม 3. มีราคาสูง
ประเภทที่ใช้แสงเลเซอร์ (Laser)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ติดตั้งได้โดยไม่ต้องปิดการจราจร 2. แบ่งประเภทยานพาหนะได้คร่าวๆ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีราคาสูง 2. ติดตั้งตรงช่องทางเข้าเท่านั้นเหมาะสำหรับทางเข้าทางด่วน

ตารางที่ 2.1(ต่อ) สรุปข้อดีข้อเสียของตัวตรวจวัดแต่ละประเภท

<p>ประเภทใช้ไมโครเวฟ (Microwave (Radar))</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 สามารถติดตั้งได้จากด้านบนและด้านข้าง ในระดับเหนือถนน ทำให้ไม่ต้องหยุดการจราจร 2 ใช้เพียงชุดเดียวก็สามารถตรวจวัดได้หลายช่องการจราจร 3 ใช้วัดความเร็วของยานพาหนะได้โดย 	<ol style="list-style-type: none"> 1 มีราคาสูง 2 ไม่สามารถแบ่งประเภทยานพาหนะได้
<p>ประเภทการประมวลผลภาพ (Video Image Detector)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 ไม่ต้องปิดการจราจรในขณะที่ติดตั้ง 2 กล้องตัวเดียวสามารถใช้ตรวจวัดได้หลายช่องการจราจร 3 มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถให้ข้อมูลปริมาณการจราจรได้หลายชนิดจากการโปรแกรมของผู้ใช้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีราคาสูง 2 ความถูกต้องขึ้นอยู่กับสภาพแสง, สภาพอากาศ ความสว่างของพื้นที่
<p>ประเภทใช้พาสซีฟอะคูสติก (Passive Acoustic)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 สามารถติดตั้งได้จากด้านบนและด้านข้าง ในระดับเหนือถนน ไม่ต้องหยุดการจราจร 2 ตั้งและปรับแต่งได้ง่าย 	<ol style="list-style-type: none"> 1 การลดทอนของเสียงระหว่างล้อกับผิวถนน เนื่องจาก ผิวถนนถูกปกคลุมด้วยหิมะ ทำให้การตรวจจับผิดพลาดได้ 2 มีราคาไม่สูงมาก
<p>ประเภทใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 ไม่ต้องหยุดการจราจร 2 ให้ความแม่นยำในการตรวจนับยานพาหนะที่ใกล้เคียงกับแบบรูป 	<ol style="list-style-type: none"> 1 มีผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศและลมที่พัดด้วยความเร็วสูงมากๆ 2 ไม่สามารถวัดความเร็วได้แม่นยำนัก
<p>ประเภทใช้อินฟราเรดแบบพาสซีฟ (Passive Infrared)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่ต้องปิดการจราจรในขณะที่ติดตั้ง 2. ถ้าติดตั้ง 2 จุด สามารถวัดความเร็วได้ 3. สามารถติดตั้งได้จากด้านบนและด้านข้าง ในระดับเหนือถนน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีราคาไม่สูงมาก 2. ไม่สามารถแบ่งประเภทยานพาหนะได้ 3. สภาพอากาศมีผลต่อความถูกต้องในการวัด

จากตารางที่ 2.1 พอสรุปได้ว่า เครื่องวัดแบบรูป (Inductive Loop) และแบบที่เป็นท่อลม นิยมใช้ในประเทศไทย เนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานได้ง่าย แต่มีข้อเสียในเรื่องการติดตั้งบนผิวถนน ส่วนเครื่องวัดแบบไม่ต้องสัมผัสกับตัวรถ ส่วนใหญ่ก็มีราคาสูง ดังนั้นเครื่องวัดแบบพาสซีฟ (Passive) เช่นพาสซีฟอินฟราเรด (Passive Infrared), พาสซีฟอะคูสติก(Passive Acoustic) หรือแบบอัลตราโซนิก(Ultrasonic) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจที่สุด เพราะว่ามีราคาไม่แพงมากนัก และสามารถติดตั้งได้โดยไม่ต้องหยุดการจราจร



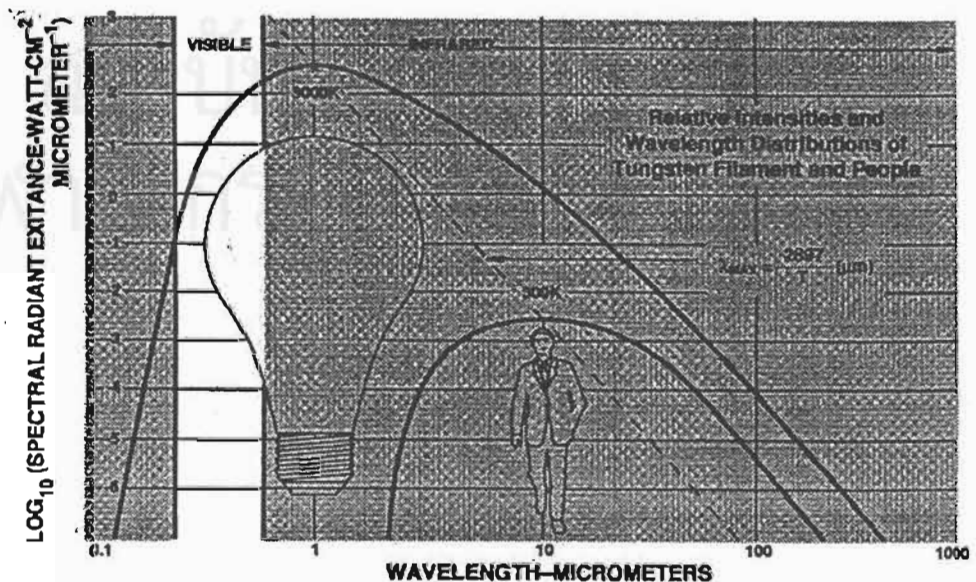
ตัวตรวจจับชนิดไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric Sensor)

3.1 ทฤษฎีแสงอินฟราเรด

แสงอินฟราเรด (infrared light) คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.75 μm ถึงประมาณ 1000 μm แสงอินฟราเรดนี้จะถูกเปล่งออกมาจากวัตถุต่างๆเช่น ถนน รถยนต์ และคน เป็นต้น แสงอินฟราเรดได้ถูกค้นพบโดย Sir William Herchel เมื่อ ค.ศ. 1800 โดยที่แสงอินฟราเรดแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ ได้ 3 ช่วง คือ

- 1) ช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.75 μm ถึง 3 μm
- 2) ช่วงอินฟราเรดกลาง (middle infrared) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3 μm ถึง 25 μm
- 3) ช่วงอินฟราเรดไกล (far infrared) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 25 μm ถึง 1000 μm

เนื่องจากตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงเฉพาะในช่วงแสงมองเห็นซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.4 - 0.7 μm ดังนั้นตาของมนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นแสงอินฟราเรดได้ แต่เนื่องจากวัสดุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะเปล่งแสงอินฟราเรดออกมาเสมอ ซึ่งการที่วัตถุสามารถแผ่รังสีออกมาได้นั้นก็เนื่องจากการสั่นของอะตอมที่อยู่ภายในวัตถุนั้น โดยที่วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าย่อมจะให้พลังงานของการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่าวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 3.0 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดเป็นไปกฎของเวิน (Wein) ดังสมการที่ 3.0

$$\lambda_p(\text{nm}) \times T(\text{K}) = 2.8979 \times 10^6 (\text{nm K}) \quad (3.0)$$

เมื่อ

λ_p = ความยาวคลื่นแสงที่ยอดของสเปกตรัม

T = อุณหภูมิของวัตถุ

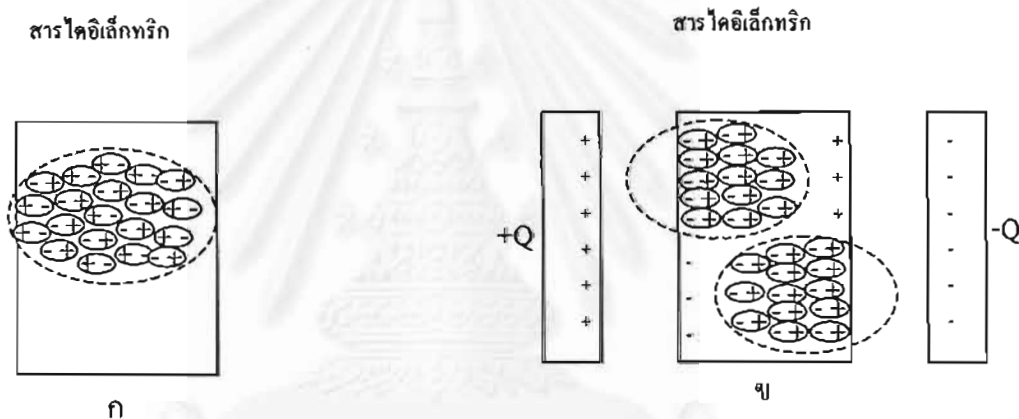
ยกตัวอย่างเช่นร่างกายมนุษย์มีอุณหภูมิประมาณ 36 องศาเซลเซียส หรือเท่ากับ 309 องศาเคลวิน เมื่อหาค่าตามสมการของเวิน (Wein) จะได้ความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาร่างกายมนุษย์เท่ากับ 9.4 μm

เราสามารถใชแสงอินฟราเรดให้เป็นประโยชน์ได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน เช่น ใช้ตรวจหาวัสดุที่ใช้วัดอุณหภูมิของวัสดุได้โดยที่ไม่มีการสัมผัส ในงานอิเล็กทรอนิกส์ มีการใช้แสงอินฟราเรดในระบบป้องกันการโจรกรรม ป้องกันอัคคีภัย วัดคุณสมบัติสาร การสื่อสาร รีโมตเซนซิง การทหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องวิเคราะห์วัสดุต่างๆ

ตัวตรวจวัดแบบโฟโวลีเลกทริกเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถตรวจวัดรังสีอินฟราเรดได้ ลักษณะเด่นของตัวตรวจวัดแบบโฟโวลีเลกทริกคือ ความไวหรือดีเทกทิวิตี(detectivity) จะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง และไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทำความเย็นหล่อให้เย็น ตัวตรวจวัดชนิดนี้จึงสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง

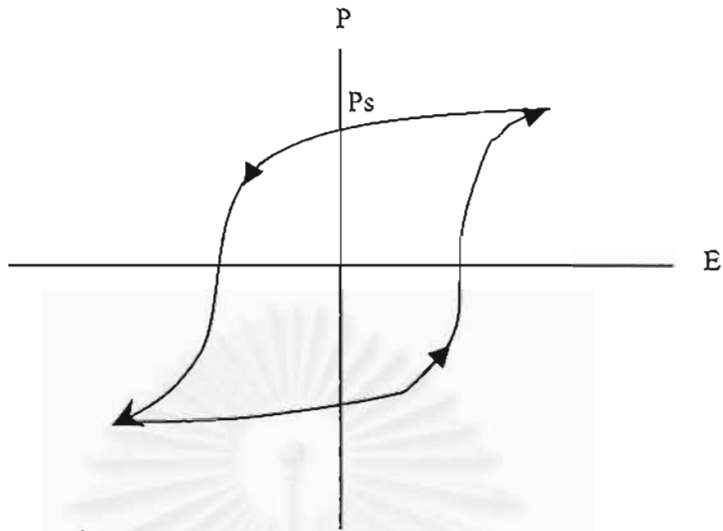
3.2 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริก

โมเลกุลของสารไดอิเล็กทริกจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกและอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ ถ้าจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ของกลุ่มประจุบวกในโมเลกุลหนึ่งไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางถ่วงของกลุ่มประจุลบ แสดงว่าโมเลกุลนั้นถูกโพลาไรซ์ และอยู่ในสภาพที่เป็นไดโพล โมเลกุลจำนวนมากในสารไดอิเล็กทริกจะมีสภาพเป็นไดโพล ถ้าสารไดอิเล็กทริกนั้นถูกนำไปวางในสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าจะทำให้จุดศูนย์กลางถ่วงของกลุ่มประจุบวกและประจุลบแยกห่างจากกัน โดยที่ประจุบวกจะพยายามเคลื่อนที่ไปทางหนึ่ง ส่วนประจุลบก็พยายามเคลื่อนที่ไปอีกทางหนึ่ง แต่เนื่องจากประจุทั้งสองถูกผูกมัดไว้ด้วยกัน ดังนั้นประจุทั้งสองจะสามารถเคลื่อนที่ออกห่างจากกันได้อย่างมากไม่เกินกว่าที่คุณสมบัติความยืดหยุ่นของเครื่องผูกมัด (bond) จะยอมให้ได้



รูปที่ 3.1 การเกิดโพลาไรเซชันเมื่อวางสารไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้า

สารไดอิเล็กทริกในสภาพปกติทั่วไป จะมีผลรวมของไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ต่อปริมาตร หรือโพลาไรเซชัน (polarization) เป็นศูนย์ เนื่องจากไดโพลเหล่านั้นวางตัวในลักษณะสุ่ม (random) จนทำให้ผลรวมของไดโพลโมเมนต์หักล้างกันไปจนมีค่าน้อยมากหรือประมาณได้ว่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 3.1 ก เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไป จึงจะเกิดโพลาไรเซชันในทิศทางของสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.1 ข แต่จะมีสารไดอิเล็กทริกบางชนิดซึ่งเมื่อนำสนามไฟฟ้าภายนอกออกไปแล้ว ก็ยังคงมีโพลาไรเซชันอยู่ ซึ่งโพลาไรเซชันภายในสารไดอิเล็กทริกที่ยังเหลืออยู่นี้เรียกว่าโพลาไรเซชันชนิดสปอนเทเนียส (spontaneous polarization) และสารไดอิเล็กทริกที่มีสปอนเทเนียสโพลาไรเซชันนี้เรียกว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric material) รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ให้แก่สารไดอิเล็กทริกและโพลาไรเซชันภายในสาร จากรูปจะเห็นว่าภายหลังจากเพิ่มสนามไฟฟ้า E แล้วลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ จะมีโพลาไรเซชันตกค้างอยู่ P_s คือ โพลาไรเซชันชนิดสปอนเทเนียส

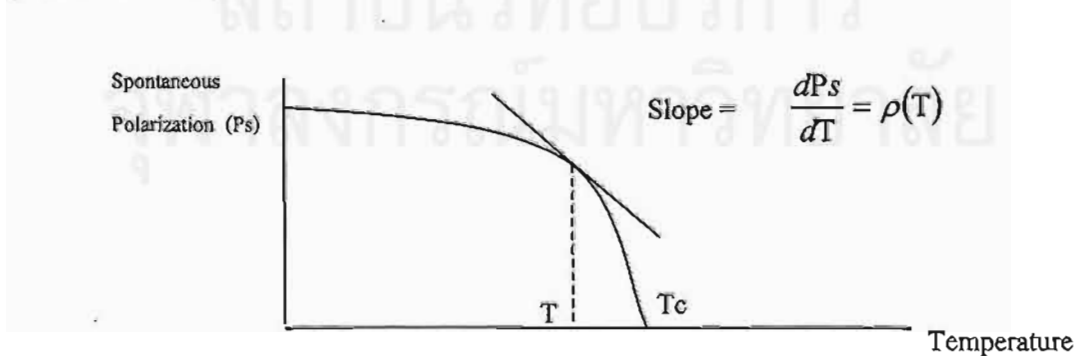


รูปที่ 3.2 ฮีสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุไพโรอิเล็กทริกเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีค่าของโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่โพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสของวัสดุไพโรอิเล็กทริกจะมีค่า ค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อถึงอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)

สาเหตุที่ทำให้โพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องมาจาก เมื่อเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้โมเลกุลในผลึกคริสตัลเกิดการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบมากขึ้นเป็นผลให้ผลรวมของไดโพลโมเมนต์ลดลงทำให้เกิดการลดลงของโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสดังรูปที่ 3.3

ซึ่งอุณหภูมิคูรี(Curie Temperature) ของแต่ละวัสดุมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุชนิดนั้นๆ อย่างเช่นอุณหภูมิคูรีของวัสดุที่ทำมาจากลิเทียมแทนทาลเตด(Lithium tantalate) จะมีค่าเท่ากับ 620 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่า สามารถที่จะใช้งานไพโรอิเล็กทริกเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากวัสดุลิเทียมแทนทาลเตดได้จนถึงอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส ตารางที่ 3.1 แสดงค่าของอุณหภูมิคูรีของสารชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียส

ตารางที่ 3.1 ค่าอุณหภูมิคูรีของสารไพโรอิเล็กทริกชนิดต่างๆ

ชนิดสาร	อุณหภูมิคูรี (องศาเซลเซียส)
BaTiO ₃	135
KNO ₃	120
SbSI	22
KNa(C ₄ H ₄ O ₆) · 4H ₂ O	24
KH ₂ PO ₄ (KDP)	-151
(CH ₂ NH ₂ COOH) ₃ H ₂ SO ₄ (TGS)	49
NaH ₃ (SeO ₃) ₂	-79
LiTaO ₃	620

จากรูปที่ 3.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ คือค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric coefficient) หรือกล่าวได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกแปรผันตามสโลปของส่วนโค้ง (curve) โพลาริเซชัน เนื่องจากค่าของโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{dPs}{dT} \quad (3.1)$$

กระแสที่ได้จากไพโรอิเล็กทริกจะเป็นดังสมการที่ 3.2

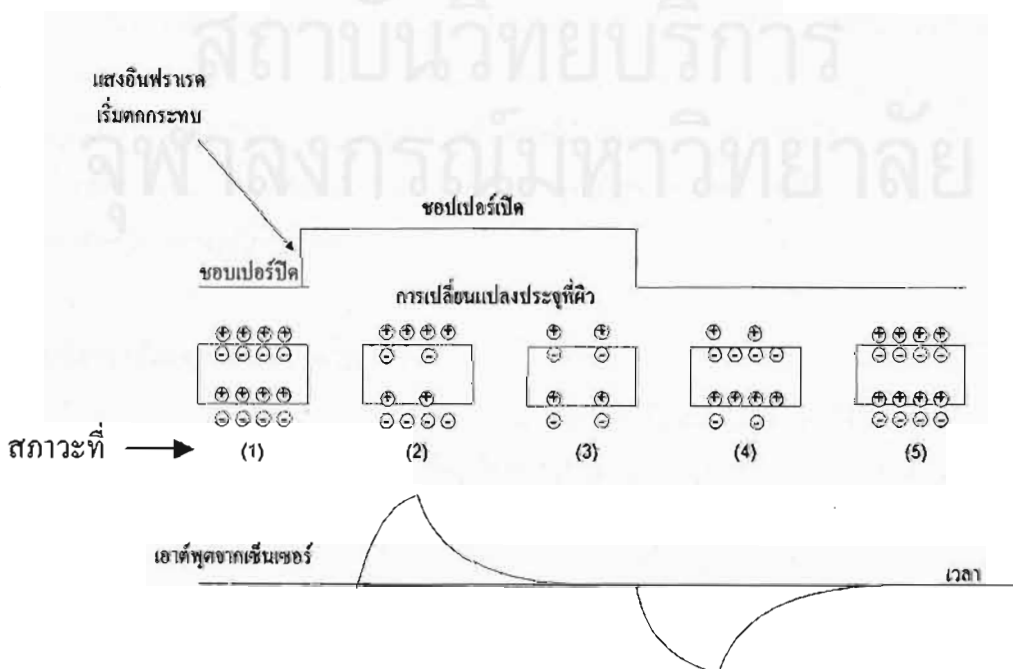
$$I = \rho(T)Ad \frac{dT}{dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \rho(T) &= \text{สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient)} \\ Ad &= \text{พื้นที่ของตัวรับแสง} \\ \frac{dT}{dt} &= \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ} \end{aligned}$$

3.3 หลักการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ไฟโรอิเล็กทริก

หลักการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ไฟโรอิเล็กทริกอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.4 ดังที่ได้อธิบายมาแล้วว่าสารไฟโรอิเล็กทริกจะมีคุณสมบัติที่จะเกิดปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก(pyroelectric effect) และมีโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสเสมอ และที่ผิวของผลึกจะมีประจุไฟฟ้าปกคลุมตลอดเวลา แต่ประจุไอออนในอากาศรอบๆ จะเป็นตัวช่วยให้ผิวผลึกมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าเมื่อผลึกอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสมดุลดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในสภาวะที่ (1) เมื่อมีแสงอินฟราเรดในย่านที่ไฟโรอิเล็กทริกตอบสนอง ตกกระทบผลึก ดังในสภาวะที่ (2) ผลึกจะดูดกลืนแสงทำให้อุณหภูมิของผลึกสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่าโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ลดลง ดังนั้นประจุที่ผิวผลึกที่เกิดจากโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสจะมีค่าน้อยกว่าประจุไอออนที่อยู่ในอากาศรอบๆผลึก จึงเกิดการไม่สมดุลกันขึ้นระหว่างประจุที่ผิวผลึกกับประจุไอออนในอากาศ เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของผลึก แต่ในระหว่างที่แสงยังคงตกกระทบอยู่นี้ ประจุไอออนในอากาศรอบๆ จะพยายามดุลกับประจุที่ผิวของผลึก ทำให้เกิดการสมดุลของประจุอีกครั้ง เป็นผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวผลึกเป็นศูนย์อีกครั้งดังแสดงในสภาวะที่ (3) และเมื่อเราปิดแสงไม่ให้เกิดการชนกับผิวของผลึกดังแสดงในสภาวะที่(4) ก็จะทำให้อุณหภูมิจึงทำให้ค่าโพลาริเซชันชนิดสปอนเทเนียสเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างประจุที่ผิวและประจุไอออนในอากาศอีกครั้ง ดังนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของผลึกอีกครั้งหนึ่ง แต่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับตอนแรก ทำให้เอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับตอนแรก หลังจากนั้นประจุไอออนในอากาศจะพยายามดุลกับประจุที่ผิวผลึกอีกครั้งเพื่อทำให้เกิดการสมดุล จึงทำให้ความต่างศักย์กลับมาเป็นศูนย์อีกครั้ง ดังแสดงในสภาวะที่ (5) จากหลักการทำงานดังกล่าว จะเห็นว่าไฟโรอิเล็กทริกสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผลึกเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการใช้วัดแสงคงที่ จะต้องมีการ chop (chopping) แสงด้วย



