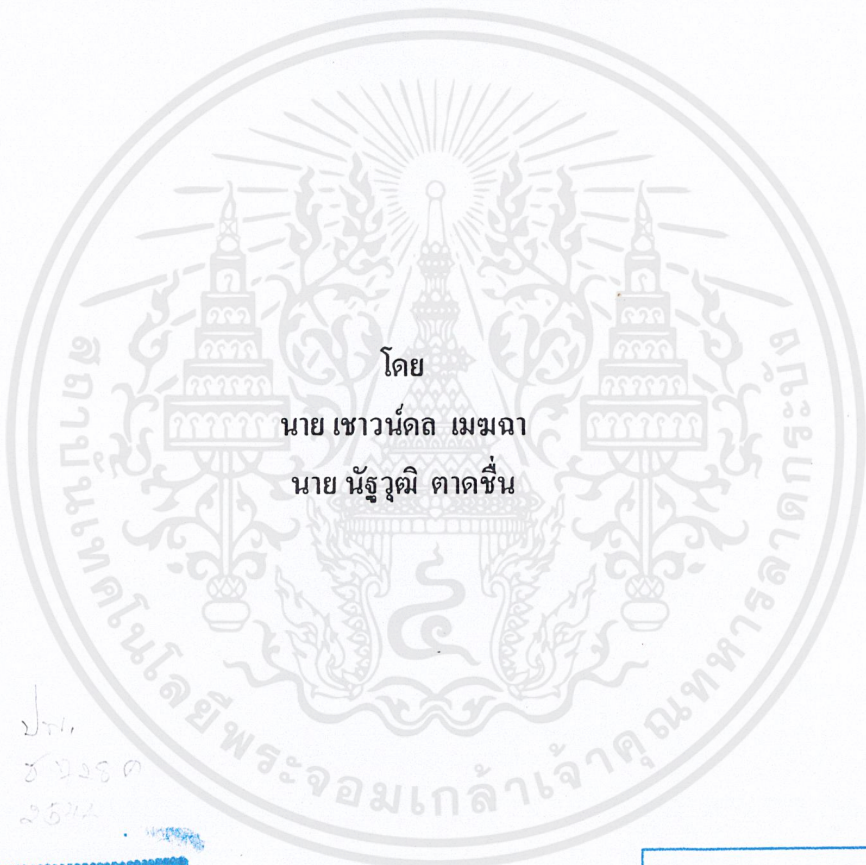


เครื่องวัดความเร็ววัตถุด้วยคลื่นอุลตราโซนิก  
SPEED METER BASED ON ULTRASONIC WAVE



โดย  
นาย เชาว์นัดด เมฆมา  
นาย นัฐวุฒิ ตาดชื่น

ปจก.  
ช.จ.จ.ค.  
2544

เลขหนังสือ.....  
เลขทะเบียน..... 46277  
วัน, เดือน, ปี..... 21 ส.ค. 2546

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดความเร็ววัตถุด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Speed Meter based on Ultrasonic wave

โดย  
นายเชวน์คัล เมฆฉา  
นาย นัฐวุฒิ ตาดชื่น

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ดร.กิตติพล ชิตสกุล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดความเร็ววัตถุด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

SPEED METER BASED ON ULTRASONIC WAVE

ผู้จัดทำ

1. นายเชาวนัต เมฆมา รหัสประจำตัว 41014111

2. นายรัฐวุฒิ ตาดชื่น รหัสประจำตัว 41014137



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. กิติพล ชิตสกุล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องวัดความเร็ววัตถุด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

นาย เชาวนัดล เมฆฉา

นาย นัฐวุฒิ ตาคชื่น

ดร. กิตติพล ชิตสกุล (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

โครงการเครื่องวัดความเร็วโดยใช้อุลตราโซนิกนี้ เป็นโครงการหนึ่งที่เป็นการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านอุลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้งานในเครื่องมือวัด

โดยมีหลักการทำงานของเครื่อง ดังนี้ ตัวส่งจะส่งสัญญาณความถี่ 40 กิโลเฮิรทซ์ จากนั้นตัวรับก็จะรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายสัญญาณที่สะท้อนกลับมาโดยที่ความถี่จะเปลี่ยนไป จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์เอฟเฟกต์ โดยสัญญาณที่รับมานี้จะอยู่ในรูปเอเอ็มมอดูเลชัน หลังจากนั้นก็นำสัญญาณที่ได้นี้ไปคำนวณหาความเร็วด้วยการประมวลผลและแสดงผลบนไมโครคอมพิวเตอร์ จากการทดลองสามารถวัดความเร็วสูงสุดได้ 2.42 เมตรต่อวินาที ต่ำสุดได้ 0 เมตรต่อวินาที มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.75 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Speed Meter based on Ultrasonic wave

Mr. Chaovadol Mekcha

Mr. Nattavut Thardcheun

Dr. Kitiphol Chitsakul (Advisor)

### ABSTRACT

The speed meter composed of ultrasonic transmitter & receiver. The principle is based on the Doppler effect of ultrasonic at 40 khz. The receiver receives the A.M. modulated reflection wave and demodulates. The Doppler shift wave for calculating the speed and also of the flying object. The main processor is a PC used for displaying the speed.

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ดร.กิตติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายเชาวน์คล เมฆฉา

นายรัฐวุฒิ ตาดชื่น

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของโครงการ	3
2.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอุลตราโซนิก	3
2.2 ปราคฏการณ์คอปเปอเรอร์	10
2.3 อุลตราโซนิกทรานดิวเซอร์	12
2.4 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	14
2.5 วงจรออสซิลเลเตอร์	29
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51	29
บทที่ 3 การออกแบบและหลักการทำงานของวงจร	31
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 40KHz	32
3.2 วงจรรับวงจรขยายและบีสท์สัญญาณ	33
3.3 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	34
3.4 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	35
3.5 ส่วนประมวลผลและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดย RS-232	36
3.6 โปรแกรมประมวลผล	38
3.7 ส่วนแสดงผล	40
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบของโครงการ	41
4.1 การทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์	41
4.2 การทดสอบภาครับ	43
4.3 การทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	44

4.4 การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	47
4.5 การทดสอบเครื่องวัดความเร็วโดยรวมส่วนต่างๆทั้งหมดของวงจร	48
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	51
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	51
5.2 สรุปผล	55
บรรณานุกรม	57



## สารบัญรูป

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่ต่างๆ ที่ถูกนำไปใช้งาน	3
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดคลื่นตามยาว	4
รูปที่ 2.3 แสดงการบีบของคลื่น 2 คลื่น	5
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง	6
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของคลื่นที่ผ่านช่องแคบๆ จะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดใหม่	7
รูปที่ 2.6 แสดงคลื่นเมื่อกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรง คลื่นสะท้อนก็จะเป็นคลื่นวงกลมเช่นกัน	7
รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน	8
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในทั่วไป ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จังก์ชัน	13
รูปที่ 2.9 วงจรเสมือนของไบโพลาร์จังก์ชันทรานซิสเตอร์	14
รูปที่ 2.10 หลักการเบื้องต้นของวงจร ADC	16
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อเนื่อง และสัญญาณดิจิทัลขนาด 3 บิต	16
รูปที่ 2.12 วงจรพื้นฐานของวงจร Single slope ADC	19
รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานของ Dual slope ADC	20
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาจุดออก ของวงจรอินทิเกรต $V_{int}$ กับเวลา	22
รูปที่ 2.15 รูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณต่อเนื่องกับสัญญาณเปรียบเทียบ	23
รูปที่ 2.16 วงจรพื้นฐานของ Successive approximation ADC	24
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของสัญญาณต่อเนื่องจุดออก $V_{OA}$ จาก DAC กับสัญญาณต่อเนื่องขาเข้า $V_{IA}$	25
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานและวงจรพื้นฐานของ Algorithmic ADC	27
รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Parallel ADC	28

รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของ Parallel ADC	29
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดความเร็วแสดง	31
รูปที่ 3.2 รูปวงจรกำเนิดสัญญาณ 40KHz	32
รูปที่ 3.3 รูปวงจรรับวงจรถ่ายและบีทสัญญาณ	33
รูปที่ 3.4 รูปวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	34
รูปที่ 3.5 รูปวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยใช้ ADC0820	36
รูปที่ 3.6 รูปแสดงการต่อวงจร 89C2051 กับ MAX232	37
รูปที่ 3.7 แสดง Flowchart โปรแกรมที่อยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์	38
รูปที่ 3.8 แสดง Flowchart โปรแกรมแสดงผล	39
รูปที่ 3.9 รูปแสดงโปรแกรมแสดงผลและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน	40
รูปที่ 4.1 แสดงเอาต์พุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์	42
รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณหลังจากทำการต่อตัวส่งเข้ากับวงจร	42
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากตัวรับ	43
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณหลังการบีท ที่ความเร็วต่างๆ	44
รูปที่ 4.5 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความถี่ของวงจร แปลงความถี่เป็นแรงดัน	46
รูปที่ 5.1 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่วัดถึงจุด ผ่านส่วนดีเทคเตอร์	53
รูปที่ 5.2 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ ที่ได้จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์	54

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำอุตสาหกรรมโทรคมนาคมประยุกต์ใช้งานในวงการต่างๆ อย่างกว้างขวาง และเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น เครื่องทำความสะอาดโดยใช้อุตสาหกรรมโทรคมนาคม เครื่องโซนาร์ และ เครื่องอุตสาหกรรม เป็นต้น

โครงการนี้ได้นำเอาแนวความคิด จากที่อุตสาหกรรมโทรคมนาคมเป็นคลื่นเสียงชนิดหนึ่ง โดยได้นำเอาคุณสมบัติของคลื่นมาทำการศึกษา เพื่อทำการสร้างโครงการนี้ขึ้นมา

#### 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาและสร้างเครื่องมือวัดความเร็วของวัตถุในอากาศ โดยใช้หลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์คลื่นอุตสาหกรรมโทรคมนาคม

#### 1.2 แนวทางในการทำโครงการ

โครงสร้างของโครงการนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้คือ

- 1). วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ 40KHz เพื่อนำสัญญาณมาใช้สำหรับป้อนให้กับตัวส่งอุตสาหกรรมโทรคมนาคม และ นำมาใช้ในส่วนของการบีบอัด
- 2). วงจรขยายภาครับและบีบอัด เพื่อที่จะขยายสัญญาณจากตัวรับอุตสาหกรรมโทรคมนาคมให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และสัญญาณที่ได้จะนำไปบีบอัดกับสัญญาณรูปไซน์ 40KHz
- 3). วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน นำความถี่ซึ่งได้จากการบีบอัดซึ่งจะได้เป็นความถี่ ซึ่งก็คือความถี่เลื่อนจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป มาทำการแปลงเป็นสัญญาณแรงดัน
- 4). วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำการระดับแรงดันที่ได้จากวงแปลงความถี่เป็นแรงดัน ให้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัล เพื่อที่จะทำการป้อนให้กับส่วนต่อไป
- 5). วงจรประมวลผล จะทำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากส่วนที่ผ่านมา เพื่อทำการเตรียมเพื่อที่จะแสดงผลต่อไป โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 1.3 โครงสร้างของรายงาน

สำหรับรายงานฉบับนี้ ประกอบด้วยบทต่างๆดังนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงเนื้อหาและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการ ในบทที่ 3 กล่าวถึงเรื่องของระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ประกอบโครงการพร้อมกับคำอธิบายการทำงานของวงจรอย่างละเอียด ในบทที่ 4 จะเป็นส่วนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง และผลการทดลอง ของโครงการ และบทที่5 จะเป็นบทสรุปของโครงการ และ  
ปัญหาต่างๆ พร้อมทั้งแนวทางการแก้ไข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

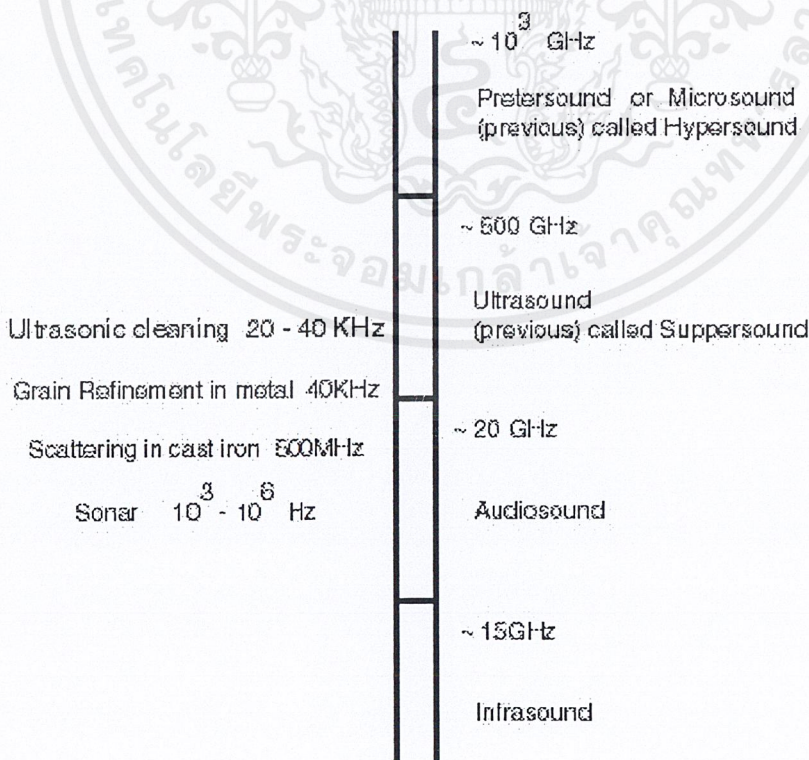
## ทฤษฎีของโครงการงาน

## 2.1 คุณสมบัติ และธรรมชาติของคลื่นอุตราโซนิก

หลักการของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง คือ พัลส์ของพลังงานจะถูกส่งออกมาจากตัวส่งถ้าไปกระทบกับวัตถุ พลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่ตัวส่งด้วย แต่การใช้อุปกรณ์ตัวรับที่เหมาะสม จะสามารถรับการสะท้อนกลับของสัญญาณ เวลาที่ใช้ในการเดินทางในอากาศสามารถที่จะคำนวณระยะทางออกมาได้ เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงคุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นจะสามารถทำให้เข้าใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้อง

## 2.1.1 คลื่นอุตราโซนิก

คลื่นอุตราโซนิก คือ คลื่นถี่เสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงสุดเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น แต่สำหรับพวกที่ยังอายุน้อยๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคลื่นอุตราโซนิก จึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz จนถึง  $10^4$  GHz โดยคลื่นที่มีความถี่มากกว่า  $10^4$  GHz และมีแอมพลิจูด (Amplitude) สูงๆ จะเรียกว่า ไฮเปอร์ซาวนด์ (Hypersound)



รูปที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่ต่างๆ ที่ถูกนำไปใช้งาน

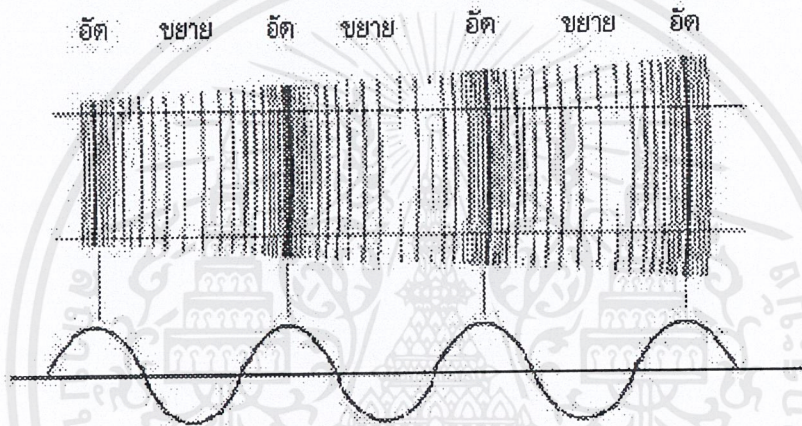
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ชนิดของคลื่นอุลตราโซนิค