รูปที่ 3.4 การเกิดปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก

3.4 วัสดุที่ใช้ทำตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก

ตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริกถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุไพโรอิเล็กทริก(pyroelectric material) ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิดเช่น Lithium Tantalate(LiTaO₃), Polyvinylidene Fluoride(PVDF), Tryglycine Sulphate(TGS), Barium Titanate(BaTiO₃) วัสดุไพโรอิเล็กทริกแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันไปดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติฟิสิกส์ของวัสดุไพโรอิเล็กทริก

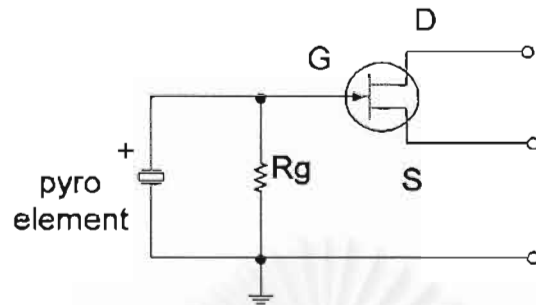
วัสดุไพโรอิเล็กทริก	ρ° (nC/cm ² K)	Ps ⁺ (μC/cm)	Tc (C)
LiTaO ₃	19	50	620
TGS	30	2.8	49
PVF ₂	3	22	59
BaTiO ₃	20	26	135

- เมื่อ @ เป็นค่าที่อุณหภูมิห้อง (27 C)
 + เป็นค่าที่อุณหภูมิคูรี
 ρ คือค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก
 Ps คือค่าโพลาไรเซชันชนิดสปอนเทเนียส
 Tc คือค่าอุณหภูมิคูรี

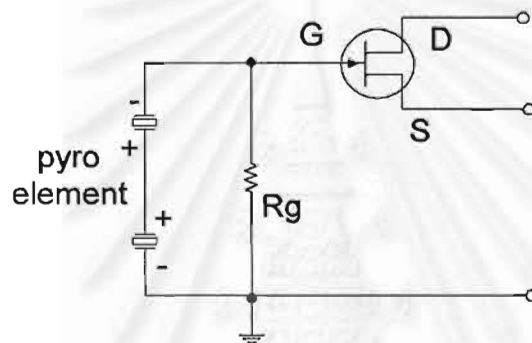
จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สาร TGS มีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูงแต่มีค่าอุณหภูมิคูรีที่ต่ำ ดังนั้นในการนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมทั่วไปจะเห็นได้ว่า TGS และ PVF₂ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ ส่วน LiTaO₃ และ BaTiO₃ มีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่ใกล้เคียงกัน แต่ LiTaO₃ จะใช้งานที่อุณหภูมิได้สูงกว่า BaTiO₃ วัสดุไพโรอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้ทำตัวตรวจวัดคือ LiTaO₃ สาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างกว่าสารอื่นๆ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานตัวตรวจวัดได้มากกว่าเพราะไม่ถูกจำกัดเรื่องอุณหภูมิการใช้งาน

3.5 ชนิดของตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก

ตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริกมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือแบบใช้ผลึกตรวจจับเดี่ยว (single sensing element) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และแบบใช้ผลึกตรวจจับคู่ (dual sensing element) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



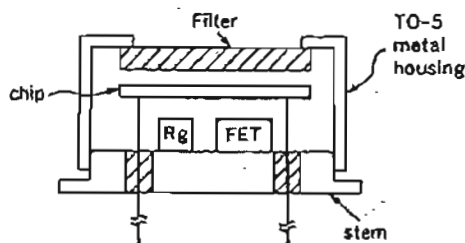
รูปที่ 3.5 ตัวตรวจวัดไพโรอิเล็กทริกชนิดผลึกเดี่ยว



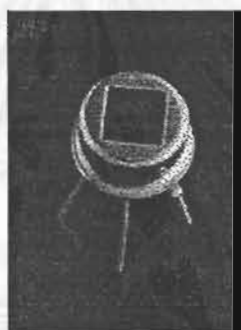
รูปที่ 3.6 ตัวตรวจวัดไพโรอิเล็กทริกชนิดผลึกคู่

ตัวตรวจจับทั้ง 2 แบบจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของการแผ่รังสีอินฟราเรดเหมือนกัน แต่ตัวตรวจจับแบบที่ใช้ผลึกคู่จะมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าตัวตรวจจับแบบผลึกเดี่ยว เนื่องจากลักษณะการต่อของผลึกเป็นการต่อในลักษณะกลับขั้วกัน ทำให้ประจุไฟฟ้าหักล้างกันเมื่อผลึกทั้งคู่มีอุณหภูมิเท่ากัน จึงมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมสูงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบข้ามๆ ทำให้ไม่มีผลต่อตัวตรวจจับแต่จะมีผลเฉพาะเมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านตัวตรวจวัดเท่านั้น

ในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าจะมีฟิลเตอร์ติดอยู่ที่ด้านหน้าของตัวตรวจวัด เนื่องจากว่าตัวผลึกไพโรอิเล็กทริกจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นในช่วงกว้างมาก ดังนั้นในการใช้งาน จึงต้องใช้ฟิลเตอร์เพื่อที่จะทำให้ตัวตรวจจับตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นที่กำหนดเท่านั้น ส่วนรูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างจริงของตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของตัวตรวจวัด



รูปที่ 3.8 รูปร่างจริงของตัวตรวจวัดแบบโฟโตรีเล็กทริก

3.5.1 ฟิลเตอร์ของตัวตรวจจับแบบโฟโตรีเล็กทริก

ฟิลเตอร์ของตัวตรวจจับแบบโฟโตรีเล็กทริกมีหลายชนิด แต่ละชนิดก็จะถูกออกแบบมาให้ใช้งานในย่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปตามลักษณะงานที่นำไปใช้ เช่น

1. ฟิลเตอร์ย่านความยาวคลื่น 8-14 μm

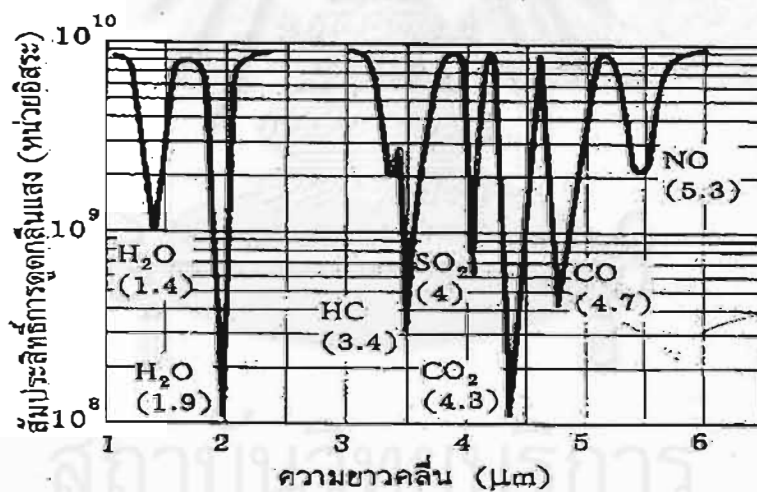
ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะยอมให้รังสีอินฟราเรดย่านความยาวคลื่น 8-14 μm ผ่านเข้ามาและจะป้องกันแสงแดดและแสงจากหลอดไฟฟ้าไม่ให้ผ่านเข้าไปกระทบกับผลึกโฟโตรีเล็กทริก ตัวตรวจจับแบบโฟโตรีเล็กทริกที่ใช้ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะใช้สำหรับตรวจจับวัตถุหรือคน เนื่องจากคนและวัตถุต่างๆ ส่วนใหญ่จะแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาในย่านความยาวคลื่นช่วงนี้ ตัวตรวจวัดแบบโฟโตรีเล็กทริกที่ใช้ฟิลเตอร์ชนิดนี้ เป็นตัวตรวจวัดที่นิยมผลิตกันมากที่สุดเนื่องจากสามารถใช้งานได้กว้างขวาง ไม่จำเพาะเจาะจงเกินไป สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท เช่น ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจจับขโมย, ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสำหรับประตูอัตโนมัติ, ใช้ทำเป็นสวิตช์ไฟอัตโนมัติ และอื่นๆ

2. ฟิลเตอร์สำหรับตรวจจับเปลวไฟ

ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะถูกออกแบบมาให้เฉพาะรังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟ ผ่านเข้าไปกระทบผลึกไฟโรอิเล็กทริกได้เท่านั้น ความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟจะอยู่ที่ประมาณ $4 \mu\text{m}$ ตัวตรวจวัดไฟโรอิเล็กทริกที่ใช้ฟิลเตอร์ชนิดนี้ใช้สำหรับตรวจจับเปลวไฟเท่านั้น และถูกออกแบบมาให้ใช้กับเฉพาะงาน ไม่สามารถนำไปตรวจจับคนหรือวัตถุได้

3. ฟิลเตอร์สำหรับตรวจจับก๊าซ

การวัดการดูดกลืนแสงในก๊าซจะทำให้ทราบความเข้มข้นหรือส่วนผสมของก๊าซได้ เช่น ใช้วัดไอเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากรถยนต์ (CO_2 , CO , HC) ก๊าซจากปล่องควันเผาไหม้ (CO , SO_2 , NO_2) การรั่วไหล (CH_4 , C_2H_6) เป็นต้น รูปที่ 3.9 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซชนิดต่างๆ ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงที่เกิดการดูดกลืนแสงโดยก๊าซเหล่านี้เป็นค่าเฉพาะตัวของก๊าซแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังใช้แสงอินฟราเรดวัดปริมาณส่วนผสมของก๊าซในเครื่องต้มได้ด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดูดกลืน



รูปที่ 3.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซชนิดต่างๆ

แสงได้ดีที่ความยาวคลื่นแสง $4.3 \mu\text{m}$ ส่วน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นแสง $4.7 \mu\text{m}$ และน้ำตาลจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นแสง $3.9 \mu\text{m}$ เป็นต้น จากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของก๊าซชนิดต่างๆ ดังกล่าวนี้ ฟิลเตอร์ที่ออกแบบมาสำหรับตรวจจับก๊าซจึงต้องยอมให้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนดในช่วงแคบมากๆ เท่านั้นผ่านเข้าไปกระทบกับผลึกไฟโรอิเล็กทริกได้

3.6 เลนส์เฟรเนล

เลนส์เฟรเนล เป็นเลนส์ที่ใช้สำหรับรวมแสงอินฟราเรด และจะเป็นตัวกำหนดระยะของการตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไพโรอิเล็กทริกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นเลนส์เฟรเนลบางชนิดจะมีคุณสมบัติเหมือนฟิลเตอร์ โดยที่จะยอมให้แสงอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการเท่านั้นผ่านเข้ามาได้ และจะป้องกันแสงรบกวนจากหลอดไฟฟ้าหรือจากดวงอาทิตย์ไม่ให้มารบกวนตัวตรวจจับด้วย



ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณการจราจร

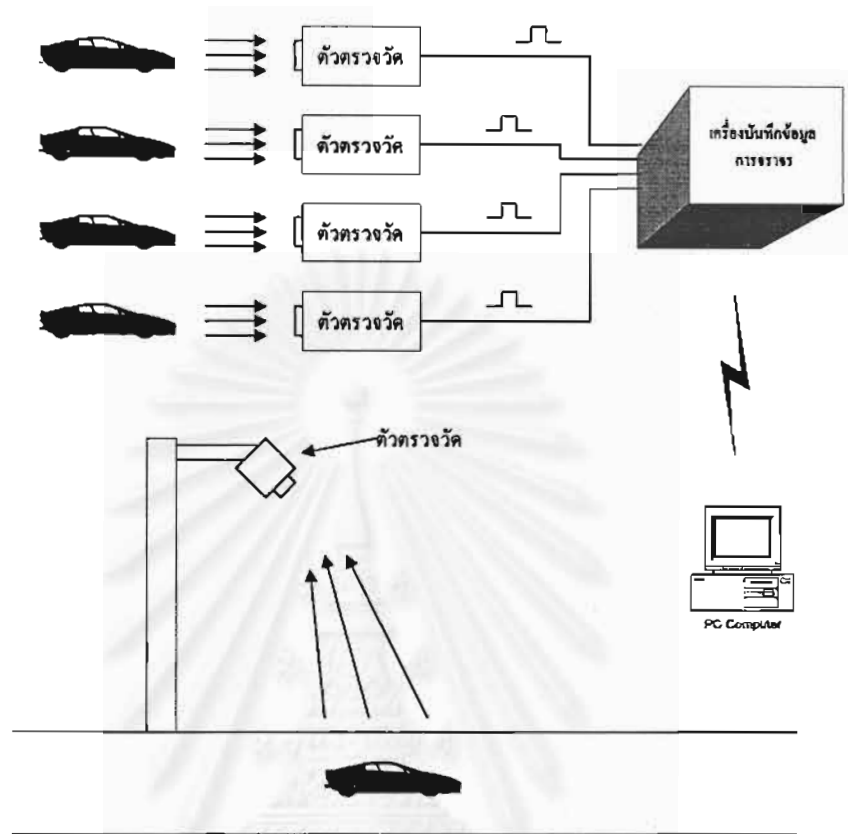
เครื่องวัดปริมาณการจราจรที่จะออกแบบขึ้นนี้ เป็นเครื่องวัดปริมาณการจราจรที่ใช้หลักการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างที่มีรถและไม่มีรถวิ่งเข้ามา โดยในตอนแรกได้กำหนดคุณสมบัติของเครื่องวัดที่จะออกแบบเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง ดังต่อไปนี้

1. ต้องนับรถได้ทุกชนิด เช่น รถยนต์, รถกระบะ, รถเมล์, รถบรรทุก
2. ความเร็วของรถที่สามารถตรวจวัดได้ต้องอยู่ในช่วง 10 - 150 km/hr
3. สามารถวัดรถได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน
4. สามารถใช้ไฟฟ้าได้จากแบตเตอรี่ โดยที่ไม่ต้องพ่วงไฟฟ้า 220 โวลต์
5. สามารถวัดรถได้อย่างน้อย 4 ช่องการจราจร โดยที่แต่ละช่องการจราจรจะมีตัวตรวจจับ 1 ชุด
6. สามารถเก็บข้อมูลสูงสุดได้ 65,535 คันต่อทุกๆ 15 นาที
7. สามารถเก็บข้อมูลการจราจรได้นานต่อเนื่องกันสูงสุดประมาณ 1 เดือน
8. สามารถแสดงจำนวนรถที่วิ่งผ่านในขณะนั้นได้

เครื่องวัดปริมาณการจราจรที่ได้ออกแบบขึ้น ประกอบด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวตรวจจับรถ และส่วนของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เมื่อมีรถวิ่งผ่านเข้ามาในรัศมีของตัวตรวจจับ จะทำให้ตัวตรวจจับส่งสัญญาณพัลส์ ไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อที่จะนับและเก็บจำนวนรถที่นับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ไว้ในหน่วยความจำแรม (RAM) ซึ่งมีแบตเตอรี่สำรองที่สามารถจะเก็บรักษาข้อมูลไว้ในหน่วยความจำแรม ได้นานมากกว่า 1 เดือน เพื่อป้องกันข้อมูลสูญหาย ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลจะถูกนำไปเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งจะมีโปรแกรมที่สามารถแสดงข้อมูลการจราจรที่วัดไว้แล้วได้

ในการติดตั้งตัวตรวจจับ จะติดตั้งไว้กับสะพานลอย และเลี้ยงตัวตรวจจับลงมายังถนนในช่องการจราจรที่ต้องการจะวัด



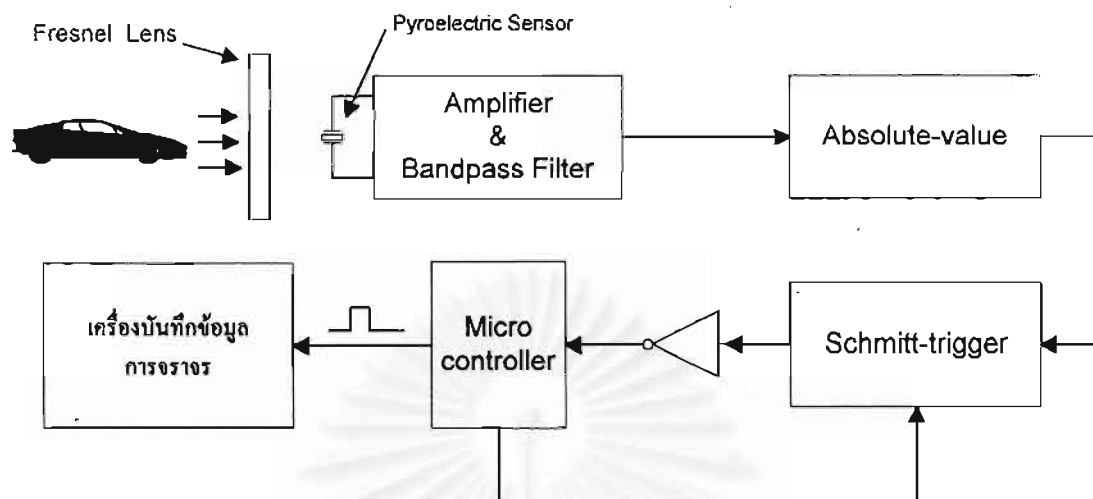
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณการจราจร

4.1 ส่วนวงจรตัวตรวจวัด

ส่วนวงจรตัวตรวจวัดจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตรวจจับแบบไฟโรอิเล็กทริก, เลนส์เฟรเนล (fresnel lens) และส่วนของวงจรที่ใช้ในการประมวลสัญญาณดังรูปที่ 4.2 ซึ่งอธิบายการทำงานได้ดังนี้

เมื่อมีรถวิ่งผ่านเข้ามาในรัศมีของตัวตรวจจับ จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่อุปกรณ์ไฟโรอิเล็กทริก แรงดันนี้จะถูกขยายและผ่านวงจรกรองแบบแบนด์พาส เพื่อขยายสัญญาณให้แรงขึ้นและกำจัดสัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ หลังจากนั้นจะถูกส่งไปยังวงจรค่าสัมบูรณ์ เพื่อปรับระดับแรงดันด้านล่างให้ขึ้นมาอยู่ด้านเดียวกันให้หมดทำให้ขนาดของสัญญาณใหญ่ขึ้น

หลังจากผ่านวงจรค่าสัมบูรณ์แล้ว สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิงและเปลี่ยนให้กลายเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ด้วยวงจรชmitt-ทริกเกอร์ (Schmitt-trigger) ซึ่งมีแรงดันอ้างอิงระดับบน(Upper Threshold) อยู่ 2 ค่า ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวเลือกว่าจะใช้แรงดันอ้างอิงระดับบนค่าใด หลังจากนั้นสัญญาณจะผ่านเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวัดความกว้างพัลส์ และจะให้พัลส์เอาต์พุตออก 1 พัลส์ เมื่อมีรถวิ่งผ่านไป 1 คัน



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบวงจรตัวตรวจจับ

ตัวตรวจจับชนิดไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric Sensor) ที่ใช้ เป็นชนิดผลึกคู่ ซึ่งมีข้อดีคือจะไม่รับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม และมีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นอยู่ที่ 5-20 μm คุณสมบัติของตัวเซนเซอร์แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 คุณสมบัติของตัวไพโรอิเล็กทริกเซ็นเซอร์

Items	Min	Type	Max	Units
Operating Temp.	-	-20 ~ +60	-	C
Storage Temp.	-	-30 ~ +85	-	C
Operating Voltage	3	-	15	V
Spectral Response	-	5 - 20	-	μm
Output DC Offset Voltage	0.2	-	1	V
Output Noise	-	-	0.8	V _{p-p}
Signal Output	5	-	-	V _{p-p}
Output Balance	-	-	15	%

เลนส์เฟรเนล (fresnel lens) เป็นตัวกำหนดรัศมีของการตรวจจับ ระยะการตรวจจับควรครอบคลุมช่องจราจรได้ 1 ช่อง คือประมาณ 3 เมตร แต่เนื่องจากเลนส์เฟรเนลที่นำมาใช้ ไม่ได้ออกแบบเพื่อการตรวจจับยานพาหนะ ดังนั้นระยะตรวจจับจึงทำได้ไม่ถึง 3 เมตร จากการทดลองนำเลนส์เฟรเนลไปใช้พบว่า ที่ความสูงจากพื้นถนนประมาณ 7 เมตร จะให้พื้นที่ครอบคลุมเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 2.5 เมตร ซึ่งเกือบจะครอบคลุมช่องจราจร 1 ช่อง