คลื่นอุลตราโซนิคที่เดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ มีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลางนั้น

#### 2.1.2.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)

คลื่นตามยาว คือ คลื่นที่อนุภาคของตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูปจะเห็นว่ามีส่วนที่เป็นส่วนอัด (ซึ่งก็คือ คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันสูง และช่วงขยาย คือ คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำ และเมื่อนำค่าของความดันที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางมาเขียนกราฟจะได้รูปไซน์ (Sine Wave) โดยยอดคลื่นจะตรงกันกับส่วนอัดส่วนท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยาย ระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัด หรือระยะทางระหว่างส่วนขยาย คือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น  $T$  ซึ่งเท่ากับ  $\frac{1}{f}$  โดยจุดที่เป็นเส้นแกนนั้นมีค่าความดัน 1 บรรยากาศ

#### 2.1.2.2 คลื่นตามขวาง (Transverse Wave)

คลื่นตามขวาง คือ คลื่นที่ทุกๆจุดบนคลื่นมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ คลื่นชนิดนี้จะเดินทางผ่านตัวกลางที่มีขนาดของตัวกลางใหญ่กว่าขนาดของความยาวคลื่น และสามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง คลื่นชนิดนี้ไม่สามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวและก๊าซได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นตามขวางมีลักษณะเหมือนการเกิดขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งเป็นผลว่าการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคเป็นไปเพียงทิศทางเดียวเช่น ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นที่เคลื่อนที่ไป ต้นกำเนิดของคลื่นตามขวางเป็นพื้นที่หน้าเรียบของระนาบ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอันเนื่องมาจากการแกว่ง ความหนาแน่นของตัวกลางจะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบตามขวาง ความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะน้อยกว่าความเร็วของคลื่นชนิดตามยาว ในขณะที่เดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน ดังนั้นที่ความถี่เดียวกัน ความยาวของคลื่นตามขวางจะน้อยกว่าคลื่นตามยาวเสมอ

### 2.1.2.3 คลื่นผิวหน้า (Surface Waves or Rayleigh)

คลื่นผิวหน้าคือ คลื่นชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายกับคลื่นตามขวาง จะต่างกันตรงที่การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ไม่เป็นเพียงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวแต่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับทิศทางของการเคลื่อนที่ด้วย จึงทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปตามระนาบในแนวนอน ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเดินทางผ่านไปเฉพาะบนผิวของตัวกลางเท่านั้น

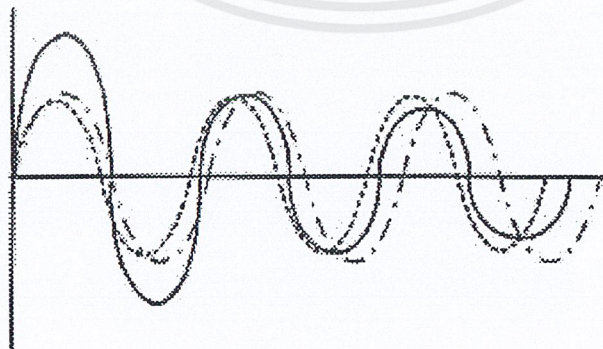
### 2.1.3 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นอุลตราโซนิค

คุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นเสียง จะแสดงได้ 4 แบบคือ

#### 2.1.3.1 การแทรกสอดของเสียง (Interference)

การแทรกสอดของเสียงเกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 คลื่นขึ้นไป ขณะเมื่อพบกันในตัวกลาง (Medium) เดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะคือ

ก). การบีบ (Beats) ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน หรือเฟสต่างกันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันแล้วรวมเป็นคลื่นใหม่ ซึ่งทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูป 2.3

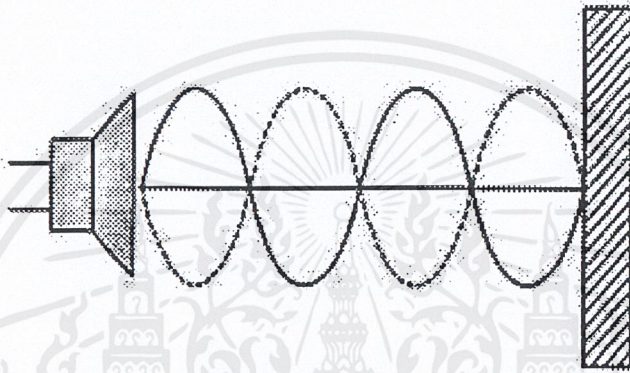


รูปที่ 2.3 แสดงการบีบของคลื่น 2 คลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นการแสดงการบีบของคลื่นเสียง 2 คลื่น ซึ่งได้คลื่นที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนไป ซึ่งประโยชน์ของบีบคลื่นนั้น จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นให้แสดงผลออกมา ในลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกันนี้

ข). การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Waves) เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นซูดที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและความถี่เท่ากัน แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามหรือมีเฟสตรงข้ามกันซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่งดังรูป 2.4

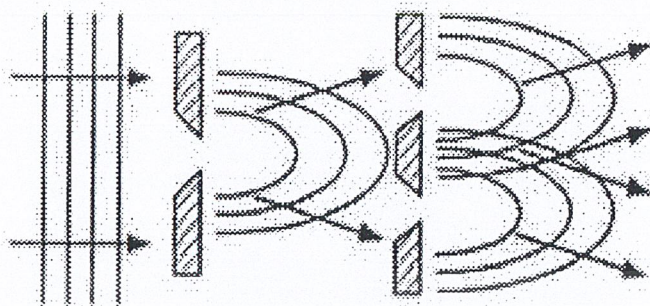


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

เสียงจะมีความเข้มสูงสุดที่ตำแหน่ง ก. และเบาสุดที่ตำแหน่ง ข. ซึ่งระยะระหว่างขั้วทั้ง 2 เท่ากับ  $d = \frac{\lambda}{2}$  หรือ  $L = n\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ;  $n = 1, 2, 3$

### 2.1.3.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction)

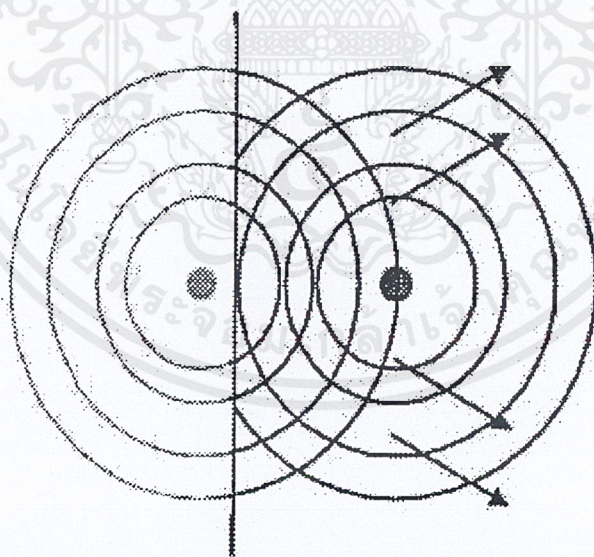
การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction) คลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้พบอยู่ในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลาเช่น ในกรณีที่ได้ยินเสียง แตรรถที่อยู่คนละถนนของมุมตึก หรือการได้ยินเสียงที่ลอดผ่านช่องเล็กๆ จากอีกห้องหนึ่ง ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของคลื่นที่ผ่านช่องแคบๆ จะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดใหม่

### 2.1.3.3 การสะท้อนของคลื่นเสียง ( Reflection )

การสะท้อนของคลื่นเสียง ( Reflection ) คลื่นเสียงสามารถสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลาง โยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และจะทำให้เกิดเสียงก้อง (Echo) ซึ่งเสียงก้องที่สะท้อนกลับมาในเวลาที่มากกว่า 50 ms จะทำให้เราได้ยินเสียงนั้นเป็นครั้งที่ 2

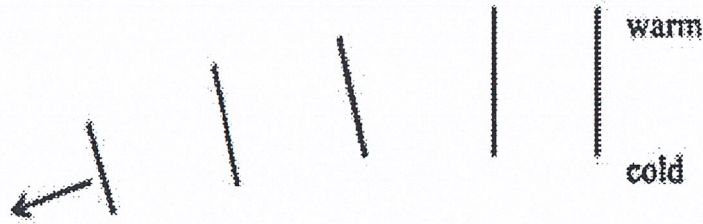


รูปที่ 2.6 แสดงคลื่นเมื่อกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรงคลื่นสะท้อนก็จะเป็นคลื่นวงกลมเช่นกัน

### 2.1.3.4 การหักเหของคลื่นเสียง ( Refraction )

การหักเหของคลื่นเสียง ( Refraction ) คลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดกาหักเหของคลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ยังคงที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

## 2.1.4 ลักษณะของคลื่น

### 2.1.4.1 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ คือ จำนวนของการออกซิชิลที่สมบูรณ์ จากแหล่งกำเนิดคลื่นภายในหนึ่งวินาที คลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางด้วยความถี่ที่เดียวกัน เช่น อัตราการสั่นของสายไวโอลินที่มีความถี่ 440 Hz มันก็จะมีความถี่เดียวกันกับคลื่นที่ถูกส่งและรับได้จากผู้ฟัง

### 2.1.4.2 ความยาวคลื่น (Wavelength)

ความยาวคลื่น (Wavelength) คือ ระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่างแต่ละการสั่นที่สมบูรณ์ หรือการเดินทางครบรอบ (1 Cycle) สามารถกล่าวได้ว่า ความยาวคลื่นเป็นระยะทางระหว่างการอัดอย่างต่อเนื่อง (Successive Compressions) หรือการเบาบางของอากาศ (Rare-factions) การอัด คือการที่บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันมากกว่าบริเวณรอบๆ ส่วนการเบาบางเป็นบริเวณเฉพาะ ที่เกิดการลดความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันสัมพันธ์กับแรงดันของบรรยากาศปกติ ความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = f * \lambda \quad (2.1)$$

โดยที่:  $V$  = ความเร็วของคลื่น (m/s)

$f$  = ความถี่ (Hz)

$\lambda$  = ความยาวคลื่น (m)

ในอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเร็วของคลื่นประมาณ 334 m/s ดังนั้นช่วงความถี่ของคลื่นเสียงระหว่าง 20 ถึง 20 KHz ความยาวคลื่นจะอยู่ระหว่างประมาณ 17m ถึง 1.7m ข้อจำกัดของความยาวคลื่นสั้นในอากาศ (อุลตราโซนิก) ถูกตรวจสอบโดยทางเดินที่เป็นอิสระระหว่างโมเลกุลอากาศ ซึ่งมีขนาดประมาณ  $10^{-8}$  cm

### 2.1.4.3 ความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิก

คลื่นที่เดินทางในตัวกลางที่แตกต่างกันด้วยความเร็วที่แตกต่าง และขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทั้งหมดนี้เป็นสาเหตุแรกสำหรับการโค้งตัวของคลื่นในบรรยากาศสำหรับทฤษฎีที่แสดงสำหรับความเร็วของคลื่น ( $c$ ) ในก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) จะเป็นดังนี้

$$v = \sqrt{\frac{\Gamma P}{\rho}} \quad (2.2)$$

โดยที่ :  $v$  = ความเร็วของคลื่นเสียง (m/s)

$\Gamma$  = ค่าโมดูลัส (modulus) ของก๊าซ (สำหรับอากาศคือ 1.4)

$P$  = ความดันของก๊าซ (Pascal)

ความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเล =  $1.01325 \times 10^6$  Pascal

$\rho$  = ความหนาแน่นของก๊าซ ( $\text{kgm}^{-3}$ )

ความหนาแน่นของอากาศ = 1.29

เนื่องจากในอากาศประกอบด้วยโมเลกุลอะตอมคู่ ดังนั้นค่า  $\Gamma = 1.4$  จะได้

$$v = \sqrt{\frac{1.4P}{\rho}} \quad (2.3)$$

ดังนั้นถ้าโมเลกุลของอากาศมีมวลเป็น  $M$  และปริมาตรเป็น  $V$  จะได้ความหนาแน่น

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.4)$$

จาก (2.2) จะได้

$$v = \sqrt{\frac{\Gamma P V}{M}} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จาก  $PV = RT$  (2.6)

โดยที่ :  $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศ

ดังนั้น  $v = \sqrt{\frac{\Gamma RT}{M}}$  (2.7)

จากสมการ 2.7 ความเร็วของคลื่นในก๊าซอุดมคติจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ กับอุณหภูมิ และเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แต่ในความเป็นจริงค่าความเร็วของคลื่น จะขึ้นอยู่กับค่าความดัน และความหนาแน่นของก๊าซด้วย กล่าวคือ ค่าความดันและความหนาแน่นของก๊าซ จะลดลง เมื่อความสูงเหนือจากระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น

ความเร็วที่ยอมรับของคลื่นในอากาศที่อุณหภูมิปกติ มีความสัมพันธ์ดังสมการคือ

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (2.8)$$

โดยที่ :  $v_1$  = ความเร็วของเสียงที่อุณหภูมิ  $T_1$  (m/s)

$v_2$  = ความเร็วของเสียงที่อุณหภูมิ  $T_2$  (m/s)

$T_1$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่หนึ่ง (K)

$T_2$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่สอง (K)

หรือ

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2.9)$$

โดยที่ :  $v$  = ความเร็วของเสียงที่อุณหภูมิใดๆ (m/s)

$v_0$  = ความเร็วเสียงที่  $0^\circ\text{C}$  (331.5 m/s)

$t$  = อุณหภูมิ ( $^\circ\text{C}$ )

## 2.2 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของคลื่น ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับ เมื่อคลื่นสะท้อนกลับจากวัตถุนั้น ความถี่ของคลื่นที่วัดได้จากตัวรับจะแตกต่างกับค่าความถี่ที่ทำการส่งออกไป ความถี่ที่แตกต่างนี้เรียกว่า การเลื่อนดอปเปลอร์ (Doppler shift) โดยความถี่ที่เลื่อนนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ (ก) ความเร็วของการเคลื่อนที่ (ข) มุมระหว่างทิศทางของคลื่นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ (ค) ความถี่ของคลื่นที่ส่งออกไปจากตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์จะเกิดขึ้นกับคลื่นทุกชนิด แต่ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวันจะเป็นกรณีของเสียง เช่น ในกรณีของรถฉุกเฉินขณะเปิดเสียงไซเรนกำลังตรงมายังผู้สังเกต จะพบว่าความถี่ของเสียงจะสูง และเมื่อรถได้ผ่านผู้สังเกตไปแล้วจะพบว่าความถี่เสียงจะต่ำกว่า

### 2.2.1 สมการดอปเปลอร์

สมการดอปเปลอร์มีทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งใช้ในกรณีต่างๆกัน

#### 2.2.1.1 ตัวรับเคลื่อนที่

ความถี่เคลื่อนดอปเปลอร์ในกรณีนี้จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงว่าความถี่ที่รับในขณะที่วิ่งเข้าหาแหล่งกำเนิดนั้นจะมีค่ามากกว่าตอนที่ตัวรับไม่เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$f_r = f_0 \left( \frac{C + V_r}{C} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่  $f_r$  คือ ความถี่ที่รับได้

$f_0$  คือ ความถี่ที่ส่ง

$V_r$  คือ ความเร็วของตัวรับ

$C$  คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง

สำหรับในกรณีที่ตัวรับเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด จะใช้สมการเดียวกับสมการข้างต้น เพียงแต่จะเป็นลบเท่านั้น

#### 2.2.1.2 แหล่งกำเนิดเคลื่อนที่

สมการความถี่ในกรณีที่ตัวส่งเคลื่อนที่ไปยังตัวรับคือ

$$f_e = f_0 \left( \frac{C}{C - V_s} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่  $f_e$  คือ ความถี่ที่รับได้

$f_0$  คือ ความถี่ที่ส่ง

$V_s$  คือ ความเร็วของตัวรับ

$C$  คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง

สำหรับในกรณีที่ตัวส่งเคลื่อนที่ออกจากตัวรับ จะใช้สมการเดียวกับสมการข้างต้น เพียงแต่จะเป็นลบเท่านั้น