4.1.1 การออกแบบวงจรขยายและวงจรรอง (Amplifier and Bandpass Filter)

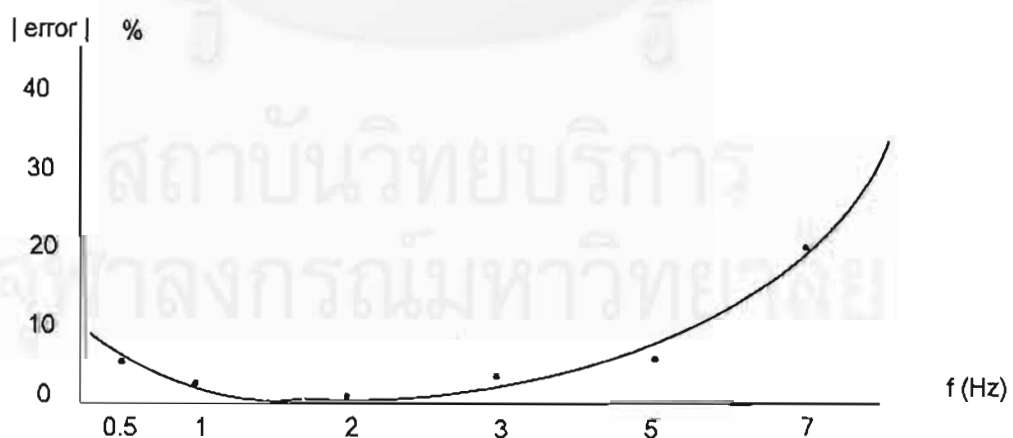
วงจขยายจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก ซึ่งมีแรงดันที่เล็กมาก (เป็น μv) ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นพอที่จะประมวลสัญญาณได้

วงจรรองจะกรองสัญญาณรบกวนทิ้งไป และยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเครื่องตรวจจับรถว่าจะสามารถตรวจจับรถได้ที่ความเร็วสูงสุดและความเร็วต่ำสุดเท่าไร

ในการทดลองหาค่าที่เหมาะสมของวงจรรองความถี่ ผู้วิจัยได้เปลี่ยนค่าความถี่เป็นค่าต่างๆ กัน และนำไปตรวจจับรถที่ความเร็วต่างๆ กัน

การหาค่าความถี่ตัดทางด้านความถี่ต่ำ (low frequency cutoff)

ในการทดลองหาค่าที่เหมาะสม เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ตัดทางด้านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0.5 Hz ไปเรื่อยๆ และนำไปตรวจจับรถที่วิ่งช้ามากๆ ประมาณ 10-20 km /ชม จะได้แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิด ดังรูปที่ 4.3

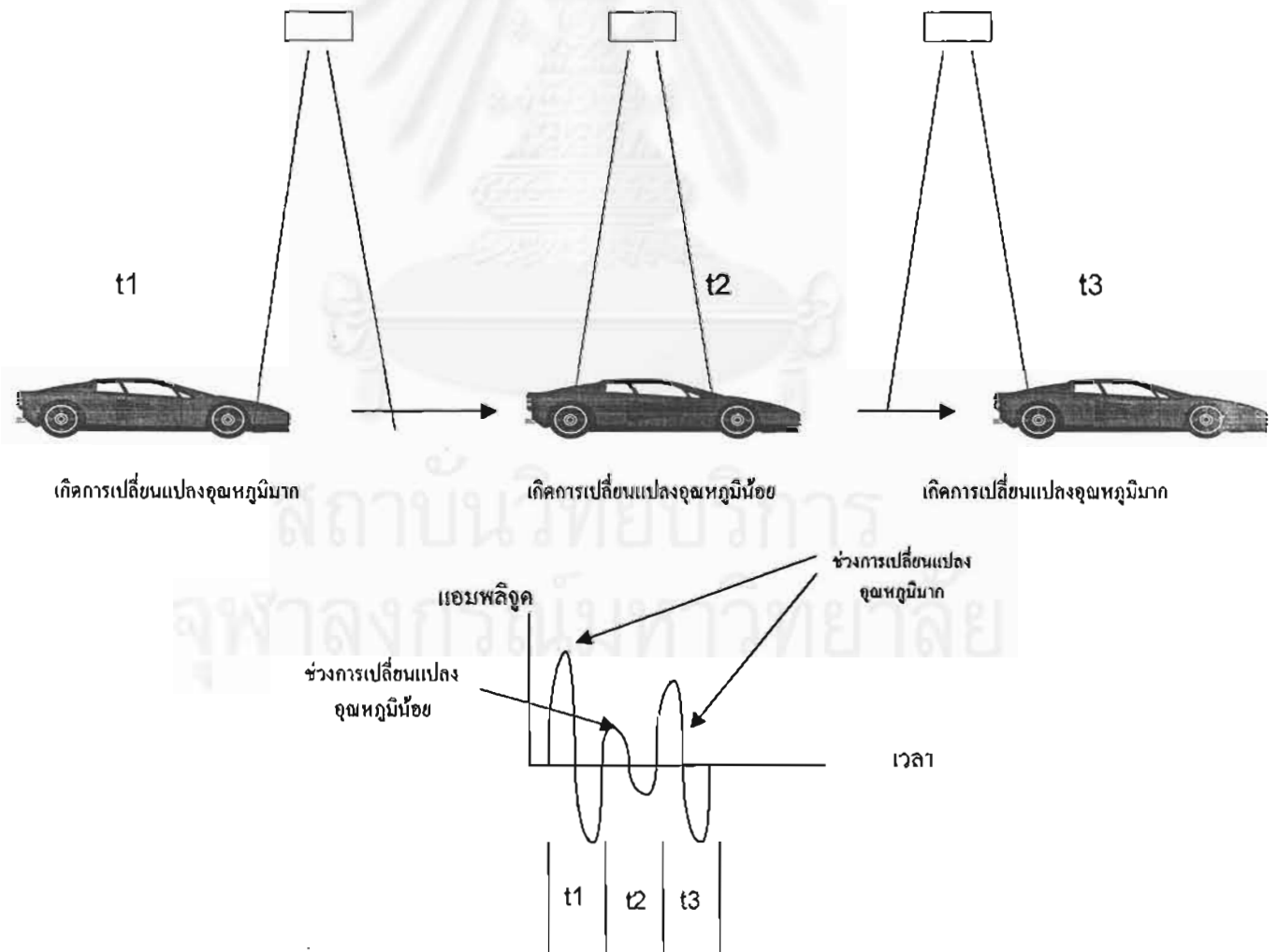


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความถี่ตัดด้านต่ำของวงจรรองกับค่าความผิดพลาดในการนับรถ

จะเห็นได้ว่า ถ้าเราเลือกความถี่ตัดที่สูงเกินไปจะมีความผิดพลาดจากการนับเกิดขึ้น เนื่องจากการเลือกให้ความถี่ตัดต่ำมาก ทำให้การตอบสนองของตัวตรวจวัดไวต่อการเคลื่อนไหวมากเกินไป แม้กระทั่งการเคลื่อนไหวเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้ตรวจจับได้ นอกจากนั้นยังจะทำให้ใช้เวลานานขึ้นกว่าที่สัญญาณจะหายไป เมื่อรถวิ่งออกไปจากรัศมีของตัวตรวจจับแล้ว ในกรณีที่มียุ้งตามกันมาอย่างช้าๆ ในขณะที่รถคันแรกวิ่งผ่านรัศมีของการตรวจจับไปแล้ว แต่สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่หันจะหายไปหมด รถคันที่สองก็วิ่งเข้ามาทำให้เกิดการนับผิดพลาดขึ้น

ถ้าเลือกความถี่ตัดที่สูงเกินไปก็จะทำให้ความผิดพลาดในการนับเกิดขึ้นอีก คือบางครั้งเครื่องจะนับได้ 2 คัน ในขณะที่มียุ้งผ่านคันเดียว และถ้ายังเพิ่มความถี่ตัดให้สูงขึ้นอีกก็จะทำให้ไม่สามารถตรวจจับรถที่วิ่งช้าประมาณ 10-20 km ได้เลย

สาเหตุที่ทำให้เครื่องตรวจจับนับได้ 2 คัน ทั้งที่จริงแล้วมียุ้งผ่านคันเดียวเป็นเพราะว่า ในขณะที่รถเริ่มเข้ามาในรัศมีของตัวตรวจจับ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากอุณหภูมิของถนนไปเป็นอุณหภูมิของรถที่กำลังวิ่งเข้ามาดังรูปที่ 4.4 (t1) ทำให้เกิดแรงดันที่เอาต์พุตของตัวตรวจจับ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆ เมื่อรถเริ่มวิ่งเข้ามาและวิ่งออกไปจากตัวตรวจจับและสัญญาณที่ได้

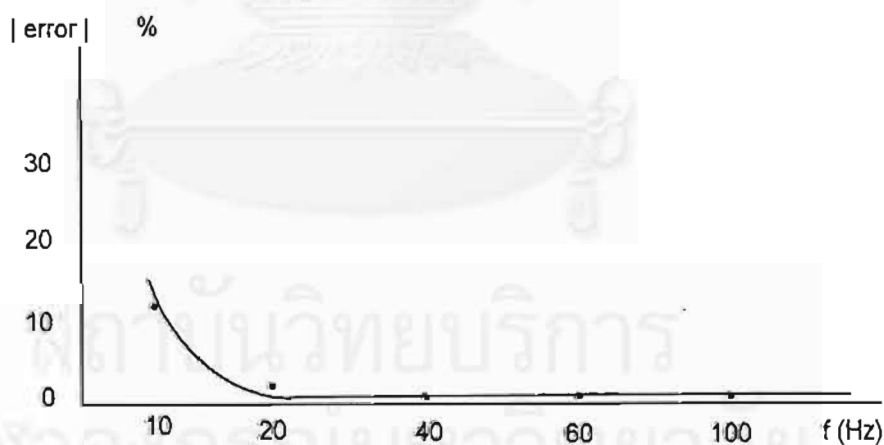
และเมื่อรถวิ่งเข้าไปอยู่กึ่งกลางของรัศมีตัวตรวจจับ (สมมุติว่ารถวิ่งช้ามาก) ช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย เนื่องจากยังเป็นอุณหภูมิของรถคันเดิม และผลึกไพโรอิเล็กทริกพยายามจะสร้างดุลประจุที่ผิวผลึก ทำให้แรงดันช่วงนี้ลดลง และเมื่อรถเริ่มวิ่งพ้นรัศมีของตัวตรวจจับ ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีกครั้ง จากอุณหภูมิของรถกลับไปเป็นอุณหภูมิของผิวถนน ทำให้แรงดันช่วงนี้มีค่าสูงขึ้นอีก

ดังนั้นถ้าเราเลือกความถี่ตัดที่สูงเกินไป ก็อาจจะทำให้ในช่วงที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย(t_2) ซึ่งทำให้แรงดันที่น้อยอยู่แล้ว น้อยลงไปอีกจนอาจจะทำให้ระดับสัญญาณต่ำกว่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนด ในกรณีนี้ที่รถวิ่งช้ามาก อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการนับขึ้น 2 ครั้งได้ คือตอนที่รถเริ่มวิ่งเข้ามา และรถวิ่งออกไปจากรัศมีของตัวตรวจจับ

ดังนั้นช่วงความถี่ตัดด้านต่ำ (Low cutoff frequency) ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1.3 Hz - 2.5 Hz ซึ่งหลังจากที่ทดลองแล้วพบว่า ความถี่ตัดประมาณ 1.5 Hz เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาความถี่ตัดทางด้านความถี่สูง (high cutoff frequency)

ในการทดลองหาความถี่ตัดด้านสูง จะทดลองคล้ายๆ ทางด้านความถี่ต่ำ แต่จะเปลี่ยนจากที่นำไปตรวจจับรถที่วิ่งช้า เป็นรถที่วิ่งเร็ว (>100 km/hr) ซึ่งจะได้กราฟแสดงค่าแนวโน้มความผิดพลาดเทียบกับความถี่ ดังรูปที่ 4.5



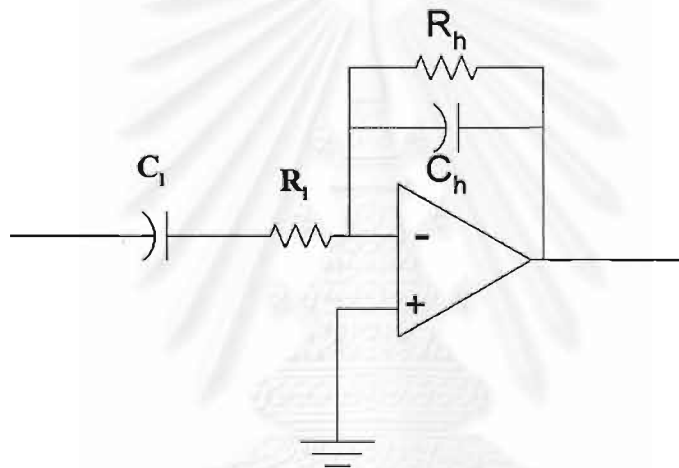
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความถี่ด้านสูงของวงจรกรองกับค่าแนวโน้มความผิดพลาดในการนับรถ

กราฟในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ตัดที่สูงกว่า 15 Hz เรื่อยไป สามารถตรวจจับรถที่มีความเร็วสูงมากกว่า 100 km/hr ได้ ในที่นี้จะใช้ความถี่ตัดที่ประมาณ 60 Hz

วงจรกรองชนิดแบนด์พาสที่นำมาใช้นี้ เป็นวงจรชนิด RC แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่ง ค่าความถี่ตัดด้านต่ำ และความถี่ตัดด้านสูง สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{ความถี่ตัดด้านต่ำ} \quad fL = \frac{1}{2\pi C_l R_l} \quad (4.1)$$

$$\text{ความถี่ตัดด้านสูง} \quad fH = \frac{1}{2\pi C_h R_h} \quad (4.2)$$



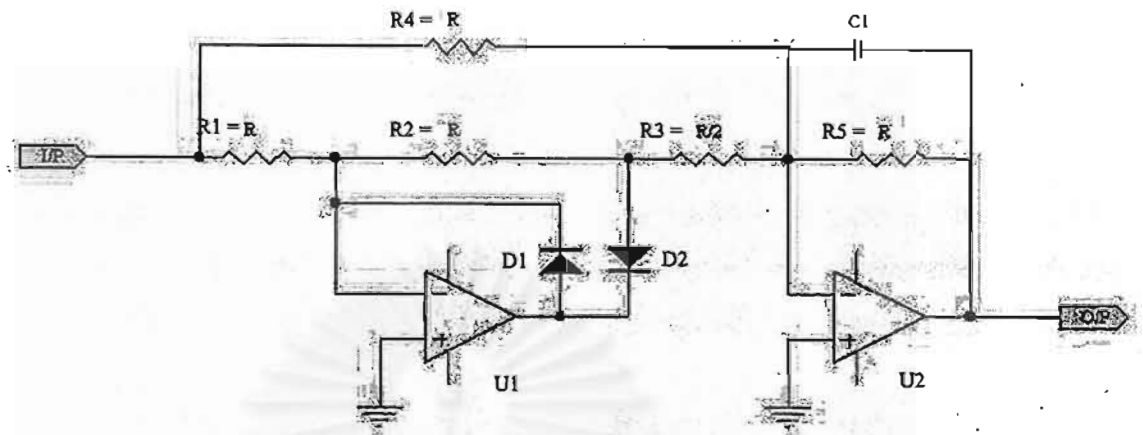
รูปที่ 4.6 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์

ถ้าเราต้องการวงจรกรองแบบแบนด์พาส ที่มีความถี่ตัดด้านต่ำ 1.5 Hz และความถี่ตัดด้านสูง 60 Hz และต้องการอัตราขยายประมาณ 4000 เท่า เราจะใช้วงจรในรูปที่ 4.6 ต่อทอดเนื่อง(Cascade) กันเป็น 2 ชุด โดยให้ชุดแรกมีอัตราขยาย 100 เท่า และ ชุดที่สองมีอัตราขยาย 40 เท่า วงจรผลรวมสามารถดูได้ในภาคผนวก

4.1.2 ส่วนวงจรค่าสัมบูรณ์ (Absolute-Value Circuits)

วงจรค่าสัมบูรณ์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (full-wave rectifier) วงจรส่วนนี้จะกลับสัญญาณด้านลบให้ขึ้นมายุ่ด้านบน โครงสร้างวงจรค่าสัมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.7





รูปที่ 4.7 โครงสร้างวงจรค่าสัมบูรณ์

จากรูป สามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้

เมื่ออินพุตมีแรงดัน $(+E_i)$ มากกว่าแรงดันที่ขั้วอินพุตบวกของออปแอมป์ U1 ซึ่งในที่นี้ต่อลงกราวด์ไว้ ทำให้ที่ขั้วของอินพุตลบก็จะมีศักย์เป็นกราวด์ด้วย กระแสจึงไหลผ่านจากอินพุต E_i มายัง R_1 ผ่าน R_2 ทำให้โหนดตรงขั้วแอนโหนดของไดโอด D_2 มีค่าแรงดันเท่ากับ $-E_i$ และกระแสดังกล่าวจะไหลผ่าน D_2 ไป ซึ่งกระแสดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $E_i/R = I$ กระแสอีกส่วนหนึ่งจะไหลผ่าน R_4 และมีค่าเท่ากับ $E_i/R = I$ เช่นกัน เนื่องจากโหนดที่ต่อกับขั้วอินพุตลบของออปแอมป์ U2 เปรียบเสมือนกราวด์ และที่ขั้วแอนโหนดของ D_2 มีค่าแรงดันเท่ากับ $-E_i$ ทำให้มีกระแสไหลออกจากโหนดที่ต่อกับอินพุตลบของออปแอมป์ U2 ผ่าน R_3 ไปยัง D_2 กระแสนี้มีค่าเท่ากับ $E/(R/2) = 2E/R = 2I$

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่ว่าที่โหนดใดๆ จะต้องมีกระแสไหลเข้า และกระแสไหลออกเท่ากัน จึงต้องมีกระแสไหลเข้าโหนดที่ต่อกับขั้วอินพุตออปแอมป์ U2 ผ่าน R_5 เท่ากับ I ดังนั้นเอาพุตออปแอมป์ U2 จะมีแรงดันเท่ากับ $IR = +E_i$ ซึ่งเท่ากับแรงดันอินพุต

เมื่ออินพุตมีแรงดัน $(-E_i)$ น้อยกว่าขั้วอินพุตบวกของออปแอมป์ จะทำให้มีกระแสไหลจากเอาต์พุตออปแอมป์ U1 ผ่าน D_1 , R_1 ไปยังอินพุต $(-E_i)$ มีค่าเท่ากับ $E_i/R = I$ และกระแสอีกส่วนหนึ่งจะไหลจากโหนดที่ต่อกับขั้วอินพุตลบของออปแอมป์ U2 ผ่าน R_4 ไปยังแหล่งจ่ายอินพุต $(-E_i)$ มีค่าเท่ากับ $E_i/R = I$ เนื่องจากกระแสไม่ไหลผ่าน R_2 ทำให้โหนดที่ต่อกับแอนโหนดของไดโอด D_2 มีค่าเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลผ่าน R_3 ด้วย ซึ่งก็จะทำให้ต้องมีกระแสไหลผ่าน R_5 ค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน R_4 ซึ่งเท่ากับ I ก็จะทำให้ได้เอาต์พุตเท่ากับ E_i ซึ่งมีค่าเป็นบวกอีกเช่นกัน โดยที่ C_1 เป็นตัวเฉลี่ยแรงดันให้มีค่าคงที่

4.1.3 ส่วนวงจรมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt-trigger)

วงจรถ่านี้จะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับแรงดันอ้างอิงซึ่งสามารถปรับค่าได้ และจะเป็นส่วนที่กำหนดความไวของตัวตรวจจับ

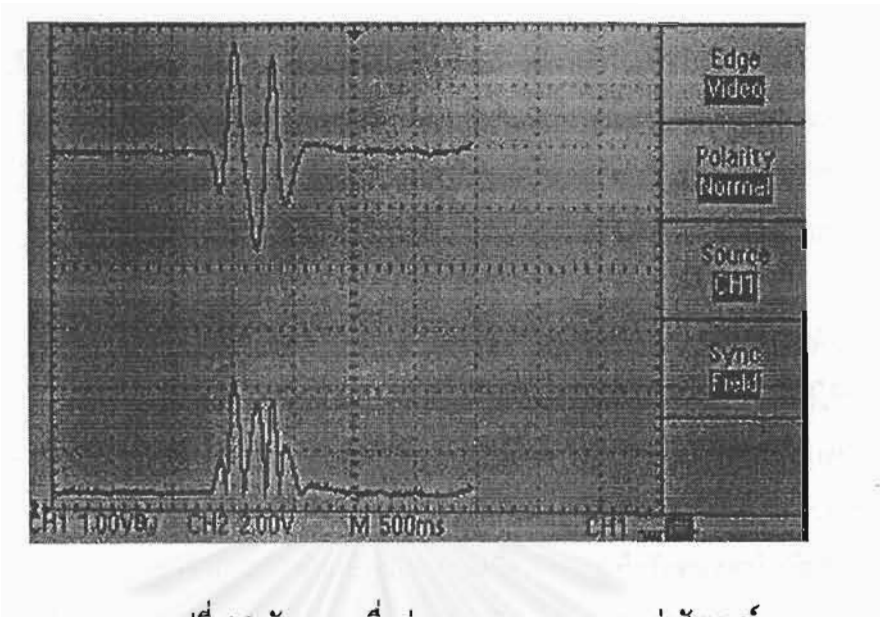
วงจรมิตต์ทริกเกอร์จะใช้วงจรรวม LM339 ซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมาประยุกต์ใช้ แสดงดังรูปที่ 4.9 คุณสมบัติของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณคือ ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตทั้งสอง มีค่าเป็นลบ คือแรงดันที่ขาอินพุตลบสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุตบวก สวิตช์ด้านเอาต์พุตจะปิด ทำให้ขาเอาต์พุตต่อกับกราวด์ แต่ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตทั้งสอง มีค่าเป็นบวก คือแรงดันที่ขาอินพุตบวกสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุตลบ สวิตช์ด้านเอาต์พุตจะเปิด ทำให้ขาเอาต์พุตมีสถานะลอย

จากรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ สมมติให้สถานะเริ่มต้นสวิตช์ด้านเอาต์พุตของตัวออปแอมป์ U5A ปิด ซึ่งจะทำให้เอาต์พุตเท่ากับกราวด์ ดังนั้นถ้าแรงดันที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ U5B มีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุตลบ ทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์ U5B อยู่ในสถานะลอย ส่วนแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ U5C จะเท่ากับกราวด์ เนื่องจากที่ขาอินพุตลบมีแรงดันสูงกว่าที่ขาอินพุตบวก ดังนั้นค่าแรงดันที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ U5A จะถูกแบ่งด้วย R1 และ RUT ซึ่งเป็นตัวที่กำหนดแรงดันอ้างอิงด้านบน (Upper Threshold)

เอาต์พุตของออปแอมป์ U5A จะมีค่าเท่ากับศูนย์จนกว่าแรงดันที่เข้ามาจะมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ U5A ซึ่งจะทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์ U5A เปิด เป็นผลให้แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเท่ากับ Vcc เนื่องจาก R2 ทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์ U5C จะอยู่ในสถานะลอย และเอาต์พุตของออปแอมป์ U5B ต่อกับกราวด์ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง R1 และ RLT ซึ่งเป็นตัวกำหนดแรงดันอ้างอิงด้านล่าง (Lower Threshold)

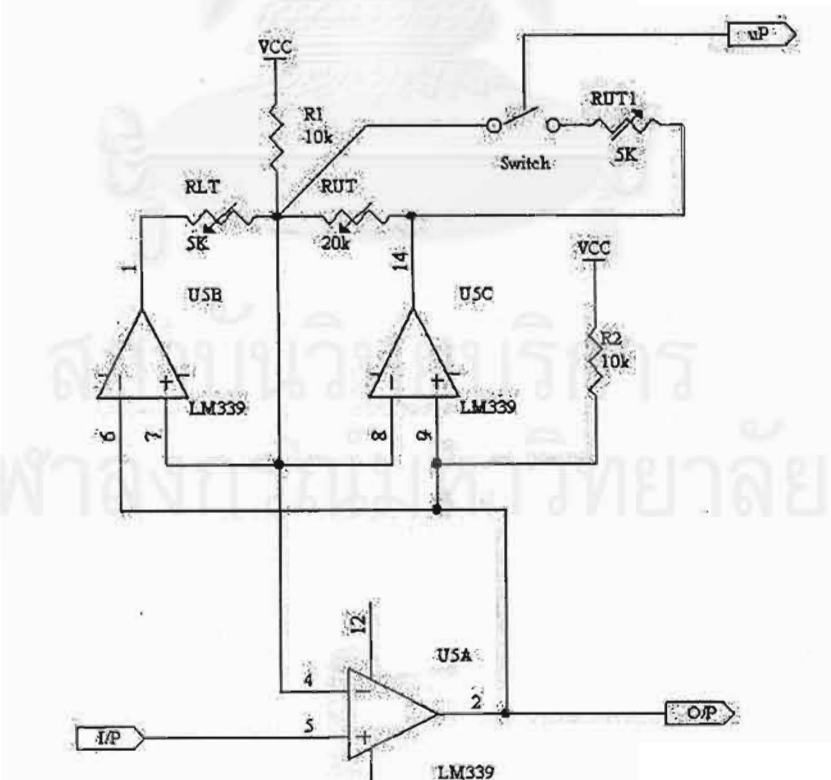
ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถเลือกได้ว่าจะใช้ค่าแรงดันอ้างอิงด้านสูงค่าใด ซึ่งเลือกได้จากการควบคุมผ่านสวิตช์ซึ่งต่ออยู่กับ RUT1 แรงดันอ้างอิงที่ปรับได้โดย RUT จะเป็นตัวกำหนดความไวของตัวตรวจจับ ส่วนแรงดันอ้างอิงด้านสูงอีกชุดหนึ่งปรับได้โดย RUT1 นั้นจะถูกปรับให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิงชุดแรก

สาเหตุที่ต้องใช้ค่าแรงดันอ้างอิงด้านสูง 2 ค่าเนื่องจากในขณะที่รถเริ่มวิ่งเข้ามาในรัศมีของตัวตรวจจับ ช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก ทำให้แรงดันที่ได้จากตัวตรวจจับมีค่าสูง และแรงดันอ้างอิงด้านบนชุดแรกที่ปรับค่าได้โดย RUT จะเป็นตัวกำหนดความไวของวงจร ในขณะที่รถอยู่ในขอบเขตของตัวตรวจจับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต่ำ ดังนั้นถ้ารถวิ่งยาวหรือรถวิ่งช้ามาก ก็จะทำให้แรงดันที่ออกมาจากตัวตรวจจับช่วงนี้มีค่ายิ่งต่ำลงเท่านั้น ดังรูปที่ 4.4 จึงต้องเปลี่ยนมาใช้แรงดันอ้างอิงอีกชุดหนึ่งซึ่งมีระดับแรงดันอ้างอิงที่ต่ำกว่า เพื่อที่จะให้วงจรสามารถตรวจจับสัญญาณที่ต่ำดังกล่าวได้ รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณที่ผ่านวงจรถ่าย



รูปที่ 4.8 สัญญาณเมื่อผ่านวงจรถายและวงจรค่าสัมบูรณ์

และวงจรค่าสัมบูรณ์ สัญญาณรูปบนเป็นสัญญาณที่ผ่านวงจรถายแล้ว และสัญญาณด้านล่างเป็นสัญญาณที่ผ่านวงจรค่าสัมบูรณ์



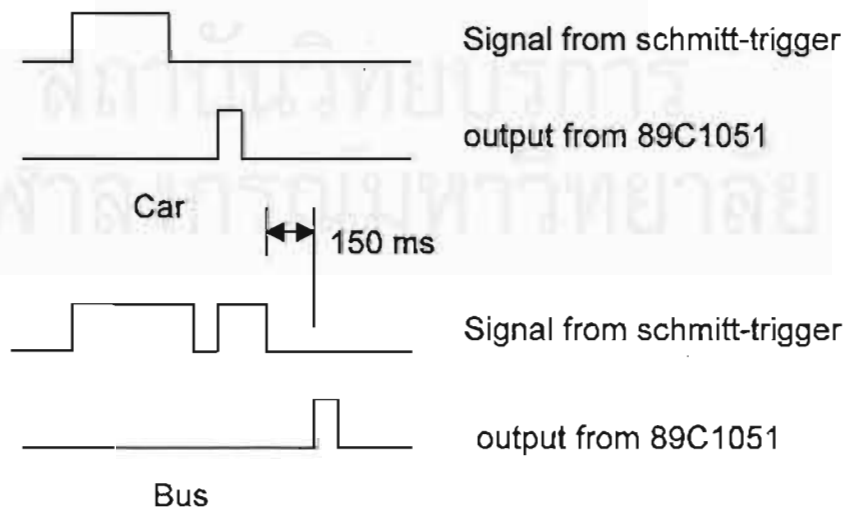
รูปที่ 4.9 วงจรมิตต์ทริกเกอร์

4.1.4 ส่วนวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ในตัวตรวจจับ

ส่วนนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 80C1091 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051 ที่ผลิตโดยบริษัท Atmel ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้มีหน่วยความจำแบบแฟลช ขนาด 1 kbyte เอาไว้สำหรับเก็บส่วนของโปรแกรมตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มี 20 ขา ซึ่งสะดวกในการใช้งานที่ไม่ต้องการพอร์ตสัญญาณเข้า/สัญญาณออก

สำหรับตัวตรวจวัด จะนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการเลือกแรงดันอ้างอิงด้านสูงของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ โดยที่ในขณะที่เริ่มมีรถเข้ามา ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ชมิตต์ทริกเกอร์ใช้ระดับแรงดันอ้างอิงด้านสูงที่ควบคุมค่าได้โดย RUT และหลังจากนั้นจะเปลี่ยนไปใช้ระดับแรงดันอ้างอิงอีกค่าหนึ่งซึ่งควบคุมโดย RUT1 แทนที่ เพื่อให้วงจรสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่น้อย ที่เกิดจากการที่รถวิ่งเข้า

นอกจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ยังทำหน้าที่อีกอย่างหนึ่ง คือวัดความกว้างพัลส์ที่ได้จากวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ คือถ้าสัญญาณจากชมิตต์ทริกเกอร์ขาดหายไปเป็นเวลามากกว่า 150 ms จะถือว่าเกิดการเว้นช่วงของรถหนึ่งคัน และจะส่งพัลส์จำนวน 1 ลูกไปยังเครื่องเก็บข้อมูลการจราจร ค่า 150 ms นี้ได้มาจากการทดลองวัดช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุดของสัญญาณในระหว่างที่รถเคลื่อนเข้ามา ซึ่งเกิดจากการที่รถเคลื่อนมีความยาวกว่ารถคันมาก ดังนั้นในช่วงที่รถเคลื่อนเข้ามาอยู่ในรัศมีของตัวตรวจวัดแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้แรงดันช่วงนี้ตกลง ซึ่งเหมือนกับที่เกิดขึ้นในกรณีของรถคัน (ดังรูปที่ 4.4) แต่เนื่องจากรถเคลื่อนมีความยาวมากกว่า ดังนั้นช่วงเวลานี้จะมีค่ามาก ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่ช่วงเวลาดังกล่าวจะมีค่าน้อยกว่า 150 ms ส่วนในรถคันไม่ค่อยพบการขาดหายไปของสัญญาณก่อนที่รถจะวิ่งออกไป เนื่องจากความยาวรถสั้นกว่ารถเคลื่อน ดังนั้นเวลาที่ตัวไฟโรอิเล็กทรอนิกส์เกิดการสมดุลอุณหภูมิในผิวผลึก รถก็วิ่งออกไปจากรัศมีของตัวตรวจวัดแล้ว จึงไม่เกิดการเว้นช่วงของสัญญาณในระหว่างที่รถเคลื่อนเข้ามา

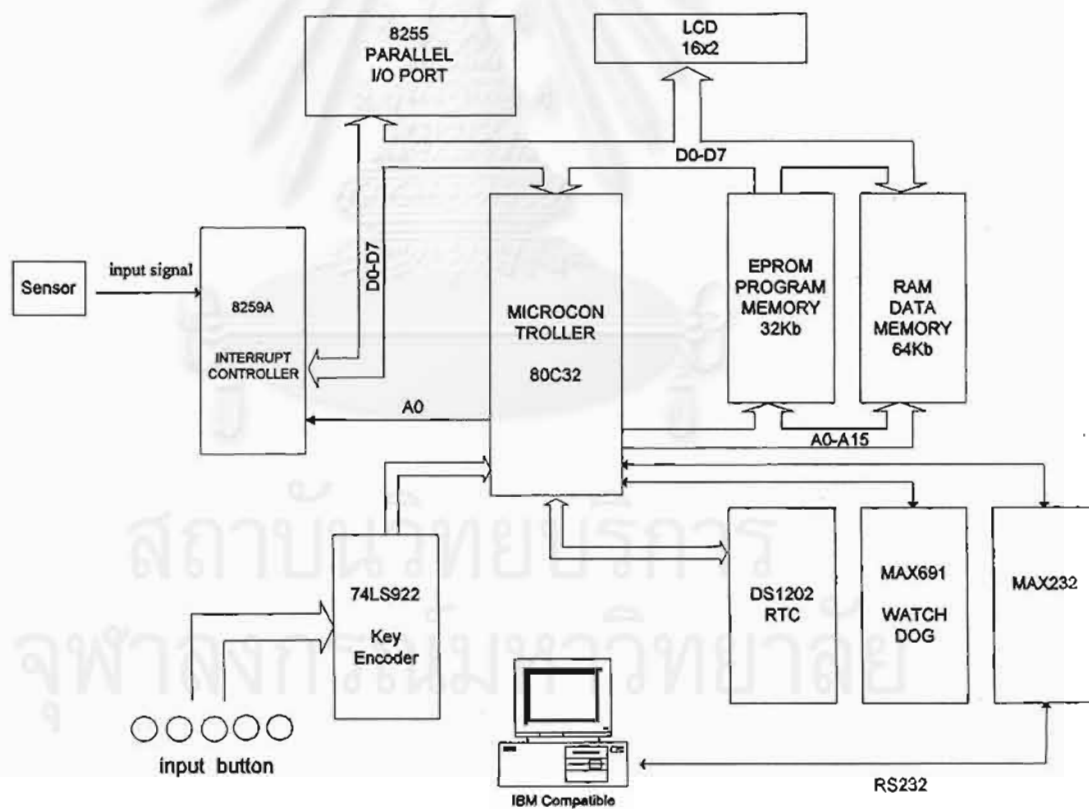


รูปที่ 4.10 สัญญาณแสดงการหน่วงเวลาของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2 ส่วนประกอบของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร

ส่วนประกอบของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจรแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยที่เครื่องนี้จะรับสัญญาณจากตัวตรวจวัดผ่านทางอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์ (interrupt controller) ซึ่งจะเป็นตัวจัดลำดับของสัญญาณที่เข้ามา เมื่อมีสัญญาณเข้ามาพร้อมกันมากกว่าหนึ่งสัญญาณ (สามารถวัดสัญญาณได้พร้อมกันสูงสุด 8 ช่องสัญญาณ) หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะนับสัญญาณที่ได้รับเข้ามาจากตัวตรวจวัดแต่ละช่องสัญญาณ (ในกรณีที่ตัวตรวจวัดมากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณ) แล้วบันทึกค่าที่นับได้ลงในหน่วยความจำ และเมื่อครบทุกๆ 15 นาที เครื่องบันทึกข้อมูลการจราจรจะเก็บค่าสุดท้ายที่นับได้ในช่องสัญญาณแต่ละช่อง ไว้ในหน่วยความจำซึ่งมีแบตเตอรี่สำรองข้อมูล (battery backup) เพื่อกันข้อมูลสูญหาย หลังจากนั้นเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจรจะเคลียร์ค่าและเริ่มต้นนับสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณใหม่อีกครั้งหนึ่ง

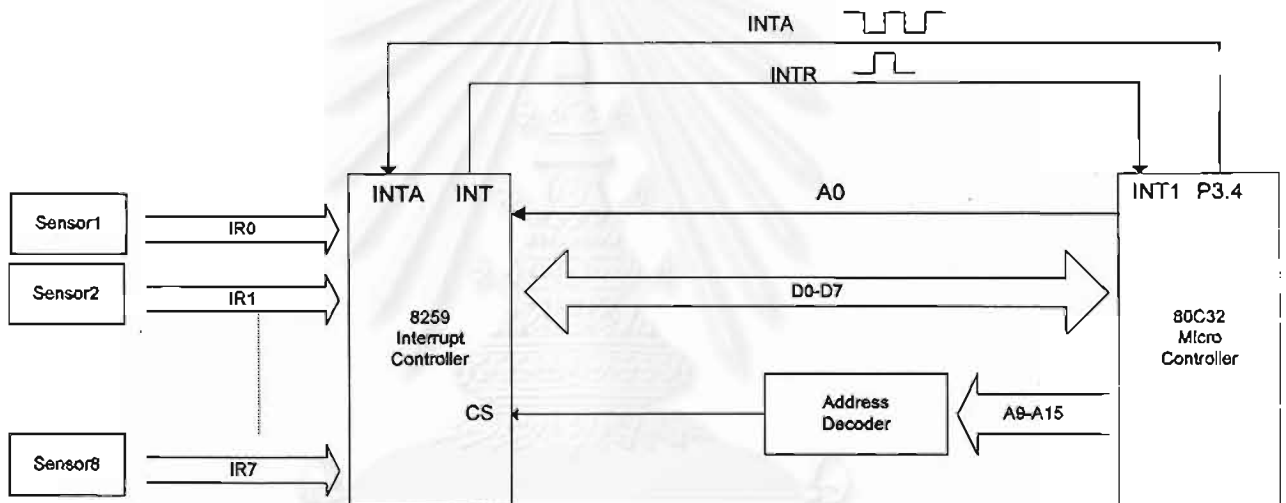
เครื่องบันทึกข้อมูลการจราจรจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทลาร์เสิร์ชรุ่น ANT32 ส่วนหนึ่ง และได้เพิ่มส่วนของอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์และคีย์บอร์ดอินเตอร์เฟซเข้าไป สุดท้ายจะได้วงจรที่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร

4.2.1 ส่วนวงจรอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์ (Interrupt Controller)

ส่วนวงจรอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง ของเครื่องบันทึกมัลติการจากร เนื่องจากเป็นส่วนที่จะคอยจัดการกับสัญญาณที่ได้รับจากตัวตรวจวัด โดยจะทำหน้าที่จัดลำดับสัญญาณที่ได้รับ จากตัวตรวจวัดแต่ละช่องสัญญาณ เมื่อมีสัญญาณเข้ามาพร้อมกันมากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณ และส่งต่อไปให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของส่วนวงจรอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์แสดงดังรูป ที่ 4.12

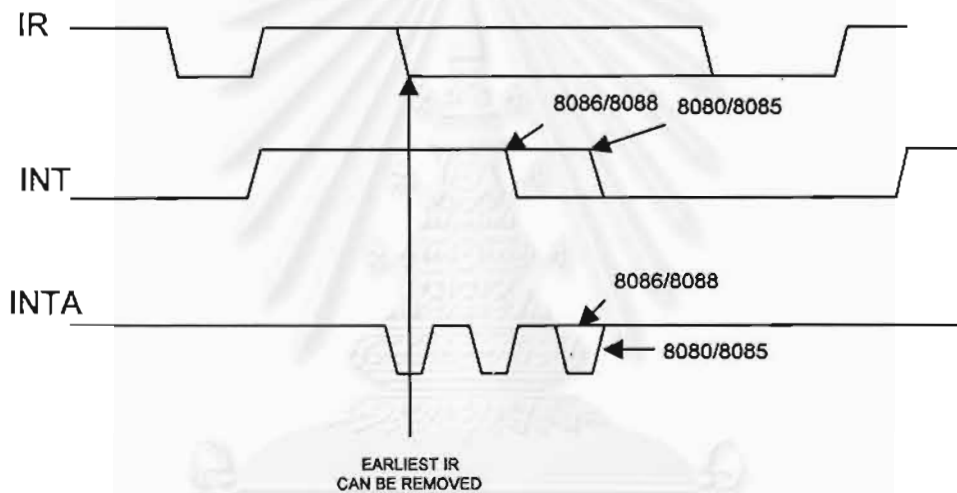


รูปที่ 4.12 บล็อกไดอะแกรมส่วนของอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์

ส่วนของวงจรอินเทอร์รัปต์สามารถจะรับสัญญาณจากตัวตรวจวัด (Sensor) ได้พร้อมกันสูงสุด 8 ช่องสัญญาณ สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรรวม 8259 หลังจากนั้นวงจรรวม 8259 จะเปรียบเทียบลำดับความสำคัญของสัญญาณจากช่องสัญญาณแต่ละช่อง(ถ้ามีสัญญาณเข้ามาพร้อมกันมากกว่า หนึ่งสัญญาณ) และจะตอบสนองต่อช่องสัญญาณที่มีความสำคัญสูงที่สุดก่อน โดยการส่งสัญญาณการขอการ เกิดอินเทอร์รัปต์ (INTR) ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณ INTR แล้วก็จะ ส่งสัญญาณตอบรับ INTA กลับไปยังวงจรรวม 8259 จำนวน 2 ลูกโดยที่พัลส์ลูกแรกจะเป็นการสั่งให้วงจรรวม 8259 เซ็ตบิต ISR (interrupt service register) และรีเซ็ตบิต IRR (interrupt request register) ของช่อง สัญญาณที่กำลังตอบสนองอยู่ เช่นถ้ากำลังตอบสนองต่อช่องสัญญาณที่ 4 บิต ISR4 จะถูกเซ็ต และ บิต IRR4

จะถูกรีเซ็ต จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งพัลส์ลูกที่สองออกไปที่วงจรรวม 8259 เพื่อบอกให้ส่งค่าของช่องสัญญาณที่กำลังตอบสนองอยู่ ออกมาบนบัสข้อมูล

เนื่องจากว่าวงจรรวม 8259 เป็นวงจรรวมที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล 8088 ไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูลนี้ จะมีขา INTA (Interrupt acknowledge) ซึ่งถูกออกแบบมาให้ต่อกับอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์โดยเฉพาะ เมื่อเกิดอินเทอร์รัปต์ขึ้นมาไมโครคอนโทรลเลอร์ 8088 จะส่งพัลส์INTA (interrupt acknowledge) ไปเองอย่างอัตโนมัติดังรูปที่ 4.13 โดยที่เราไม่ต้องเขียนโปรแกรมจัดการ แต่เนื่องจากเราใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C32 ซึ่งไม่มีขา INTA ดังนั้นเราจำเป็นต้องส่งสัญญาณ INTA (interrupt acknowledge) ไปที่วงจรรวม 8259 เอง



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของลำดับสัญญาณในการติดต่อกับอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์

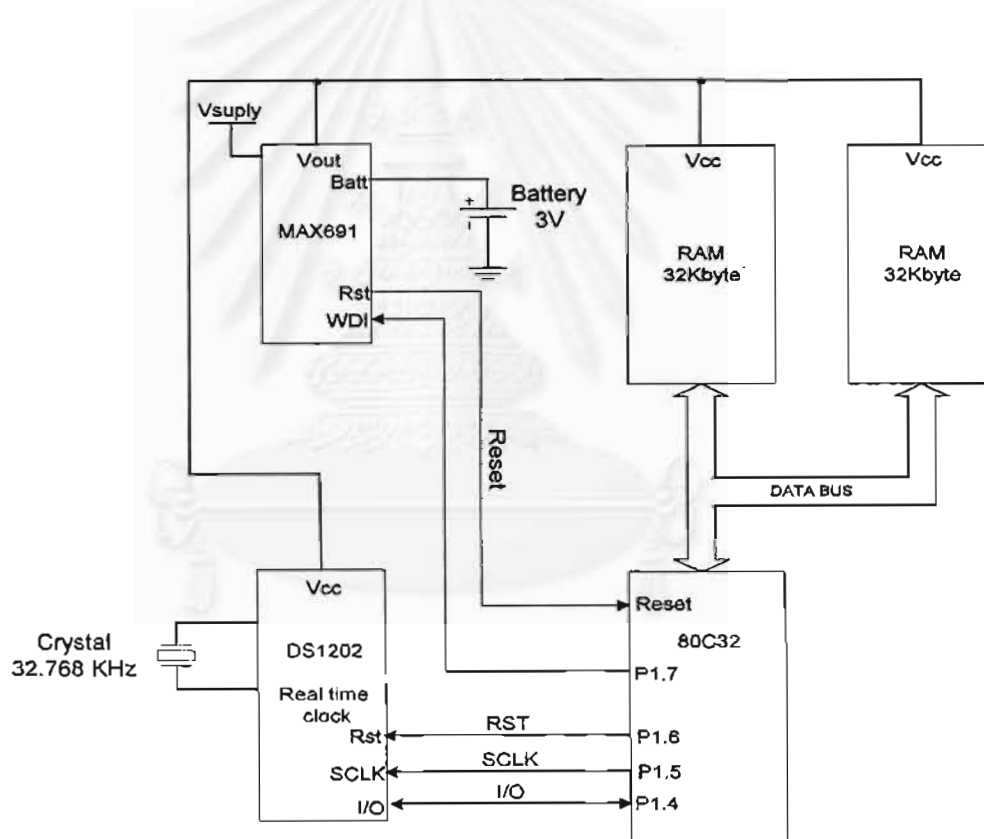
4.2.2 ส่วนวงจรสัญญาณนาฬิกา (Real Time Clock) และสำรองข้อมูล (Backup)

ส่วนวงจรสัญญาณนาฬิกา เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง เนื่องจากเป็นตัวสร้างฐานเวลาให้กับเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร ซึ่งส่วนนี้จะมียูนิทบนบอร์ด ANT32 อยู่แล้ว วงจรส่วนนี้ใช้วงจรรวม DS1202 เป็นตัวสร้างฐานเวลา ซึ่งสามารถตั้งค่าเวลาหรืออ่านค่าเวลาออกมาได้เป็นวินาที นาที ชั่วโมง วันและปี นอกจากนี้วงจรรวมเบอร์ DS1202 ยังเป็นตัวสร้างฐานเวลาที่ให้ข้อมูลแบบอนุกรมจึงทำให้ประหยัดพอร์ตสัญญาณเข้า/ออก โดยที่สามารถ อ่าน เขียน ข้อมูลผ่านสายข้อมูลเพียง 3 เส้นเท่านั้น วงจรรวม DS1202 ใช้คริสตอล 32.768 kHz เป็นตัวสร้างฐานเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.14

และเพื่อป้องกันไม่ให้เวลาหยุดเดินและข้อมูลที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำสูญหาย จึงต้องมีส่วนที่จะคอยสำรองข้อมูล โดยใช้วงจรรวมเบอร์ MAX691 ซึ่งสามารถตรวจจับแรงดันไฟที่ป้อนให้กับวงจร ในกรณีที่แรง

ดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่วงจรมีค่าปกติ ค่า V_{out} ของวงจรรวม MAX691 จะถูกต่อเข้ากับ V_{supply} และจะถูกป้อนไปเข้าหน่วยความจำแรม (RAM) และวงจรรวม DS1202 ถ้าหากว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขาดหายไป ค่า V_{out} ของวงจรรวม MAX691 จะลลิตซ์ไปต่อกับเบตเตอรีขนาด 3 โวลต์ ซึ่งจะถูกจ่ายไปเลี้ยงหน่วยความจำเพื่อป้องกันข้อมูลสูญหาย ในขณะเดียวกันแรงดัน 3 โวลต์นี้ก็ถูกป้อนไปให้ส่วนวงจรสร้างฐานเวลาด้วย เพื่อไม่ให้เวลาหยุดเดิน

นอกจากจะเป็นตัวที่ช่วยในการสำรองข้อมูลแล้ว วงจรรวม MAX691 ยังทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันการแฮง (Hang) ของโปรแกรมด้วย (ทำหน้าที่ Watch Dog) โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องคอยส่งสัญญาณพัลส์มายังขา WDI ของวงจรรวม MAX691 ทุกๆ 1.6 วินาที ถ้าสัญญาณที่ส่งไปให้วงจรรวม MAX691 หายไปเกิน 1.6 วินาที วงจรรวม MAX691 จะทำการรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมส่วนวงจรสร้างฐานเวลาและสำรองข้อมูล

บทที่ 5

ส่วนประกอบทางด้านซอฟต์แวร์

5.1 ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในเครื่องตรวจจับ

ซอฟต์แวร์ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ

- 1.) ควบคุมแรงดันอ้างอิงด้านสูงของชมิตต์ทริกเกอร์ โดยการสั่งให้สวิตช์ที่เป็นตัวเลือกแรงดันอ้างอิงปิดหรือเปิด โดยที่ถ้าบ่อนแรงดัน 5 โวลต์ไปที่สวิตช์จะทำให้สวิตช์ปิด เป็นการเลือกระดับแรงดันอ้างอิงที่ควบคุมค่าโดย RUT1 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และถ้าบ่อนแรงดัน 0 โวลต์ไปที่สวิตช์ จะทำให้สวิตช์เปิด ซึ่งจะเป็นการเลือกแรงดันอ้างอิงที่ควบคุมค่าโดย RUT
- 2.) วัดช่วงเวลาที่แรงดันขาดหายไป ถ้าแรงดันขาดหายไปเกินกว่า 150 ms โปรแกรมซอฟต์แวร์จะส่งพัลส์พัลส์จำนวน 1 ลูก ไปยังเครื่องเก็บข้อมูลการจราจรดังรูปที่ 4.10

โปรแกรมซอฟต์แวร์สามารถเขียนเป็นโมดูลได้ดังนี้

Module Sensor

Open Switch_control schmit_trigger

Do While(1)

Begin

While (Signal Off)

Stay Here

if (Signal On) then

Close Switch_control schmit_trigger

While (signal off < 150 ms)

Stay Here

Output = 1

OutPut = 0

Open Switch_control schmit_trigger

End if

End Do

End Module

โมดูลเซ็นเซอร์แสดงการทำงานของซอฟต์แวร์ อธิบายได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะสั่งให้สวิตช์ที่ควบคุมแรงดันอ้างอิงของซีมิคัตทริกเกอร์เปิด ซึ่งเป็นการเลือกระดับแรงดันอ้างอิงที่ควบคุมแรงดันอ้างอิงโดย RUT หลังจากนั้นจะรอสัญญาณจากซีมิคัตทริกเกอร์ เมื่อมีร็ววิ่งผ่านเข้ามาในรัศมีของการตรวจจับ จะทำให้มีสัญญาณเข้ามาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สวิตช์ปิด ซึ่งเป็นการเลือก ระดับแรงดันอ้างอิงที่ควบคุมโดย RUT1 หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะคอยตรวจสอบว่าสัญญาณจาก ซีมิคัตทริกเกอร์ขาดหายไปในช่วงเวลาที่มากกว่า 150 ms หรือไม่ ถ้าสัญญาณขาดหายไปนานมากกว่า 150 ms ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งพัลส์จำนวน 1 ลูกไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นโปรแกรมจะกลับมารอ สัญญาณอินพุตอีกครั้ง ดังรูปที่ 4.10

5.2 ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในเครื่องบันทึกข้อมูล

ในส่วนซอฟต์แวร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบไว้ จะมีโมดการทำงาน 2 โมดคือ

1. โมดของการเก็บข้อมูล คือไมโครคอนโทรลเลอร์จะคอยสัญญาณจากตัวตรวจวัดซึ่งต่ออยู่กับขา INT1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้ามีสัญญาณจากตัวตรวจวัดเข้ามาจะทำให้เกิดการอินเทอร์รัปต์ขึ้นที่ขา INT1 หลังจากนั้นโปรแกรมก็อ่านค่าช่องสัญญาณที่มีสัญญาณจากตัวตรวจวัดเข้ามาเพิ่มค่าจำนวนรถในช่องสัญญาณ นั้นๆ และเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำแรม หลังจากนั้นจะกลับไปรอรับสัญญาณจากตัวตรวจวัดอีกครั้ง และเมื่อครบทุกๆ 15 นาที ก็จะบันทึกข้อมูลที่นับได้ในแต่ละช่องสัญญาณลงในหน่วยความจำแรม โดยจะบันทึกค่าเวลา เริ่มต้นของการนับไว้ด้วย หลังจากนั้นก็จะกลับไปเริ่มต้นนับใหม่ในช่วงเวลาถัดไป

2. โมดเมนู ทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้ โดยการกดปุ่มบนเครื่องบันทึกข้อมูล และเมื่อมีการกดปุ่มใด ปุ่มหนึ่งบนเครื่องบันทึกข้อมูล ก็จะทำให้เกิดอินเทอร์รัปต์ INTO ขึ้น โปรแกรมจะอ่านค่าคีย์ที่กดและทำตามคำสั่งของคีย์ดังกล่าว ซึ่งจะมี 5 คำสั่งซึ่งแยกเป็น 5 ปุ่มอินพุต คือ คำสั่งเริ่มนับรถ, คำสั่งเปิดปิดจอ LCD , คำสั่งเซตเวลา , คำสั่งเข้าสู่โหมดเมนูการรับคำสั่งผ่านทางช่องสัญญาณ RS232 และคำสั่งให้แสดงค่าจำนวนรถ ที่นับรถได้ในขณะนั้นออกทางจอ LCD

ซอฟต์แวร์ที่ใช้จะแบ่งเป็นโมดูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 โมดูลสำหรับการเริ่มต้น (Initialize)

โมดูลนี้จะทำหน้าที่ตั้งค่าเริ่มต้นต่างๆ สำหรับส่วนของอินเทอร์รัปต์คอนโทรลเลอร์ , ส่วนของการติดต่อแบบอนุกรม , ส่วนของการจับเวลา และส่วนของอินเทอร์รัปต์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

```
Module Initialize
```

```
    Setup Timer
```

```
    Setup Interrupt Controller
```

```
    Setup Serial System
```

```
    Call Micro_Int
```

```
End Module
```

5.2.2 โมดูลส่วนการกำหนดการเกิดอินเทอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์

โปรแกรมในส่วนนี้จะทำหน้าที่เรียกใช้ Module ต่างๆ เมื่อมีการอินเทอร์รัปต์ขึ้น โดยที่เมื่อใดก็ตามที่เกิดอินเทอร์รัปต์ INTO ให้ไปทํายังโมดูลที่คอยรับค่าปุ่มบนเครื่องบันทึกข้อมูล ถ้าเกิดอินเทอร์รัปต์ INT1 ให้ไปทํายังโมดูลการรับข้อมูลจากตัวตรวจวัด และถ้าเกิดอินเทอร์รัปต์ Timer 0 ให้ไปทํายังโมดูลสำหรับการจับเวลาการบันทึกข้อมูล

```
Module Micro_Int
```

```
    If ( INT 0 ) Then
```

```
        Call Module Menu_button_input
```

```
    If (INT 1 ) Then
```

```
        Call Module Signal_IN
```

```
    If (Timer 0 ) Then
```

```
        Call Mudule Timer
```

```
End Mudule
```

5.2.3 โมดูลสำหรับการกดปุ่มบนเครื่องบันทึกข้อมูล

โมดูลนี้จะทำหน้าที่รับค่าคีย์ที่ถูกกดและทำตามคำสั่งย่อยตามปุ่มที่กด ซึ่งมีอยู่ 5 คำสั่ง แยกเป็นปุ่มอินพุต 5 ปุ่ม คือ คำสั่งเริ่มนับรถ คำสั่งเปิดปิดจอ LCD คำสั่งเซตเวลา คำสั่งเข้าสู่โหมดเมนูการรับคำสั่งผ่านทางช่องสัญญาณ RS232 และคำสั่งแสดงจำนวนรถที่นับได้ในขณะนั้น

Module Menu_button_input

```

Read ( KeyPress )
Select case KeyPress
    Case Keypress = 1
        Settime
    Case Keypress = 2
        Store first date
        Store first time
        Start Count
    Case KeyPress = 3
        On/Off LCD
    Case Keypress = 4
        Call Menu_RS_232
    Cae Keypress = 5
        Show Channel

```

End Module

5.2.4 โมดูลเมนูที่รับคำสั่งผ่านทาง RS232

โมดูลนี้จะรับคำสั่งผ่านทาง RS232 ซึ่งจะมีอยู่ 6 เมนูย่อยคือ คือคำสั่งตั้งเวลา คำสั่งตั้งวันที่ คำสั่งโหลดข้อมูล คำสั่งลบข้อมูล คำสั่งป้อนรายละเอียดสถานที่ คำสั่งป้อนรายละเอียดของช่องสัญญาณ

Mudule Menu_RS232

```

Print (" d      -Set Date")
Print (" t      -Set Time")
Print (" c      -Set Channel Direction ")
Print (" o      -Set Location ")
Print (" s      -Clear Ram")
Print (" l      -Download Data")
Print (" q      -Quit Menu Mode")

```



```

Select case KeyIn
    Case KeyIn = d
        Set Date
    Case KeyIn = t
        Set Time
    Case KeyIn = c
        Set Channel Direction
    Case KeyIn = o
        Set Location
    Case KeyIn = s
        Clear Data
    Case KeyIn = l
        Download Data
    Case KeyIn = q
        Quit Menu
End Select
End Module

```

5.2.5 โมดูลสำหรับการรับข้อมูลจากตัวตรวจวัด

โมดูลนี้จะทำหน้าที่ติดต่อกับอินเทอร์เฟซคอนโทรลเลอร์ เพื่ออ่านค่าช่องสัญญาณ และเมื่อมีสัญญาณเข้าจะทำการเพิ่มค่าข้อมูลจำนวนรถที่นับได้ในช่องสัญญาณนั้นๆ ซึ่ง Data1 จะเป็นอาร์เรย์(array)ของการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราว ของในแต่ละช่องสัญญาณ

```

Module Signal_IN
    Read ( Channel )
    Data1[ Channel ] = Data1 [Channel] +1
    Call Module Store_Data
End Module

```

5.2.6 โมดูลสำหรับการเก็บข้อมูลในหน่วยความจำแรม (RAM)

โมดูลนี้จะทำหน้าที่เก็บข้อมูลของรถที่นับได้ในแต่ละช่องสัญญาณ ลงในหน่วยความจำแรม ในการเก็บข้อมูลจะเก็บค่าทั้งหมด 3 อย่าง คือ

1. จำนวนรถในช่องสัญญาณแต่ละช่อง ซึ่งในที่นี้สามารถวัดได้สูงสุด 8 ช่องสัญญาณ และแต่ละช่องสามารถเก็บค่าได้สูงสุด 65,536 ค่า
2. เวลาในขณะที่รถวิ่งผ่าน ซึ่งจะเก็บค่าเวลาที่ทำการนับทุกๆ 15 นาที โดยจะเก็บในรูปของดัชนี(Index) โดยที่ $\text{Time_Index} = (\text{Hr} \times 4) + (\text{Min} / 15)$ ซึ่ง Hr เป็นค่าของชั่วโมง มีค่าตั้งแต่ 0-23 และ Min จะเป็นค่าของนาฬิกา มีค่าตั้งแต่ 0-59 เช่นที่เวลา 12:37 จะได้ค่าดัชนีเวลา เท่ากับ 50 ดังนั้นดัชนีเวลาจะมีค่าเท่ากับ 0 ที่เวลาเที่ยงคืนตรง และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 95 ที่เวลา 23.59
3. จำนวนวัน ที่ทำการนับ สามารถเก็บได้สูงสุดคือ 31 วัน โดยจะเก็บเป็นวันที่ ที่นับหลังจากวันที่เริ่มต้น เช่น ถ้าเริ่มนับวันที่ 24 ดังนั้น วันที่ 26 จะได้ $\text{date_index} = 2$ โดยจะมีส่วนที่คอยตรวจสอบวันสุดท้ายของเดือน เพื่อไม่ให้เกิดการคำนวณค่าที่ผิดพลาดของ date_index

ข้อมูลที่ต้องเก็บทั้งหมดนี้ จะจองหน่วยความจำในรูปของอาร์เรย์แบบ 3 มิติ คือ

$\text{DATA}[\text{Date_index}][\text{Time_index}][\text{channel}]$ ซึ่งเวลาที่ต้องการอ้างอิงถึงข้อมูลก็สามารถอ้างอิงได้ดังนี้ เช่น ต้องการดูข้อมูลของช่องสัญญาณที่ 5 ในวันที่ 4 นับจากวันที่เริ่มนับ ในช่วงเวลา 12.45-13.00 จะต้องอ้างอิง $\text{DATA}[4][51][5]$

Module Store_Data

Read Time

Calculate Time_Index

Read Date

Calculate Date_index

$\text{DATA}[\text{date_index}][\text{Time_index}][\text{Channel}] = \text{Data1}[\text{Channel}]$

End Module

5.2.7 โมดูลสำหรับส่วนจับเวลาการบันทึกข้อมูล

โมดูลในส่วนนี้จะทำหน้าที่คอยจับเวลา 15 นาที เมื่อครบทุกๆ 15 นาที ก็จะทำการบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำแรม (RAM) หลังจากนั้นจะเคลียร์ค่าตัวแปรชั่วคราว Data1 เพื่อเริ่มนับใหม่

Module Timer

```

Read (Time)
If (Time_Count >= 15 min) Then
    Call Module Store_Data
For I=1 To 8
    Data1[I] = 0

```

End Module

5.2.8 โมดูลของส่วนโปรแกรมหลัก

โมดูลส่วนนี้จะเป็นโปรแกรมหลักที่ทำหน้าที่เรียกโมดูลสำหรับการเริ่มต้น (Initialize) เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรม แล้วหลังจากนั้นก็ไปรอการเกิดอินเทอร์รัปต์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่ว่าเมื่อมีอินเทอร์รัปต์เข้ามาก็จะกระโดดไปทำตามโมดูลนั้นๆ

Module Main

```

Call Initial
Call Module Micro_Int
While (1)
    Stay Here

```

End Module

5.3 รูปแบบข้อมูลที่ทำกรส่งไปยัง PC คอมพิวเตอร์

สำหรับชุดข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำแรม (RAM) ที่ต้องส่งไปยังเครื่อง PC คอมพิวเตอร์เพื่อให้โปรแกรมในส่วนแสดงผลข้อมูล นำข้อมูลที่ได้นำไปแสดงผลต่อไป โดยข้อมูลที่ส่งไปยัง PC คอมพิวเตอร์จะส่งในรูปแบบของแฟ้มข้อความ (text file) ซึ่งจะเว้นวรรคข้อความด้วย Tab มีรูปแบบตัวอย่างดังนี้

Location : Bangna-Trad

Count Date : 23:45 1/1/98

TO : 00:48 2/1/98

Direction		IB1	IB2	IB3	IB4	-	-	-	-
Date	Time	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
1/1/98	23:45	12	14	10	11	0	0	0	0
2/1/98	00:00	32	23	12	20	0	0	0	0
	00:15	12	21	9	12	0	0	0	0
	00:30	11	27	21	11	0	0	0	0
	00:45	14	17	22	14	0	0	0	0
	00:48	2	4	1	6	0	0	0	0

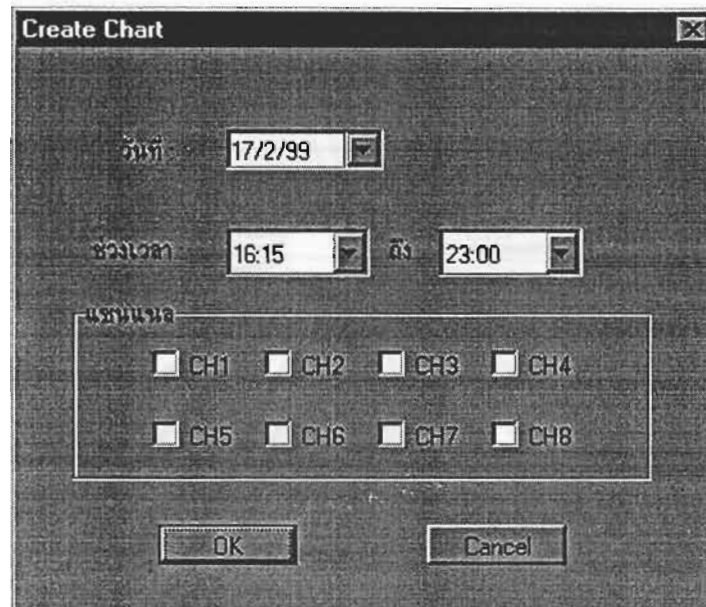
ชุดข้อมูลดังกล่าว จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ PC เพื่อใช้โปรแกรมแสดงผลข้อมูล