#### 2.2.1.3 มีตัวสะท้อนที่เคลื่อนที่หรือการเคลื่อนที่ทั้งตัวรับและตัวส่ง

ในกรณีที่ตัวรับและตัวส่งเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_e = f_0 \left( \frac{C+V}{C-V} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วของของคลื่นหักเห (Scatterer speed)  
 แต่ในกรณีที่ตัวรับและตัวส่งเคลื่อนที่ออกจากกัน เครื่องหมายจะตรงข้ามโดย  
 ความถี่เลื่อนหาได้จากสมการ

$$f_D = f_e - f_o = f_e \left( \frac{2V}{C-V} \right) \quad (2.13)$$

โดยที่  $f_D$  คือ ความถี่เลื่อน  
 สำหรับการคำนวณความเร็วของวัตถุสามารถประยุกต์ใช้สมการ

$$f_D = \left( \frac{2f_e V \cos \theta}{C} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $f_D$  คือ ความถี่เลื่อน  
 $f_e$  คือ ความถี่ที่รับ  
 $V$  คือ ความเร็วของวัตถุที่ต้องการวัด  
 $C$  คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง  
 $\theta$  คือ มุมที่ทำการวัด

## 2.3 อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

### 2.3.1 ประเภทของอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานกลโดยการสั่นไปมาซึ่งทำให้เกิดเป็นคลื่นอุลตราโซนิคกระจายไปในวัตถุตัวกลาง หรือ จากพลังงานของคลื่น อุลตราโซนิคแปลงไปเป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้จากตัวทรานสดิวเซอร์นั้น ในปัจจุบันอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ตามหลักการที่ใช้สร้างคือ

2.3.1.1 เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างไฟฟ้าและพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่อยู่ค่าใดค่าหนึ่ง

2.3.1.2 แมกนีโตสทริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมา

ระหว่างไฟฟ้าในขดลวด กับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.3 อิเล็กโตรสทริกทีฟ (Electrostrictive Transducer)

ซึ่งแปลงไปมา

ระหว่างไฟฟ้าและพลังงานกล

ซึ่งในโครงการนี้จะกล่าวเฉพาะแบบเปียโซอิเล็กทริก เท่านั้น ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กัน

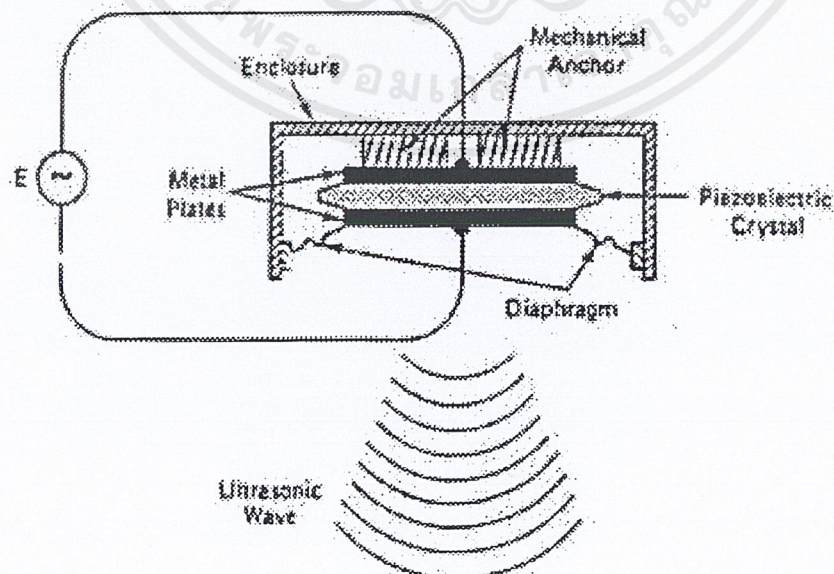
มาก

### 2.3.2 โครงสร้างของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

โครงสร้างของตัวออสซิลเลเตอร์โซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก โดยเฉพาะภายนอกตัว มักจะสร้างเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและมีความสูงประมาณ 10-25 mm ด้านหน้า จะทำเป็นช่องเปิดและมีตะแกรงติดอยู่เพื่อให้คลื่นออสซิลเลเตอร์โซนิคเข้ามาหรือออกจากช่องเปิดนี้ได้โดย สะดวก และตะแกรงนี้ยังป้องกันสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ถ้าตัวถังทำมาจากโลหะก็ควรต่อตัวถังลง กราวนด์เพื่อชิลด์ โดยบายพาสที่ขาข้างหนึ่งจะต่อกับตัวถังเพื่อลงกราวนด์ไว้เรียบร้อยแล้ว

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วย ชิ้นสารเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric element) ซึ่ง สามารถทำได้จากสารหลายชนิดเช่น ผลึกแร่ควอตซ์ (Quartz) แบเรียมติทานาต (Bariumtitanate) เกลือร็อกเชล (Rochelle salt) เป็นต้น และผลิตออกมาในรูปแบบของชิ้นสาร เซรามิก ซึ่งจะเป็นรูป สี่เหลี่ยมเสยโดยส่วนใหญ่

จากชิ้นสารเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่น เงินเพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กโตรดต่อไปนั่นเอง ด้านข้างหนึ่งของแผ่นเพลทจะถูกยึดเพื่อไม่ให้เกิด การสั่น ส่วนอีกด้านจะยึดกับแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้โดยแผ่นไดอะแฟร มนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายเลนส์ เพื่อรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในทั่วไป ของทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก

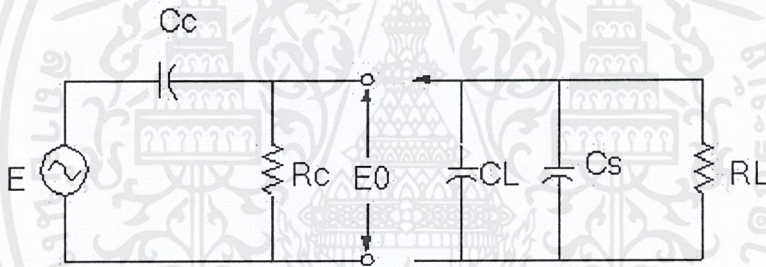
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีสัญญาณแรงดันมาคร่อมขั้วทั้ง 2 ของชั้นสารเซรามิก จะเกิดการโค้งงอซึ่งจะมากหรือน้อยหรือในทิศทางใดตามขนาด และทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณนั้นๆ ทำให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณนั้นออกไป โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตที่ออกมาจะตกประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป แต่กำลังเอาต์พุตจะสูงสุดที่ค่าประมาณนี้ ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชั้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆ กำลังเอาต์พุตจะลดลงกว่านี้มาก ในทำนองกลับกันเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ที่ตรงกันกับความถี่เรโซแนนซ์ของชั้นสารเซรามิกเข้ามา จะทำให้ชั้นสารโค้งงอไปมา และเกิดสัญญาณแรงดันซึ่งมีขนาดเล็กน้อยคร่อมขั้วทั้ง 2 ของมันเองได้

คุณสมบัติโดยทั่วไปของอุตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก ก็คือมีค่าความต้านทานสูงมากอาจสูงถึง 100 M $\Omega$  แต่ในขณะที่ทำงานความต้านทานทางด้านไฟสลับจะลดลง

### 2.3.3 วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 2.9 วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์

$C_c$  = คาปาซิแตนซ์ ของชั้นส่วนเปียโซอิเล็กทริก

$R_c$  = leakage Resistance ของเปียโซอิเล็กทริก

$C_L$  = คาปาซิแตนซ์ของ Stage (load) รวมกับ connecting cable ที่ความถี่ปานกลางและที่ความถี่สูง โวลต์เตจ  $E_0$  ได้มาจากสมการ

$$E_0 = \frac{EC_c}{C_c + C_L} \quad (2.10)$$

โดยขึ้นกับความถี่ ถ้าเอาต์พุตโวลต์เตจมีค่ามาก สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มค่า  $C_L$  ต่อขนานเข้าไปที่ความถี่ค่าโวลต์เตจ  $E_0$  คร่อมโหลดหาได้โดยค่ารีแอคแตนซ์ของ  $C_c$  และอิมพีแดนซ์ขง  $C_L$  และ  $R_L$  ที่ต่อขนานกัน โวลต์เตจ  $E_0$  ขึ้นกับความถี่และจะลดลงถ้าความถี่ลดลงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองความถี่ต่ำสามารถปรับปรุงได้โดย การใช้ทรานสดิวเซอร์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์สูงหรือ โดยการเพิ่มความต้านทานโหลด  $R_L$

## 2.4 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

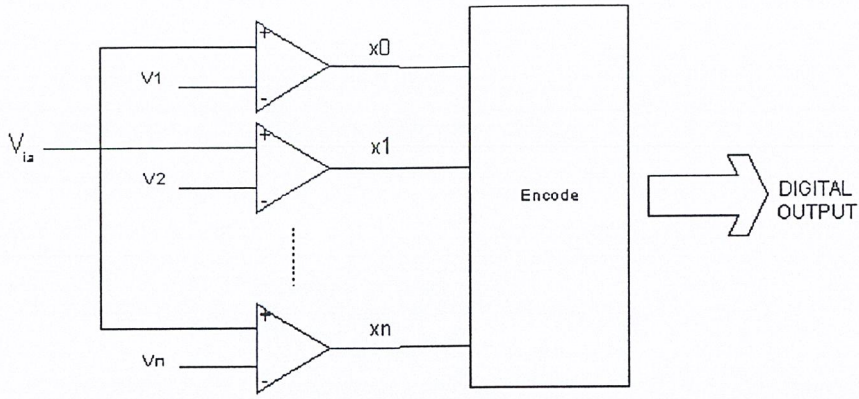
การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converters : ADC) มีความสำคัญมากในกระบวนการของการประมวลผลแบบดิจิทัลของสัญญาณอนาลอก ดังนั้น อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยคุณลักษณะของอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ดีจะต้องทำการแปลงสัญญาณ โดยให้มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณเดิมมากที่สุด มีความเพี้ยนต่ำ และใช้เวลาการแปลงน้อย

ชนิดของวงจร ADC สามารถแบ่งได้หลายชนิด เช่น แบ่งตามลักษณะของวิธีการแปลง แบ่งตามลักษณะการทำงานของวงจรรภายใน และแบ่งตามความเร็วในการแปลงสัญญาณ โดยในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงวงจร ADC ตามความเร็วในการแปลงสัญญาณ โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ชนิด คือ 1. วงจร ADC ความเร็วต่ำ 2. วงจร ADC ความเร็วปานกลาง 3. วงจร ADC ความเร็วสูง โดยแต่ละชนิดจะถูกใช้งานที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาน้อย โดยหลักการและการทำงานของ ADC แต่ละชนิดจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 2.4.1 หลักการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

หลักการของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล คือการเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณต่อเนื่องค่าหนึ่งๆ ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าสอดคล้องกัน โดยจำนวนบิตของสัญญาณดิจิทัลจะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของการเปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้าต้องการความละเอียดสูงก็จะต้องใช้จำนวนบิตทางด้านเอาต์พุตจำนวนสูงตามไปด้วย โดยวิธีการแปลงจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแนวคิดของหลักการนั้นๆ

หลักการเบื้องต้นของวงจร ADC แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้ สัญญาณต่อเนื่องเข้าที่จุด  $V_{IA}$  จะป้อนเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบสัญญาณจำนวน  $2^{N-1}$  ( $N$  คือจำนวนบิตของวงจร ADC) วงจรที่ต่อขนานกัน โดยแต่ละวงจรจะมีระดับสัญญาณอ้างอิง  $V_I$  แตกต่างกันโดยที่  $I$  เป็นค่าใดๆ ตั้งแต่ 0 ถึง  $2^{N-1}$  ค่า สัญญาณจุดออก  $X_I$  ของแต่ละวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะนำไปเข้ารหัสโดยวงจรเข้ารหัส (Encoder) เพื่อเปลี่ยนค่าสัญญาณที่จุดออกเหล่านั้น ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่สอดคล้องกับสัญญาณต่อเนื่องที่จุดเข้า

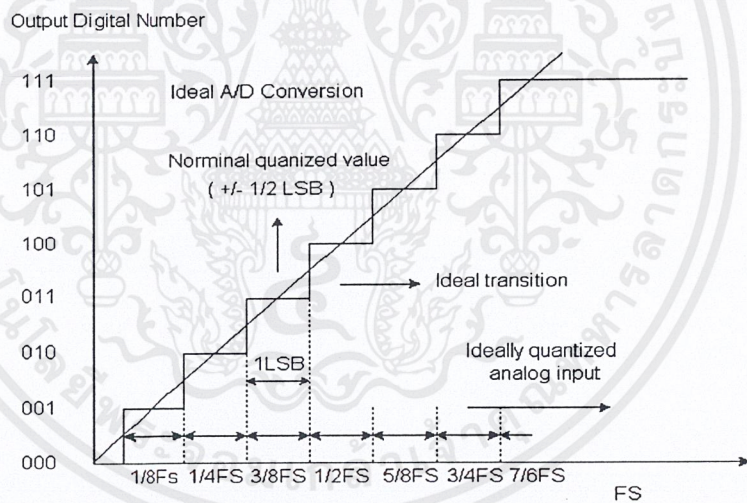


รูปที่ 2.10 หลักการเบื้องต้นของวงจร ADC

$$X_i = 1 \text{ if } V_{IA} > V_i$$

$$X_i = 0 \text{ if } V_{IA} < V_i$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อเนื่อง  $V_{IA}$  และสัญญาณดิจิทัล  $D_{OUT}$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 สำหรับรายละเอียดและหลักการของวงจร ADC แต่ละประเภทจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อเนื่อง และสัญญาณดิจิทัลขนาด 3 บิต

### 2.4.2 ความสัมพันธ์ของ ADC

สัญญาณทางกายภาพจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาลอก และถูกกำหนดให้เป็นระดับของแรงดันหรือกระแสใดๆ เทียบกับกราวด์ ส่วนสัญญาณดิจิทัลจะอยู่บนพื้นฐานของระบบเลขฐานสอง นั่นคือแต่ละบิตหรือหน่วยของข่าวสารจะมีความเป็นไปได้สองสถานะ คือ “0” และ “1” โดยที่ “0” อาจจะถูกกำหนดให้เป็นระดับสัญญาณค่าหนึ่งที่มีระดับของสัญญาณต่ำ และ “1” เป็นระดับสัญญาณอีกค่าหนึ่งที่มีระดับของสัญญาณสูงกว่า

สัญญาณดิจิทัลหรือรหัสดิจิทัลจะแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า เวิร์ด (Word) ซึ่งมาจาก ขบวนการจัดระดับของสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเรียกว่าการควันไทซ์ (Quantized) โดยจะมีที่บิตนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของกระบวนการ ตัวอย่างรหัสสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต “1001010100” “1” ทางซ้ายมือสุดของเวิร์ดเรียกว่า บิตนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit, MSB) และ ทางขวามือสุดของเวิร์ดเรียกว่า บิตนัยสำคัญต่ำสุด (Least Significant Bit, LSB) ซึ่งจะเห็นว่าค่าน้ำหนักประจำตำแหน่งหรือค่านัยสำคัญสูงสุดของแต่ละบิต จะมีคุณลักษณะ เฉพาะตัวซึ่งจะแสดงอยู่ในภาพของตัวแปรอนาลอก (analog variable) โดยที่เราไม่สามารถทราบ ความหมายของรหัสเหล่านี้ได้เลยจนกว่าจะมีการกำหนดความสัมพันธ์ของการแปลงรหัสก่อน