5.4 ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการแสดงข้อมูลและพิมพ์รายงานบนเครื่อง PC

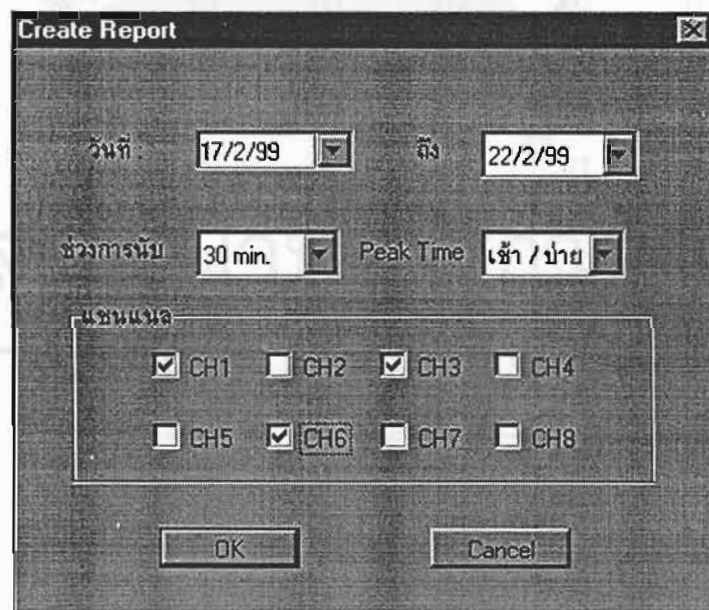
ซอฟต์แวร์ในส่วนนี้จะทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลและพิมพ์รายงานผลการบันทึกสภาพการจราจร ซอฟต์แวร์ส่วนนี้เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Basic ซึ่งมีข้อดีคือผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่าย คุณสมบัติของซอฟต์แวร์ส่วนนี้มีดังนี้

1. สามารถนำข้อมูลการจราจรที่บันทึกไว้ในรูปแบบของแฟ้มข้อความ (Text file) เข้ามาในแผ่นงาน
2. เมื่อนำข้อมูลจากแฟ้มข้อความ (Text file) เข้ามายังแผ่นงานเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้สามารถเลือกที่จะสร้างรายงาน หรือแผนภูมิ (Chart) ผ่านทางไดอะล็อกที่กำหนดให้
3. ไดอะล็อกสำหรับสร้างแผนภูมิ ใช้กำหนดรูปแบบของแผนภูมิ ที่จะสร้าง โดยมีตัวเลือกต่างๆ ดังนี้
 - เลือกวันที่ซึ่งต้องการสร้างแผนภูมิ (Chart) ได้จาก list box วันที่
 - เลือกช่วงเวลาที่ต้องการสร้างแผนภูมิ (Chart) จาก list box ช่วงเวลา
 - เลือกช่องการจราจรที่ต้องการแสดง จาก check box แชนแนล
4. ไดอะล็อกสำหรับพิมพ์รายงาน ใช้กำหนดรูปแบบของรายงานที่จะพิมพ์ โดยมีตัวเลือกต่างๆ ดังนี้
 - เลือกช่วงของวันที่ต้องการสร้างรายงานจาก list box วันที่
 - เลือกช่วงการรายงานผลได้ 4 แบบ คือ 15 นาที, 30 นาที, 1 ชม. และ 1 วัน จาก list box ช่วงการนับ

- เลือกวิธีการแสดงค่าของ Peak time ได้ 2 แบบ คือ แบบ ทั้งวัน หรือ แบบเช้า/บ่าย จาก list box
- เลือกช่องการจราจรที่ต้องการสร้างรายงานจาก check box



รูปที่ 5.1 ไดอะล็อก สำหรับสร้างแผนภูมิ



รูปที่ 5.2 ไดอะล็อก สำหรับการสร้างและพิมพ์รายงาน

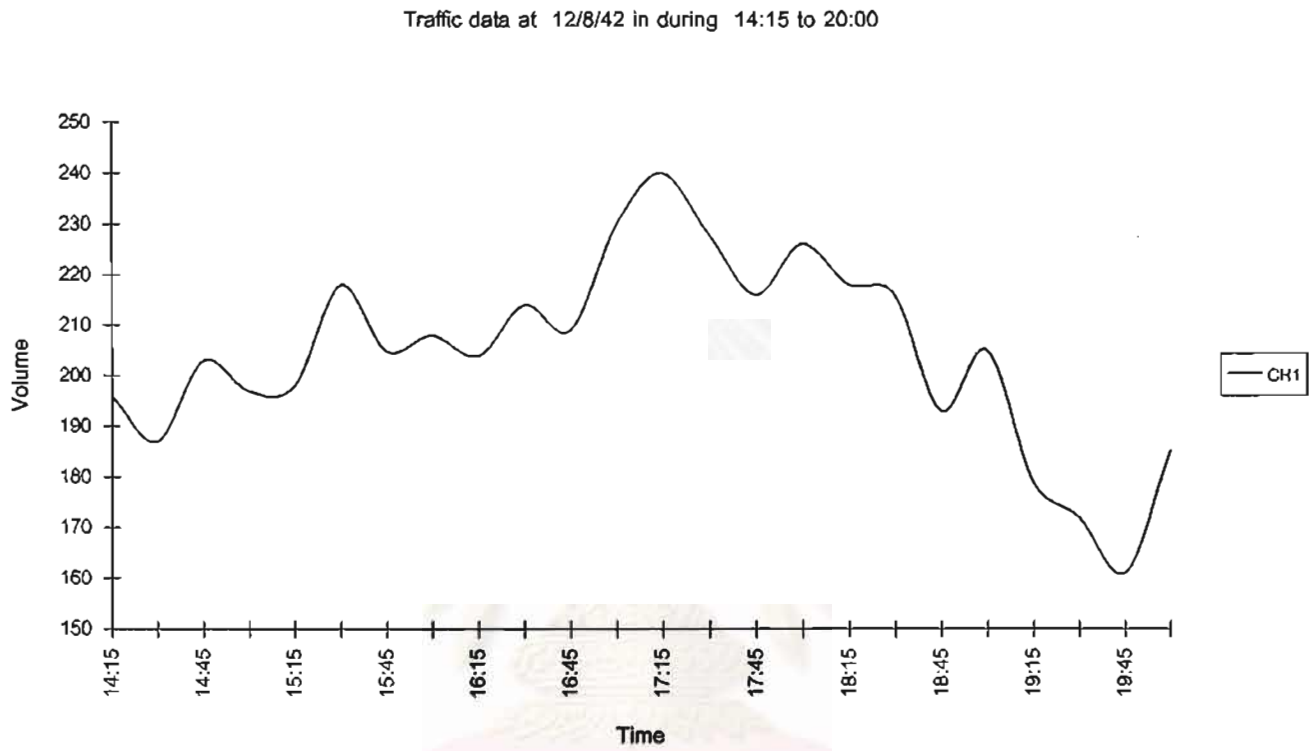
Traffic Volume Report

Location : Bangna-Trad

Count interval :30 minute

Direction		IN	IN	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
Date	Time	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
17/2/99	14:09	0	0	0	0	0	0	0	0
	14:30	383	383	257	312	326	289	292	314
	15:00	400	387	272	310	341	296	312	327
	15:30	416	405	281	329	352	316	342	339
	16:00	413	406	300	342	341	327	362	349
	16:30	418	410	321	351	356	339	348	331
	17:00	439	433	337	341	359	349	353	347
	17:30	468	460	332	357	361	343	361	353
	18:00	442	434	346	332	341	341	372	357
	18:30	434	431	331	312	327	338	341	312
	19:00	398	391	289	332	340	311	316	302
	19:30	351	349	292	317	331	303	281	287
	20:00	346	340	295	325	322	286	292	291
	ADT	4908	4829	3653	3960	4097	3738	3972	3909
	Peak Vol.	468	460	346	357	361	349	372	357
	Peak Time	17:30	17:30	18:00	17:30	17:30	17:00	18:00	18:00

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างของรายงานที่สร้างจากโปรแกรมส่วนแสดงผล



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างแผนภูมิที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมส่วนแสดงผล

บทที่ 6



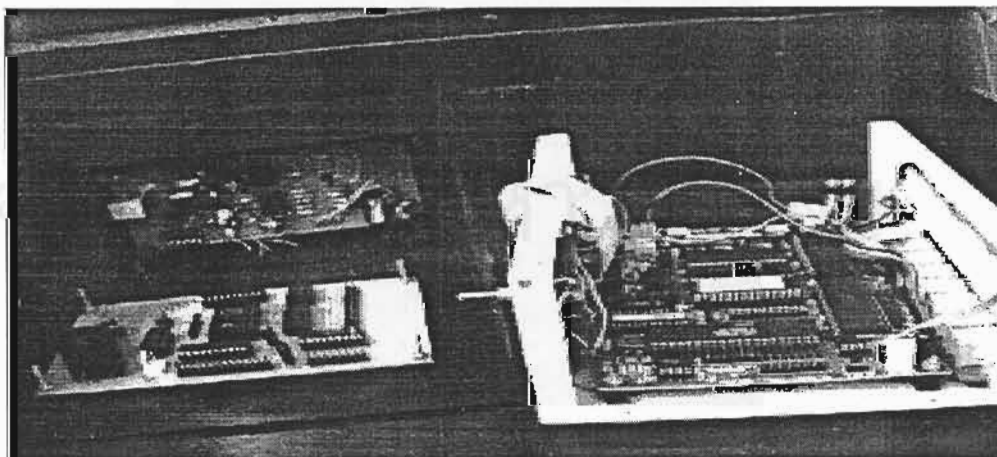
ผลการทดสอบ

6.1 การทดสอบการทำงาน

เมื่อออกแบบส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดปริมาณการจราจรเสร็จแล้วจะได้รูปร่างของเครื่องตรวจวัดและเครื่องบันทึกข้อมูลดังรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 รูปร่างภายนอกของเครื่องวัดปริมาณการจราจร



รูปที่ 6.2 ส่วนประกอบภายในของเครื่องตรวจวัดการจราจร

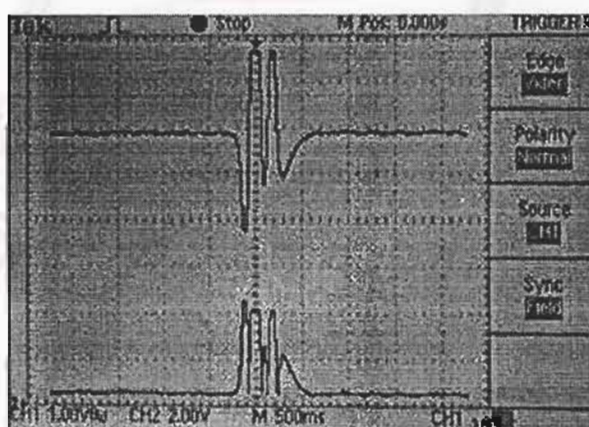
6.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร ผู้วิจัยได้ป้อนสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square wave) จากเครื่องกำเนิดรูปคลื่น (Function Generator) ซึ่งกำหนดให้ความถี่ที่ป้อนให้แก่เครื่องบันทึกข้อมูลเท่ากับ 10 Hz ป้อนสัญญาณพร้อมกันทั้ง 4 ช่องสัญญาณ และให้ตัวบันทึกข้อมูลเก็บข้อมูลนานทั้งวันทั้งคืนเป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นนำข้อมูลออกมาดูว่าได้ค่าที่ถูกต้องหรือไม่ นอกจากนั้นยังทดสอบการสำรองข้อมูลในหน่วยความจำแรม(RAM) ด้วย โดยการตัดแหล่งจ่ายกำลังของเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร เป็นเวลานาน 1 สัปดาห์ แล้วนำข้อมูลออกมาดูว่า ยังคงถูกต้องหรือไม่ ผลการทดสอบพบว่า เครื่องบันทึกข้อมูลสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้อง 100 %

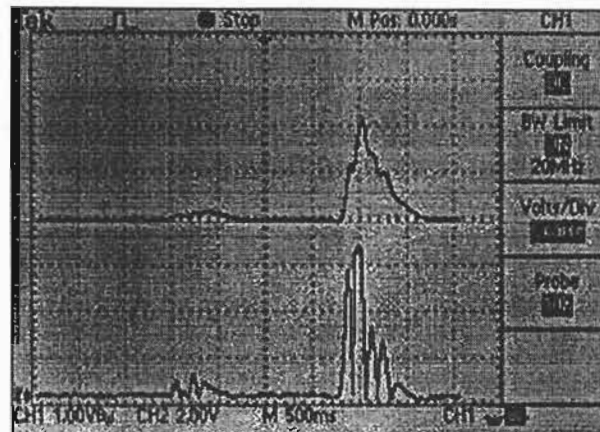
6.3 การทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัด

การทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัด เป็นการตรวจสอบสัญญาณจากส่วนต่างๆ ของวงจร ว่ามีสัญญาณออกมาตามที่ควรจะเป็นหรือไม่ โดยได้วัดสัญญาณจากส่วนต่างๆของวงจรในขณะที่มีรถวิ่งผ่านตัวตรวจจับ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

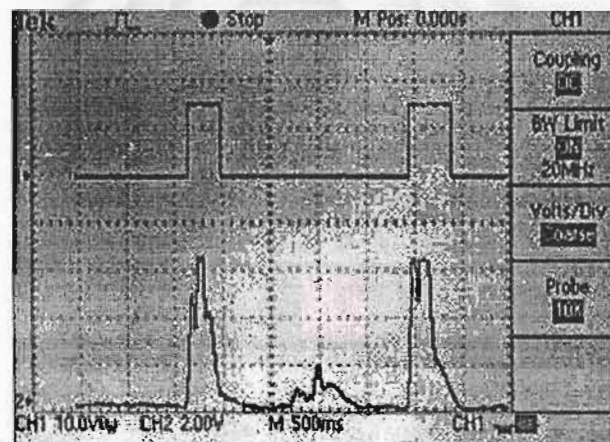
กราฟเส้นบนในรูปที่ 6.3 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรขยาย ส่วนกราฟเส้นล่างในรูปเดียวกันนี้เป็นสัญญาณที่ได้จากวงจรค่าสัมบูรณ์ หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกเฉลี่ยค่าแรงดัน กราฟเส้นบนในรูปที่ 6.4 เป็นสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยค่าแรงดันจากสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม หลังจากนั้นจะถูกนำไปผ่านวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ สัญญาณที่ออกมาจากขมิตต์ทริกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 6.5 สัญญาณหลังจากที่ผ่านวงจรขมิตต์ทริกเกอร์แล้วจะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม แต่ยังมีขนาดแรงดันที่สูงอยู่ จึงต้องนำไปปรับแรงดันให้เหลือเพียง 5 โวลต์ก่อน หลังจากนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



รูปที่ 6.3 สัญญาณก่อนและหลังจากผ่านวงจรค่าสัมบูรณ์



รูปที่ 6.4 สัญญาณจากการเคลื่อนที่ค่าแรงดันและสัญญาณจากวงจรค่าสัมบูรณ์



รูปที่ 6.5 สัญญาณก่อนและหลังจากผ่านวงจรมิตต์ทริกเกอร์

6.4 การทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัดบนถนนจริง

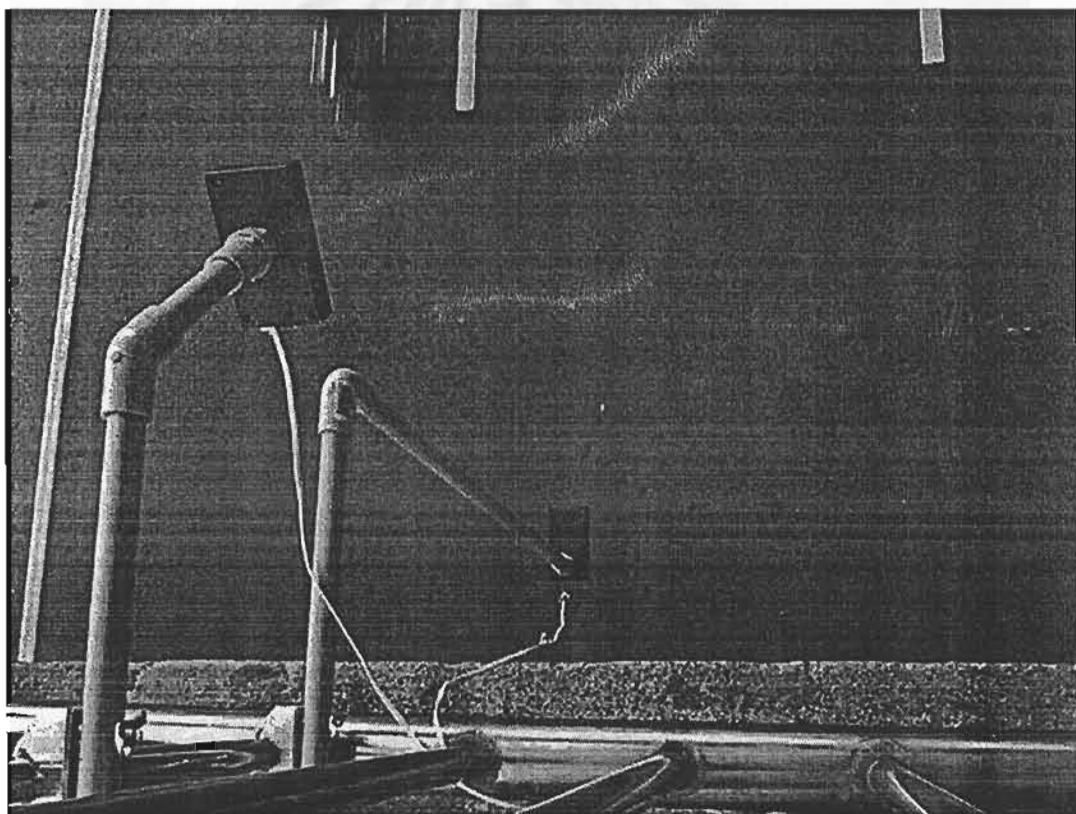
ในการทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัด ได้ออกไปทดสอบบนถนนจริง โดยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 แบบ คือ

1. การทดสอบในสภาพการจราจรคล่องตัว (รถวิ่งเร็ว)
2. การทดสอบในสภาพการจราจรค่อนข้างคล่องตัว (รถวิ่งช้า)
3. การทดสอบในสภาพการจราจรที่ติดขัด

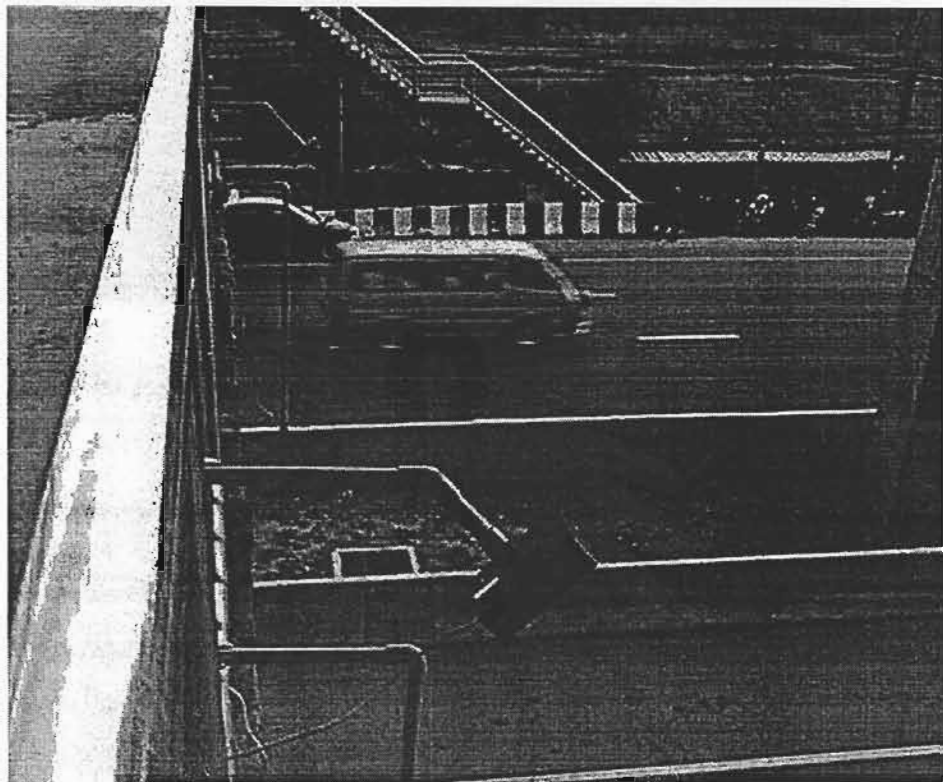
6.4.1 ผลการทดสอบในสภาพการจราจรคลองตัว (รถวิ่งเร็ว)