โดยทั่วไปรหัสไบนารีส่วนใหญ่จะถูกแสดงด้วยเลขจำนวนเต็ม ตัวอย่างรหัสไบนารีที่เป็น เลขจำนวนเต็มขนาด บิต n บิต LSB จะมีน้ำหนักประจำบิต (weight)  $2^0 (= 1)$  บิตถัดมาจะมีน้ำหนัก  $2^1 (= 2)$  ในบิตต่อๆมาจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงบิต MSB ซึ่งจะมีน้ำหนักเป็น  $2^{n-1}$  จะเห็นว่าค่าน้ำหนักของรหัสไบนารีที่เป็นจำนวนเต็ม จะมีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามจำนวนบิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าของแต่ละเวิร์ดที่เป็นไปได้จะมีค่าจาก 0 ถึง  $2^n - 1$  ด้วยเหตุนี้วิธีการแปลงสัญญาณจึงต้อง กำหนดค่าเต็มสเกล (Full Scale) ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงของการแปลง (Converter's reference) ดังนั้นการ เข้ารหัสส่วนใหญ่ จึงเป็นรหัสเศษส่วน (Fractional binary) รหัสไบนารีที่เป็นจำนวนเต็มสามารถ แสดงเป็นรหัสไบนารีที่เป็นเศษส่วนได้ ถ้าทุกๆบิตของจำนวนเต็มถูกหารด้วย  $2^n$  ตัวอย่างเช่นบิต MSB จะมีน้ำหนักเป็น  $2^{n-1}$  และบิตต่อๆมาจะมีน้ำหนักเป็น  $2^{n-2}$  และในบิตต่อๆมาค่าน้ำหนัก ประจำบิตจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงบิต LSB ซึ่งจะมีน้ำหนักเป็น  $2^0$  ดังนั้นค่าของแต่ละเวิร์ดที่เป็นไป ได้จะมีค่าจาก 0 ถึง  $(1 - 2^{-n})$  ของค่าเต็มสเกล ถึงแม้ว่าจำนวนบิตจะเพิ่มเป็นจำนวนเท่าไรก็ตาม ก็จะไม่ มีผลกระทบต่อพิสัยของค่าเต็มสเกล (Full-scale Range) ดังนั้นค่าเต็มสเกลจึงเป็นตัวปรับให้เป็น ค่าปกติ (Normalize) ให้กับไบนารีเศษส่วนนั่นเอง โดยค่าน้ำหนักประจำบิตที่ LSB จะถูก กำหนดให้เป็นค่าความละเอียด (Resolution) ของการแปลง ซึ่งยิ่งใช้จำนวนบิตสูงก็จะทำให้ค่า ความละเอียดของการแปลงสูงตามไปด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ของการแปลงแสดงได้จากสมการที่

$$D_{approx} = FS \left( \frac{b_{n-1} 2^{n-1}}{2^n} + \frac{b_{n-2} 2^{n-2}}{2^n} + \dots + \frac{b_{n-n} 2^{n-n}}{2^n} \right) \quad (2.11)$$

- $b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_{n-n}$  เป็นค่าดิจิทัลของบิตแต่ละบิตของรหัสไบนารี จำนวน n บิต
- $D_{approx}$  เป็นค่าประมาณของเลขฐานสิบที่ได้จากการแปลงรหัสไบนารี
- FS เป็นค่าเต็มสเกลของการแปลง
- n เป็นจำนวนบิตสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.11) จะเห็นได้ว่าค่า FS มีค่าเท่ากับ 1 หน่วย ซึ่งค่าของ FS จะมีพิสัย เท่าไรก็ได้โดยที่ค่าเต็มสเกล FS เสมือนกับว่ากระทำตัวเป็นค่าอ้างอิงให้กับการแปลง ดังนั้นค่า  $D_{\text{approx}}$  ที่ได้จากสมการ (2.11) จะมีความมากที่สุดไม่เกินค่าเต็มสเกล FS เมื่อพิจารณาค่าของ  $D_{\text{approx}}$  ที่ได้จากสมการ (2.11) ค่า  $D_{\text{approx}}$  สูงสุดที่ได้นี้ จะมีค่าน้อยกว่าค่าเต็มสเกลอยู่ 1 ระดับค่าของ LSB เสมอ ดังนั้นถ้าหากมีจำนวนบิตมากขึ้นจะยิ่งทำให้ค่าประมาณที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเต็มสเกลมากขึ้น และถ้าเราให้  $D_{\text{approx}}$  ทางซ้ายมือของสมการที่ (2.11) เป็นค่าสัญญาณอนาลอกอินพุตที่ประมาณค่าได้ ( $D_{\text{approx}} = I_{\text{in}}$ ) จึงทำให้สมการที่ (2.11) มีรูปแบบดังสมการที่ (2.12)

$$I_{\text{in}} = \frac{FS}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i \quad (2.12)$$

เมื่อ  $I_{\text{in}}$  เป็นสัญญาณอนาลอกที่ได้จากการแปลง  
 FS เป็นสัญญาณอนาลอกเต็มสเกล  
 $n$  เป็นจำนวนบิต  
 $b_i$  เป็นค่าของบิตใดๆ

### 2.4.3 วงจร ADC ความเร็วต่ำ

วงจร ADC ความเร็วต่ำคือวงจรที่ใช้จำนวนสัญญาณนาฬิกา สำหรับการแปลงมากกว่าจำนวนบิตที่ได้ทางเอาต์พุต โดยทั่วไปวงจร ADC แบบนี้จะมีขนาดเล็ก ลักษณะการทำงานของวงจรไม่ซับซ้อนโดยมากจะใช้หลักการของการนับ เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณขึ้นอยู่กับค่าระดับสัญญาณต่อเนื่องที่ป้อนเข้าสู่วงจร สามารถแปลงสัญญาณที่ต้องการความละเอียดสูงได้ดีคือจำนวนบิตมาก วงจร ADC ที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่วงจร Single slope ADC และวงจร Dual slope ADC ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.4.3.1 Single slope ADC หรือ Pulse width modulation ADC

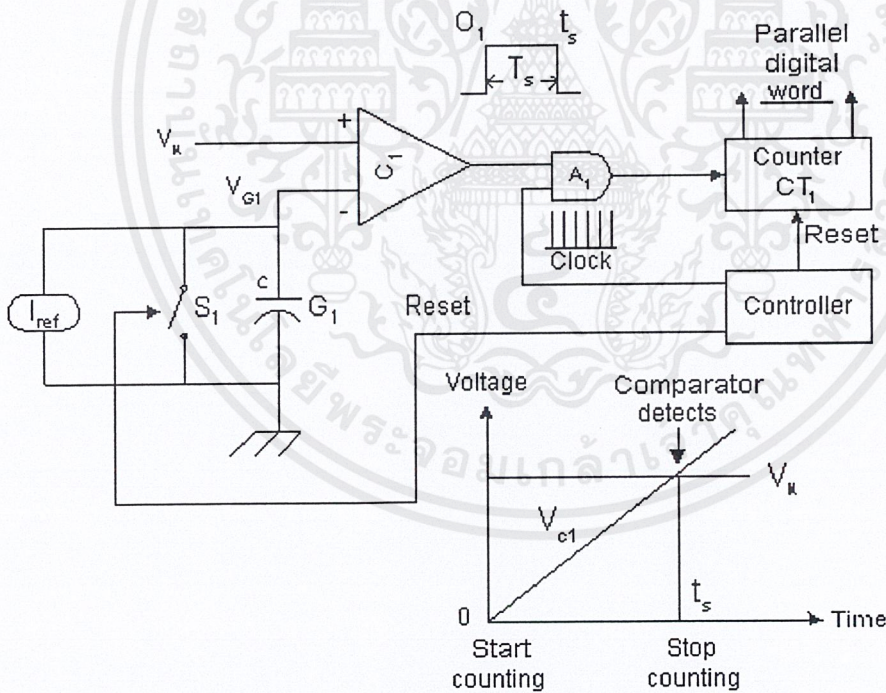
วงจร ADC แบบนี้มีหลักการการทำงานแปลงสัญญาณต่อเนื่อง ให้อยู่ในภาพของพัลส์ที่ขนาดความกว้างแปรตามเวลา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระดับสัญญาณต่อเนื่อง ที่ต้องการแปลงค่าและสัญญาณดิจิทัลจะได้จากการนับสัญญาณความถี่อ้างอิงที่เกิดขึ้น ในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุด สัญญาณของพัลส์ วงจรพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 วงจรประกอบด้วย วงจรสร้างสัญญาณ ramp  $G_1$ , วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ  $C_1$ , วงจรแอนด์เกต (AND gate)  $A_1$ , วงจรนับแบบไบนารี  $CT_1$ , และวงจรควบคุม การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณต่อเนื่องเข้าที่จุด  $V_{\text{in}}$  ถูกป้อนเข้าสู่ขาบวก (+) ของวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  โดยวงจรควบคุมจะทำการส่งสัญญาณรีเซ็ตไปทำการ