ในการทดสอบการตรวจจับรถในสภาพการจราจรที่คลองตัว ได้ทำการทดสอบโดยการนำเครื่องตรวจวัดไปติดตั้งที่สะพานลอย แลวถนนบางนา-ตราด ซึ่งปริมาณการจราจรคลองตัว และรถวิ่งด้วยความเร็วสูงกว่าประมาณ 60 km/hr ขึ้นไป บางคันอาจจะวิ่งด้วยความเร็วสูงถึง 120 km/hr

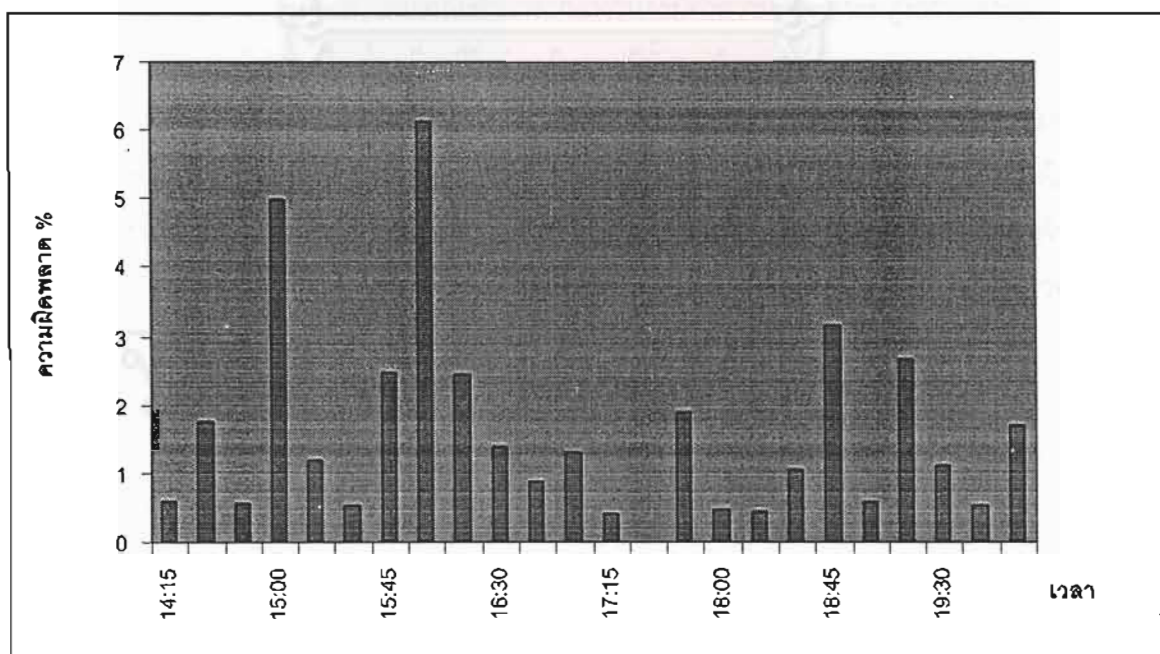
ในการทดสอบ ได้ตรวจนับรถตั้งแต่เวลา 14.00 นาฬิกาไปจนถึงเวลา 20.00 โดยได้เก็บข้อมูลทุกๆ 15 นาที ข้อมูลที่นับได้จากเครื่องตรวจวัดจะถูกบันทึกไว้โดยเครื่องบันทึกข้อมูล และในการนับนั้น จะให้คนนับเทียบไปด้วยเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลว่ามีความผิดพลาดเพียงใด การติดตั้งตัวตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 6.6 และ 6.7



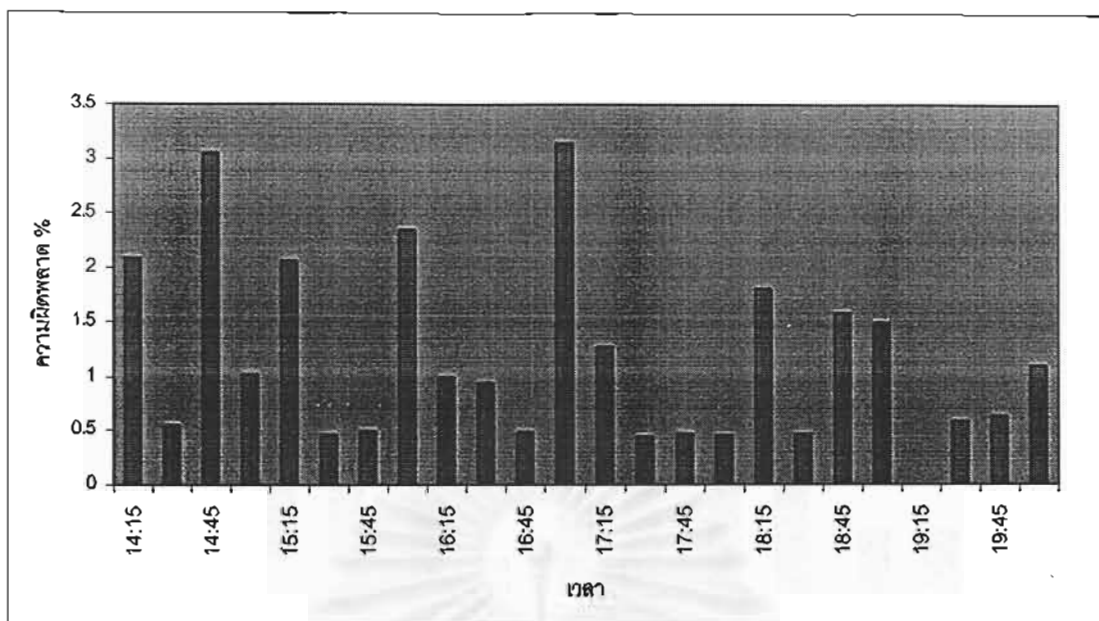
รูปที่ 6.6 การติดตั้งตัวตรวจวัด



รูปที่ 6.7 การติดตั้งตัวตรวจวัด



รูปที่ 6.8 ค่าผิดพลาดจากการวัดในสภาพการจราจรคลองตัว ครั้งที่ 1

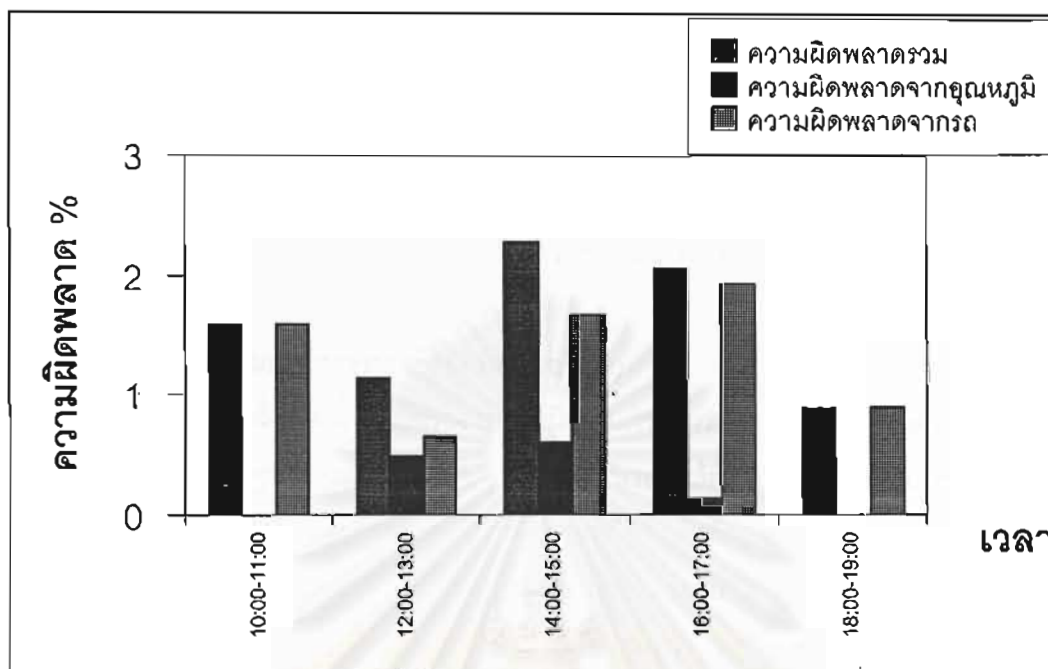


รูปที่ 6.9 ค่าผิดพลาดจากการวัดในสภาพการจราจรสองตัว ครั้งที่ 2

จากกราฟในรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดเท่ากับ 6.1 % ซึ่งเป็นความผิดพลาด 12 คันจากรถ 196 คัน และเมื่อคิดจากจำนวนรถทั้งหมดตั้งแต่เวลา 14.15 - 20.00 จะได้รถทั้งหมด 4818 คัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 1.07 %

ส่วนกราฟในรูปที่ 6.9 ค่าความผิดพลาดที่สูงที่สุดเท่ากับ 3.2 % ซึ่งเป็นความผิดพลาด 7 คันจาก 223 คัน เมื่อคิดในช่วงเวลาทั้งหมดจะได้รถ 4875 คัน และถ้าคิดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 1.16 % ถ้าดูจากค่าความผิดพลาด จะเห็นได้ว่า โดยเฉลี่ยช่วงเวลากลางวันจะมีค่าความผิดพลาดที่สูงกว่าเวลากลางคืนซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิส่วนหนึ่ง โดยที่รถที่วิ่งผ่านเข้ามาจะมีทั้งรถเก๋ง,รถเมล์ และ รถบรรทุก

ในการทดสอบครั้งต่อไป จะแยกประเภทรถออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทรถเก๋งและรถเมล์หรือรถบรรทุก เพื่อที่จะหาว่าความยาวของรถมีผลต่อการตรวจวัดหรือไม่ นอกจากนั้นในการวัดครั้งต่อไปนี้ได้สุ่มวัดในช่วง 1 ชั่วโมงเว้น 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 10.00 นาฬิกา ไปจนถึง 19.00 นาฬิกา และรถคันใดที่ตรวจจับไม่ได้ก็จะเป็นที่กัไว้ว่า ตรวจจับไม่ได้ที่เวลาใดบ้าง และมีกี่คัน เพื่อที่จะดูว่าอุณหภูมิของอากาศมีผลต่อการตรวจวัดหรือไม่



รูปที่ 6.10 ผลความผิดพลาดโดยแยกเป็นประเภทต่างๆ ครั้งที่ 3

กราฟในรูปที่ 6.10 แสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสาเหตุ 2 อย่าง คือความผิดพลาดจากอุบัติเหตุ และความผิดพลาดจากการวิ่งของรถ ความผิดพลาดจากอุบัติเหตุได้จากการที่ตัวตรวจวัดไม่สามารถนับรถได้ ซึ่งจะบันทึกเวลาไว้ด้วยว่านับไม่ได้ช่วงใด หลังจากนั้นจะนำเฉพาะจำนวนรถที่นับไม่ได้มาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ซึ่งเมื่อคิดจำนวนที่รถที่นับไม่ได้ทั้งหมดเท่ากับ 8 คัน จาก 3132 คัน คิดเป็น 0.25 %

ส่วนอีกสาเหตุมาจากการวิ่งของรถ เช่นรถวิ่งชิดกันเกินไปหรือรถวิ่งคร่อมช่องจราจร ซึ่งมีความผิดพลาดจากการนับเนื่องจากรถทั้งหมด เท่ากับ 46 คัน จากรถ 3132 คัน คิดเป็น 1.47 % ซึ่งถ้าเป็นกรณีรถวิ่งชิดกัน จะนับได้เป็น 1 คัน แต่ถ้าเป็นรถเมล์วิ่งคร่อมช่องจราจร เครื่องจะนับเกินจากความเป็นจริง ถ้าแยกคิดความผิดพลาดที่เกิดจากรถใหญ่และรถเล็กแล้วจะได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 6.1 สรุปสาเหตุความผิดพลาดในสถานะการจราจรคลองตัว

ประเภทรถ	ความผิดพลาดจากรถ	ความผิดพลาดจากอุบัติเหตุ
รถแก่ง, รถตู้, รถกระบะ	1.28 %	0.25 %
รถเมล์, รถบัส, รถบรรทุก	2.7 %	0 %

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการตรวจจับของเครื่องเฉพาะรถเล็กเท่านั้น ส่วนรถใหญ่สามารถตรวจจับได้หมด แต่ความผิดพลาดรวมของรถใหญ่จะมากกว่ารถเล็ก สาเหตุเนื่องมาจากความยาวของรถทำให้นับผิดพลาด ดังนั้นสรุปโดยรวมได้ว่าเครื่องตรวจจับสามารถตรวจจับรถเล็กได้ดีกว่ารถใหญ่ แม้ว่าอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อรถขนาดเล็กบ้าง แต่ก็เป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความผิดพลาดที่เกิดจากการวิ่งของรถ

6.4.2 ผลการทดสอบในสภาพการจราจรที่คล่องตัว (รถวิ่งช้า)

ในการทดสอบครั้งที่ 4 นี้ ได้ไปตรวจจับรถที่มีความเร็วต่ำกว่า 40 km/hr โดยได้ติดตั้งเครื่องตรวจจับไว้บนสะพานลอยหน้าศูนย์แสดงสินค้าไบเทค ซึ่งตั้งอยู่บริเวณใกล้สี่แยกบางนา ถนนบางนา-ตราด ตัวตรวจจับได้ถูกติดตั้งให้ตรวจจับรถที่อยู่บนถนนซึ่งเป็นช่องจราจรเบี่ยง ซึ่งเป็นบริเวณที่รถจะต้องชะลอความเร็วเพื่อที่จะเปลี่ยนช่องจราจร ดังนั้นรถที่ผ่านมาในบริเวณนี้จะมีความเร็วไม่เกิน 40km/hr บางคันอาจมีความเร็วเพียง 20 km/hr และรถแต่ละคันส่วนใหญ่จะเว้นช่วงห่างกันพอสมควร จะมีบางคันเท่านั้นที่วิ่งตามกันมา ผู้วิจัยทดสอบในช่วงเวลา 19.00-20.00 นาฬิกา เพื่อตัดปัญหาเรื่องการนับผิดพลาดเนื่องจากผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบในสภาวะที่รถวิ่งช้าแต่คล่องตัว

เวลา	จำนวนที่คน นับได้	จำนวนที่ เครื่องนับได้	ค่าความผิดพลาด (%) เนื่องจากรถวิ่งชิดกัน, ไม่ตรงช่องจราจร	ค่าความผิดพลาด(%) เนื่องจากรถหยุดนิ่ง
19.00-19.15	212	205	3.3 %	0 %
19.15-19.30	244	241	1.2 %	0 %
19.30-19.45	209	204	2.3 %	0.47 %
19.45-20.00	185	182	1.6 %	0 %
รวม	850	832	2.1 %	0.11 %

ผลการทดสอบในตารางที่ 6.2 แสดงข้อมูลที่วัดได้จากการจราจรที่ค่อนข้างคล่องตัว และรถวิ่งช้าประมาณ 20 - 40 km/hr สาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้เครื่องนับผิดพลาดมาจากการที่ในบางช่วงเวลา รถวิ่งตามกันมาใกล้เกินไป ทำให้เครื่องตรวจจับไม่สามารถแยกได้ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งคือ รถวิ่งไม่ตรงช่องจราจร แต่สาเหตุนี้เกิดน้อยมาก เนื่องจากเป็นช่องจราจรเดี่ยว ส่วนความผิดพลาด 0.47 % นั้น เกิดจากรถวิ่งเข้ามาหยุดตรงขอบเขตของการตรวจจับพอดี ทำให้นับได้ 2 คัน ซึ่งจริงๆ คือคันเดียว

สรุปจากการทดสอบได้ว่า เครื่องตรวจจับสามารถวัดรถที่วิ่งช้าประมาณ 20-40 km/hr ได้ โดยพบความผิดพลาดที่เกิดจากรถหยุดอยู่ในรัศมีของตัวตรวจจับ 0.11 % และความผิดพลาดที่เกิดจากการที่รถวิ่งซัดกันเกินไปเท่ากับ 2.1 % จากจำนวนรถทั้งหมด 850 คัน

6.4.2 ผลการทดสอบในสภาพการจราจรที่ติดขัด

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ย้ายที่ติดตั้งเครื่องตรวจจับไปอยู่ในบริเวณที่มีการจราจรติดขัดพอสมควร คือได้ไปติดตั้งที่บริเวณสะพานลอยบนถนนสุขุมวิท 101 บริเวณที่ติดตั้งอยู่ใกล้ทางแยกพอดี้ ดังนั้นจะมีบางช่วงเวลาที่เกิดเหตุรถอัญญาณไฟจราจร ผู้วิจัยได้ทดสอบในช่วงเวลา 20.00-21.00 นาฬิกา เพื่อตัดปัจจัยทางด้านอุณหภูมิออกไป รถที่วิ่งมีทั้งรถเก๋งและรถเมล์ ความเร็วรถที่วิ่งผ่านประมาณ 0 - 60km/hr ขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจร

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบในสภาพการจราจรที่ติดขัด

เวลา	จำนวนรถที่นับได้จริง	จำนวนที่เครื่องนับได้	ค่าความผิดพลาด (%)
20.00-20.15	269	337	25.2 %
20.15-20.30	236	284	20.3 %
20.30-20.45	250	309	23.6 %
20.45-21.00	212	247	16.5 %
รวม	967	1177	21.7 %

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเกิดค่าผิดพลาดสูง ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.7 % เมื่อคิดจากรถทั้งหมดประมาณ 967 คัน ภายในเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบในสภาพการจราจรที่รถวิ่งช้า จำนวนรถที่นับได้จะประมาณเท่าๆกัน แต่ความผิดพลาดจากการทดสอบในสภาพการจราจรติดขัดมีค่าสูงกว่าถึง 20 % ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ในการทดสอบในสภาพการจราจรที่รถวิ่งช้า ถึงแม้ว่ารถที่วิ่งเข้ามาจะมีความเร็วไม่เกิน 40 km/hr แต่ว่าจะมีรถวิ่งเข้ามาเรื่อยๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่หยุดนิ่ง ในขณะที่ในสภาพการจราจรที่ติดขัด จะมีรถวิ่งเป็นช่วงๆ คือ บางช่วงก็จะมีรถวิ่งเข้ามาได้อย่างคล่องตัวโดยที่ไม่ติดขัด บางช่วงก็จะเกิดการทิ้งช่วงของรถยาวมากเนื่องจากติดสัญญาณไฟจราจรก่อนหน้านี้ ในขณะที่บางช่วงรถก็จะหนาแน่นมาก และที่เลวร้ายที่สุดคือรถติดสัญญาณไฟจราจรบริเวณแยกที่ติดตั้งเครื่องตรวจวัด ช่วงนี้จะทำให้รถหยุดนิ่ง และทำให้มีรถมาต่อคิวกันยาวมาก พอเริ่มออกวิ่ง ก็วิ่งติดๆ กันไป นอกจากนั้นรถที่วิ่งคล่อมช่องจราจรก็มีจำนวนมาก ปัญหาเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดความผิดพลาดในการนับทั้งสิ้น

6.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดทั้ง 3 สภาวะการจราจร สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.4 จะเห็นได้ว่า ยิ่งรถวิ่งเร็ว ความผิดพลาดจากการวัดก็จะยิ่งน้อย เพราะว่ในขณะทีรถวิ่งเร็ว จะไม่เกิดค้อยเกิดปัญหาการวิ่งชิดกันหรือการหยุดนิ่งของรถ แต่ถ้รถวิ่งช้า ปัญหาการที่รถวิ่งชิดกันก็จะทำให้เกิดการวัดที่ผิดพลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่รถหยุดนิ่ง ตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อรถขนาดเล็ก เนื่องจากในตอนกลางวัน โดยเฉพาะวันที่อุณหภูมิในบรรยากาศค่อนข้างสูง จะมีผลกระทบต่อการทำงานของรถขนาดเล็ก ผลของความร้อนทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิรถและถนนมีค่าน้อยลง จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาดจากการนับ จากตารางที่ 6.1 ยังสรุปได้อีกว่าเครื่องตรวจจับสามารถตรวจจับรถขนาดเล็กได้ถูกต้องแม่นยำกว่ารถขนาดใหญ่ เนื่องมาจากความยาวของรถมีผลทำให้การวัดผิดพลาด

ตารางที่ 6.4 สรุปผลการทดสอบ

สภาวะการจราจร	ค่าความผิดพลาด
คล่องตัว รถวิ่งเร็ว มากกว่า 60 km/hr	น้อยกว่า 2 %
ค่อนข้างคล่องตัว รถวิ่งช้า 20 - 40 km/hr	2.1 %
ติดขัด	21.7 %

โดยสรุป เครื่องตรวจจับรถแบบไพโรอิเล็กทริกเหมาะสำหรับวัดปริมาณการจราจรในสภาพที่คล่องตัวมากกว่าที่จะนำไปใช้ในสภาพการจราจรที่ติดขัด ซึ่งจะส่งผลให้การนับจำนวนรถมีความผิดพลาดสูง

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

เครื่องวัดปริมาณการจราจรส่วนมากที่ใช้ในประเทศไทยจะเป็นเครื่องวัดปริมาณการจราจรที่ใช้รูป ซึ่งมีปัญหายุ่งยากในการติดตั้ง อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเครื่องวัดปริมาณการจราจรแบบไฟโรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นเครื่องวัดปริมาณการจราจรแบบที่สามารถตรวจวัดยานพาหนะได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับตัวรถ ข้อดีคือไม่ต้องหยุดการจราจรในบริเวณที่ต้องการจะติดตั้งตัวตรวจวัด และสามารถติดตั้งได้ง่าย ตัวตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็กทริกจะใช้หลักการในการตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างผิวถนนและรถที่วิ่งผ่านเข้ามา ข้อมูลการจราจรที่วัดได้จากตัวตรวจวัด จะถูกบันทึกในเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้พร้อมกันสูงสุดถึง 8 ช่องการจราจร และสามารถนำข้อมูลที่บันทึกไว้มาแสดงผลในภายหลังได้

เครื่องวัดปริมาณการจราจรที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถตรวจวัดรถได้ทุกประเภทคือ รถเก๋ง รถเมล์ รถกระบะ รถบรรทุก โดยที่ในการตรวจจับมีความถูกต้องมากเมื่อ นำตัวตรวจวัดไปวัดการจราจรในสภาพการจราจรที่คล่องตัว

นอกจากนั้นเครื่องวัดปริมาณการจราจรยังสามารถตรวจจับรถได้ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ในเวลากลางวัน จะทำให้การวัดผิดพลาดได้บ้าง เนื่องจากในเวลาเที่ยงวันที่มีอุณหภูมิสูงๆ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวถนนและรถจะมีค่าน้อย จึงทำให้การตรวจวัดผิดพลาดได้ แต่ความผิดพลาดที่เกิดจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความผิดพลาดที่เกิดจากการวิ่งของรถ

จากผลการทดสอบ พบว่าเครื่องตรวจวัดที่ได้สร้างขึ้นนี้ ให้ความถูกต้องในการวัดได้สูงกว่า 98 % เมื่อนำไปตรวจวัดในสภาพการจราจรที่คล่องตัวและรถวิ่งเร็ว แต่ถ้านำไปใช้ตรวจวัดในสภาพการจราจรที่ติดขัดจะให้ความผิดพลาดที่สูงกว่า 20 % ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้ในสภาพการจราจรที่คล่องตัว อย่างเช่นบนทางด่วนหรือบริเวณชานเมือง มากกว่าที่จะนำมาติดตั้งในบริเวณในตัวเมือง

จากการทดสอบสามารถสรุปความสามารถของเครื่องวัดปริมาณการจราจรแบบไฟโรอิเล็กทริกได้ดังนี้

- ติดตั้งได้ง่าย และไม่ต้องปิดการจราจรในขณะที่ติดตั้ง
- สามารถวัดรถได้ทุกชนิด
- ความเร็วต่ำสุดของรถที่สามารถวัดได้ประมาณ 20 km/hr
- ความเร็วสูงสุดของรถที่สามารถวัดได้ มากกว่า 120 km/hr
- สามารถวัดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน

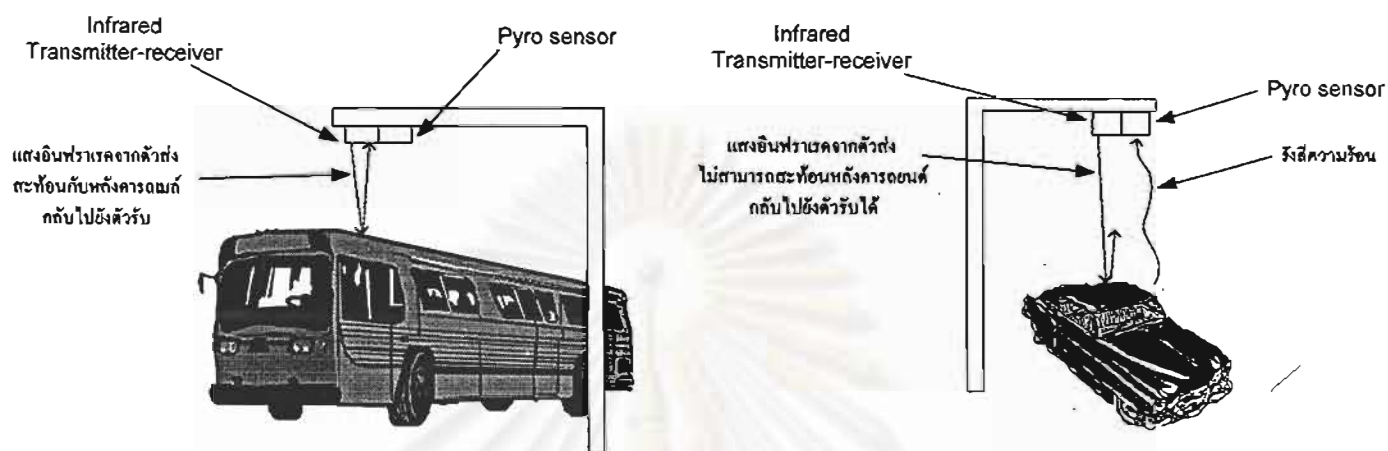
- เครื่องบันทึกข้อมูลสามารถเก็บข้อมูลได้พร้อมกัน 8 ช่องสัญญาณ
- สามารถบันทึกข้อมูลติดต่อกันได้มากที่สุด 1 เดือน
- มีระบบสำรองข้อมูล ป้องกันการสูญหายของข้อมูล
- สามารถเก็บข้อมูลสูงสุดได้ 65,535 คันภายใน 15 นาที
- การเก็บข้อมูลจะทำทุกๆ 15 นาที
- สามารถแสดงจำนวนรถที่วิ่งผ่านในขณะนั้นได้
- เหมาะสำหรับนำไปใช้ในสภาวะการจราจรที่คล่องตัว

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบเครื่องวัดปริมาณการจราจรแบบไฟโรอิเล็กทริก ผู้วิจัยได้พบสาเหตุของปัญหา 2 สาเหตุ คือการที่รถวิ่งคร่อมช่องการจราจร ซึ่งเกิดจากตัวผู้ขับขี่เอง และการตรวจจบบรตเมล์ ซึ่งมักจะทำให้ค่าที่นับได้เกินค่าจริง เนื่องมาจากการที่รถเมล์มีความยาวมาก

ดังนั้นจึงขอเสนอแนวทางที่จะแก้ปัญหาเนื่องจากความผิดพลาดในการตรวจจบบรตเมล์ ดังนี้ คือ

1. เลนส์เฟรเนล จะต้องปรับปรุงให้เหมาะกับการใช้งานตรวจจบบรตเมล์ โดยที่ควรจะมีรัศมีของการตรวจจบบรรคolumถนน 1 ช่องการจราจร ซึ่งจะทำให้ลดปัญหาจากการที่รถวิ่งคร่อมช่องจราจรได้
2. อาจใช้ตัวตรวจจบบไฟโรอิเล็กทริกแบบผลึกเดี่ยว แทนแบบผลึกคู่ ซึ่งจะลดปัญหาจากการที่แรงดันจากตัวตรวจจบบต่ำลงในขณะที่มีรถเมล์วิ่งเข้ามาได้ เนื่องจากตัวไฟโรอิเล็กทริกแบบผลึกคู่ ถูกออกแบบมาในลักษณะที่ผลึกไฟโรอิเล็กทริกต่อกลับชั่วคราวกันอยู่เพื่อต้องการให้มีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อม เมื่อนำไปใช้ตรวจจบบรตเมล์ ในขณะที่รถเมล์วิ่งเข้ามาในรัศมีของตัวตรวจจบบแล้ว ผลึกไฟโรอิเล็กทริกทั้งคู่จะได้รับอุณหภูมิจากรถเมล์เท่ากัน ดังนั้นจึงเกิดการหักล้างกันเองของสัญญาณ เป็นผลให้เกิดการหายไปของสัญญาณทั้งๆที่รถเมล์ยังไม่ได้วิ่งพ้นออกไปจากรัศมีของตัวตรวจจบบ ซึ่งถ้าเปลี่ยนตัวไฟโรอิเล็กทริกเป็นแบบผลึกเดี่ยว อาจจะทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไปได้
3. ใช้ตัวส่งและตัวรับอินฟราเรดมาช่วย โดยใช้แสงอินฟราเรดยิงไปตรงบริเวณที่ตรวจจบบ เมื่อรถเมล์วิ่งผ่านจะทำให้แสงอินฟราเรดนั้นสะท้อนกลับมายังตัวรับ แต่ถ้าเป็นรถเก๋งวิ่งผ่านมาจะไม่ทำให้แสงสะท้อนได้ เนื่องจากรถเก๋งมีความสูงน้อยกว่ารถเมล์มาก ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แนวทางแก้ปัญหาในการตรวจจับรถเมล์

เมื่อรถเมล์วิ่งเข้ามาเราสามารถรับรู้ได้จากตัวส่งและตัวรับอินฟราเรดที่เพิ่มเข้ามา และไม่ว่ารถเมล์จะวิ่งเข้ามาเพียงใด หรือว่าหยุดนิ่งก็ตาม เราก็สามารถที่ตรวจจับได้อย่างถูกต้อง ถ้าเป็นรถแก่งวิ่งเข้ามา ตัวไฟโรอิเล็ทริกก็จะเป็นตัวตรวจจับเหมือนเดิม ในการตรวจจับรถแก่ง ตัวตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็ทริกสามารถตรวจวัดได้อย่างถูกต้องอยู่แล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

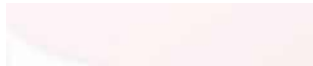
1. พนม เพชรจตุพร, วรพล ลีลาเกียรติสกุล และ พิเชษฐ์ ช่อผกา. ไมโครโปรเซสเซอร์ 8086/88-80286 และการใช้งานบน IBM PC XT/AT. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2537.
2. ดุสิต เครื่องาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
3. Clark, M. G. , Hodge, A. and Kidson, P. Infrared Detector Developments. IEE Colloquium on UK Developments in Road Traffic Signalling 32 (1988): 5/1-5/3.
4. Douglas, V. H. Microprocessors And Interfacing : Programming And Hardware. Second Edition. New York: McGraw Hill, 1992.
5. Eltec Instrument. Introduction To Infrared Pyroelectric Detectors(ELTECdata #100). Eltec Instrument. (n.p. , n.d.).
6. Eltec Instrument . Choosing and Using Pyroelectric Detectors (ELTECdata #101). Eltec Instrument. (n.p. , n.d.).
7. Hussain, T. M. , Saadawi, T. N. and Ahmed, A. Overhead Infrared Sensor for Monitoring Vehicular Traffic. IEEE transaction on Vehicular Technology 42 (November 1993): 477-483.
8. Hussain, T. M. , Saadawi, T. N. and Ahmed, A. Active And Passive Infrared Sensors for Vehicular Traffic Control. IEEE transaction on Vehicular Technology 41 (1994): 1393-1397.
9. Hussain, T. M. , Saadawi, T. N. and Ahmed, A. Infrared Pyroelectric Sensor For Detection of Vehicular Traffic Using Digital Signal Processing Techniques. IEEE transaction on Vehicular Technology 44 (August 1995): 683-689.
10. Hossain, A. and Rashid, H. Pyroelectric Detectors and Their Applications. IEEE transaction on Industry Applications 27 (September 1991): 824-829.
11. Imazu, K. and Mita, Y. Range-Measurement-Type Optical Vehicle Detector. IEEE-IEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference 38 (1995): 48-53.
12. Imaizumi, M. , Koyama, Y. , Takaku, T. , Hirasawa, K. and Hiramoto, T. Optical Vehicle Detector Using Range Finding Method. IEEE-IEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference 32 (1994): 85-88.

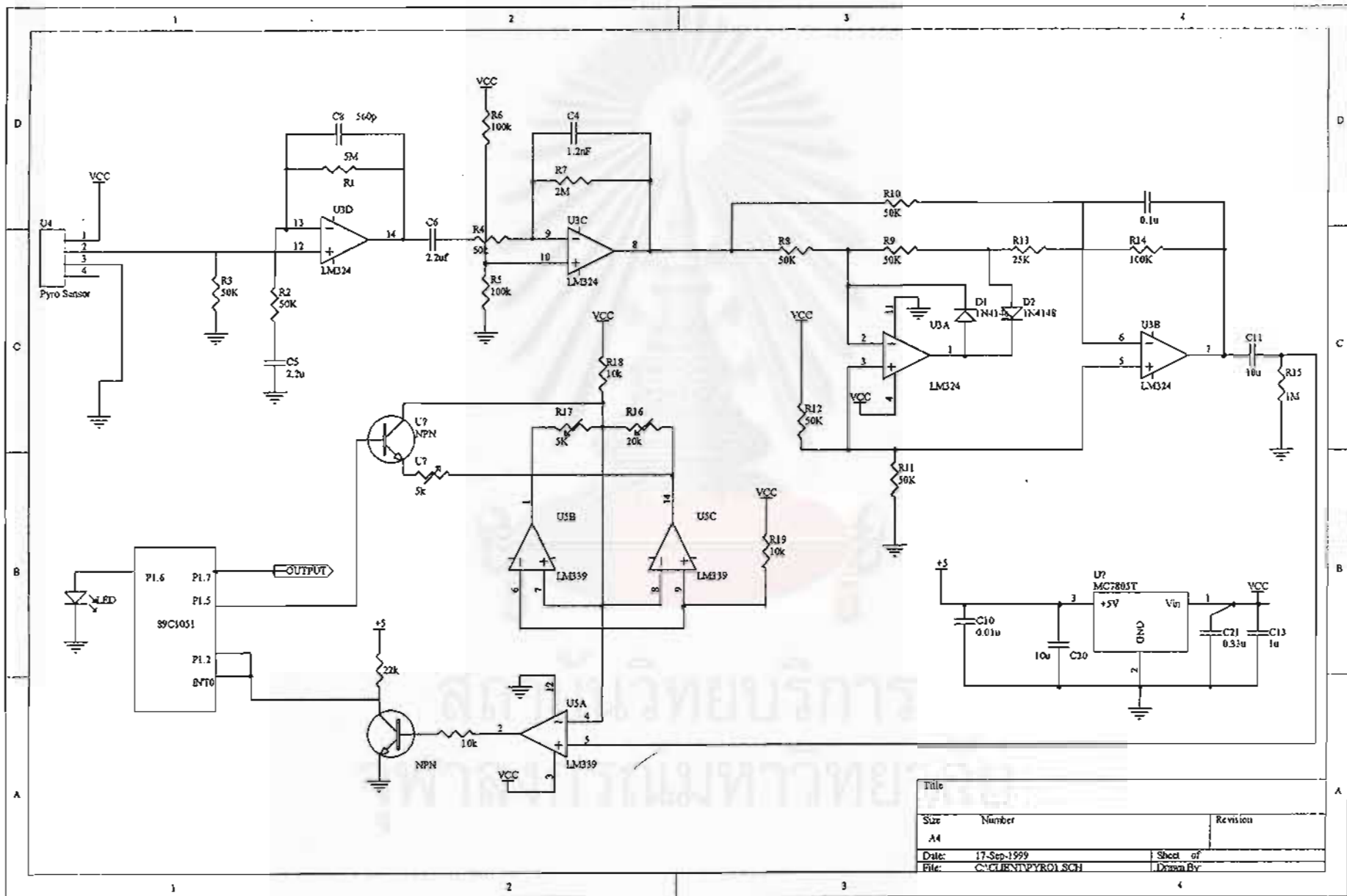
13. Jerald, G. G. Applications of operational amplifiers. New York :McGraw-Hill, 1973.
14. Nippon Ceramic. Pyroelectric Infrared Sensor Technical Information TI-101. Nippon Ceramic. (n.p. , n.d.).
15. Olson, R. A. , Robert, L. G. , Richard, J. W. and Robert, E. M. Active-Infrared Overhead Vehicle Sensor. IEEE transaction on Vehicular Technology 21 (February 1994): 79-85.
16. Thomas, W. S. C And The 8051 Hardware, Modular Programming and Multitasking. Second Edition. New York: Prentice-Hall, 1998.
17. U.S. Department of Transportation. Traffic Detector - Technical Appendix. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration (April 1985): 1-29.
18. U.S. Department of Transportation. Traffic Detector Handbook. U.S. Dept. of Transportation Federal Highway Administrations (July 1990): 1-169.
19. U.S. Department of Commerce. Initial Evaluation Of The Existing Technologies For Vehicle Detection. Texas Transportation Inst., College Station. (n.d.).
20. Wen-Yaw, C. , Tai-Ping, S. , Yung-Lung, C. and Yuan-Ling, K. Design of Pyroelectric IR Readout Circuit Based on LiTaO₃ Detectors. IEEE International Symposium on Circuit and Systems 44 (1996): 225-228.





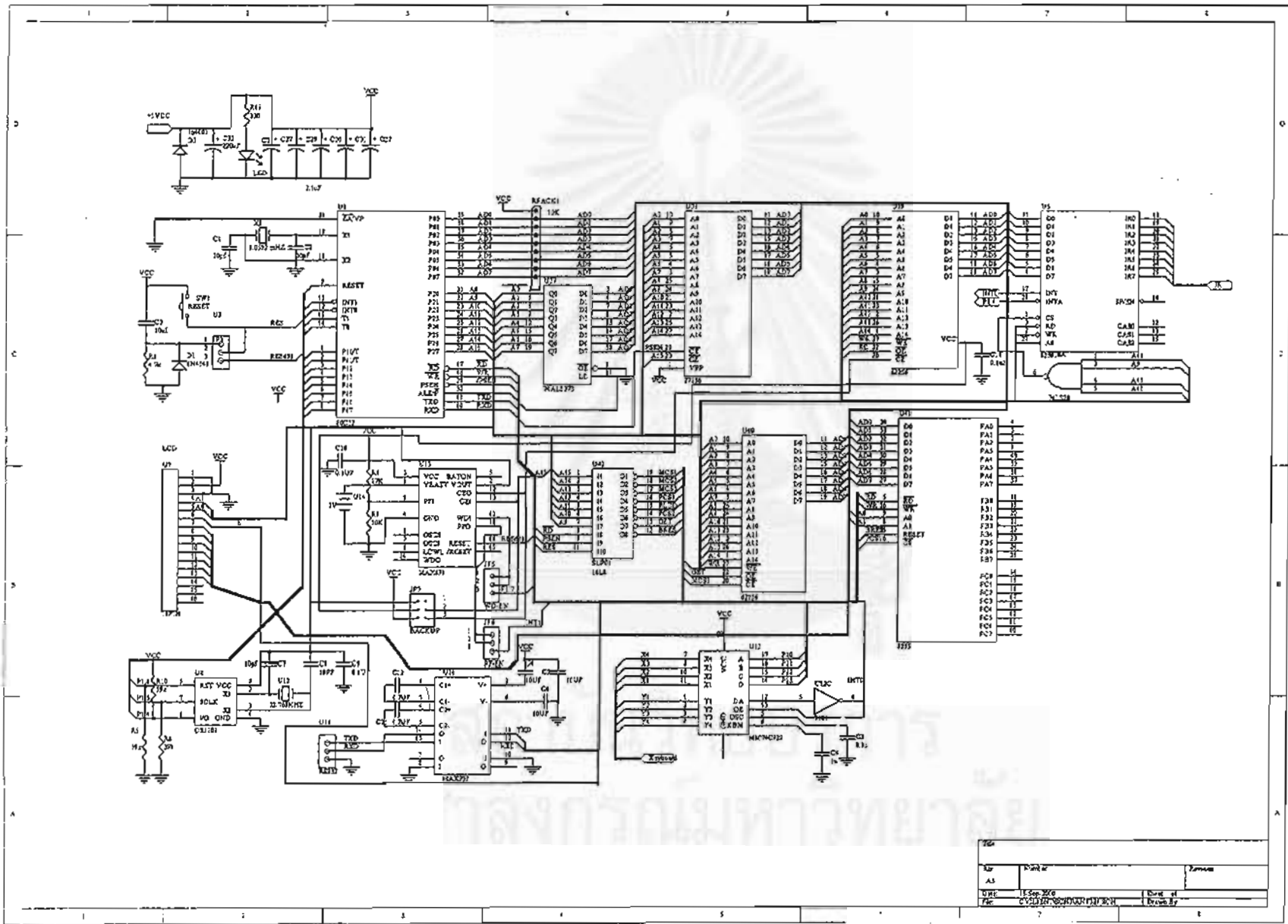
ภาคผนวก





Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	17-Sep-1999	Sheet of
File:	C:\CLIENT\PYRO1.SCH	Drawn By

วงจรตัวตรวจจับแบบไฟโรอิเล็กทริก



No.	Name	Quantity
A1	U1	1
A2	U2	1
A3	U3	1
A4	U4	1
A5	U5	1
A6	U6	1
A7	U7	1
A8	U8	1
A9	U9	1
A10	U10	1
A11	U11	1
A12	U12	1
A13	U13	1
A14	U14	1
A15	U15	1
A16	U16	1
A17	U17	1
A18	U18	1
A19	U19	1
A20	U20	1
A21	U21	1
A22	U22	1
A23	U23	1
A24	U24	1
A25	U25	1
A26	U26	1
A27	U27	1
A28	U28	1
A29	U29	1
A30	U30	1
A31	U31	1
A32	U32	1
A33	U33	1
A34	U34	1
A35	U35	1
A36	U36	1
A37	U37	1
A38	U38	1
A39	U39	1
A40	U40	1
A41	U41	1
A42	U42	1
A43	U43	1
A44	U44	1
A45	U45	1
A46	U46	1
A47	U47	1
A48	U48	1
A49	U49	1
A50	U50	1

วงจรเครื่องบันทึกข้อมูลการจราจร

ประวัติผู้เขียน



นายภูมินทร์ เพิ่มศิริ เกิดวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่จันทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2538 และ
เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ
พ.ศ. 2539