รีเซทวงจรสร้างสัญญาณ  $G_1$  เพื่อให้วงจร  $G_1$  สร้างสัญญาณ ramp 0 โวลต์ โดยการอินทิเกรต สัญญาณกระแสอ้างอิง ได้ศักดาจุดออกวงจร  $V_{G1}$  ซึ่งมีค่าแปรตามเวลา ตามสมการที่ (2.13)

$$V_{G1}(t) = K \int_0^{t_s} I_{ref} dt \tag{2.13}$$

โดยที่  $K$  เป็นค่าคงที่ และ  $t_s$  เป็นเวลาที่ค่าสัญญาณจุดออก  $V_{G1}(t)$  เท่ากับ  $V_{IA}$

จุดออกของวงจรสร้างสัญญาณ  $G_1$  จะต่อกับขาลบ (-) ของวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  ณ เวลา  $t$  ใดๆถ้าสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA} > V_{G1}(t)$  สัญญาณจุดออกของวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  จะเป็น “1” ซึ่งทำให้ วงจรแอนด์เกต  $A_1$  ทำงานส่งสัญญาณนาฬิกาความถี่  $F$  ซึ่งเท่ากับ  $1/T_{clk}$  เข้าสู่วงจรนับ  $CT_1$  และเมื่อ  $V_{G1}(t) = V_{IA}$  ให้เวลาขณะนั้นเป็น  $t_s$  สัญญาณจุดออกจากวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  จะเปลี่ยน เป็น “0” ค่าดังกล่าวจะทำให้แอนด์เกต  $A_1$  ไม่สามารถส่งสัญญาณนาฬิกาไปยังวงจรนับ  $CT_1$  ได้ ทำให้การสิ้นสุด



รูปที่ 2.12 วงจรพื้นฐานของวงจร Single slope ADC

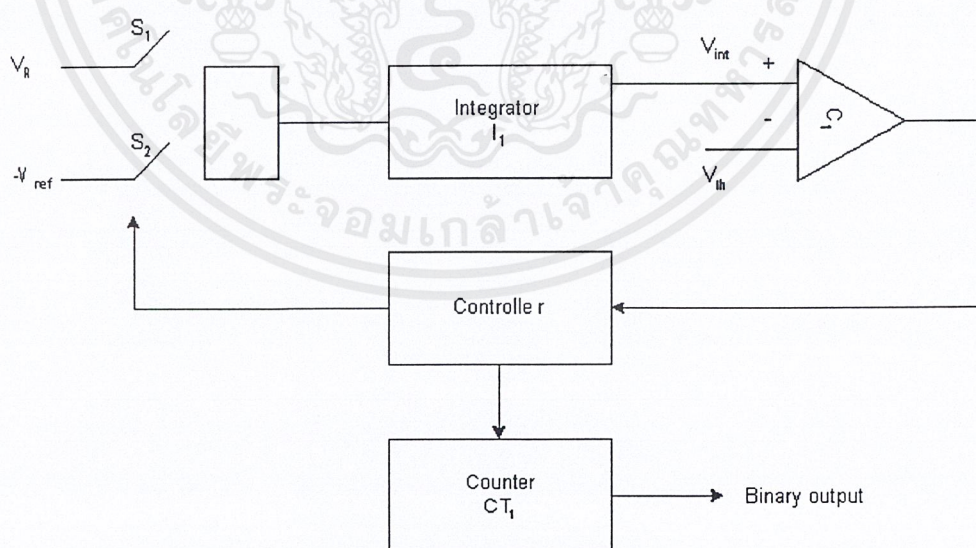
จำนวนสัญญาณนาฬิกาที่  $CT_1$  นับได้ในช่วงคาบเวลา  $T_s$  วงจรควบคุมการทำงานจะทำการ แปลงสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าเทียบเท่ากับสัญญาณต่อเนื่อง  $V_{IA}$

ข้อเสียของวงจรนี้คือคาบเวลา  $T_s$  ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ จะแปรตามระดับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  ทั้งนี้เนื่องจากวงจร ADC นี้ใช้ในการนับสัญญาณนาฬิกาในช่วงคาบเวลาที่ ระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเปรียบเทียบ  $V_{G1}(t)$  มีค่าการแปลงจาก 0 โวลต์ ไปจนกระทั่งมีค่าเท่ากับสัญญาณจุดเข้า  $V_{IA}$  ดังนั้นจึงจับการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้ที่ละ 1 พัลส์ของสัญญาณนาฬิกาหรือทีละ 1 ระดับสัญญาณดิจิทัล LSB เท่านั้น นอกจากนี้เสถียรภาพการและความแม่นยำของวงจร ขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของวงจรสร้างระดับสัญญาณ ramp และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

#### 2.4.4 Dual slope ADC หรือ Up-down integrator

วงจรนี้เป็นวงจรอีกรูปแบบหนึ่งของวงจร Pulse width modulator ADC โดยจะมีความซับซ้อนและความเที่ยงตรงในการทำงานของวงจรเพิ่มขึ้น หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร คือ การสร้างพัลส์ขึ้นมาหนึ่งลูกในหนึ่งรอบการแปลงสัญญาณ ความกว้างของพัลส์ถูกคำนวณจากเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าและสัญญาณอ้างอิง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ การอินทิเกรตครั้งแรกเป็นการอินทิเกรตสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า ภายในระยะเวลาที่กำหนดแน่นอนค่าหนึ่งให้เป็น  $t_1$  ซึ่งจะได้สัญญาณจุดออกของวงจรอินทิเกรต ณ เวลานั้นแตกต่างกันตามขนาดของสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า หลังจากนั้นวงจรจะสร้างพัลส์เพื่อคำนวณหาค่าสัญญาณดิจิทัลโดยทำการอินทิเกรตสัญญาณอ้างอิงในทิศทางลบจนกระทั่งสัญญาณจุดออกของวงจรอินทิเกรต มีค่าเท่ากับระดับสัญญาณที่ถูกกำหนดแน่นอนค่าหนึ่งให้มีค่าเท่ากับ  $V_{th}$  และระยะเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $t_2$  กรณีที่สัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าต่างกันค่าเวลา  $t_2$  ของการทำงาน ก็จะแตกต่างกันด้วยจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาพัลส์  $t_2$  วงจรควบคุมการทำงานจะแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลที่เทียบเท่ากับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า



รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานของ Dual slope ADC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 วงจรประกอบด้วยวงจรมินิเกรท  $I_1$ , วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ  $C_1$ , วงจรควบคุมการทำงาน, วงจรนับแบบไบนารี  $CT_1$ , สวิตช์  $S_1$  และ สวิตช์  $S_2$  โดยที่ สวิตช์  $S_1$  และ สวิตช์  $S_2$  จะทำงานตรงข้ามกันตลอด การทำงานอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  ป้อนเข้าสู่วงจร วงจรควบคุมการทำงานจะส่งสัญญาณรีเซท ไปทำการรีเซทค่าศักดาจุดออก  $V_{int}$  ของวงจรมินิเกรท  $I_1$  จาก 0 โวลต์ ให้มีค่าเท่ากับ  $V_{th}$  ซึ่งเป็นค่าระดับศักดา threshold ของ  $C_1$  หลังจากนั้นวงจรควบคุมการทำงานจะส่งสัญญาณไปปิดสวิตช์  $S_1$  เพื่อส่งผ่านสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  ไปยังวงจรมินิเกรท  $I_1$  เพื่อทำการอินทิเกรทสัญญาณ เป็นระยะเวลาเท่ากับ  $N_{ref}T$  ซึ่งเป็นระยะเวลาอ้างอิงที่กำหนด ได้สัญญาณจุดออกจากวงจรมินิเกรท  $I_1$  เป็น  $V_{int}$  ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{IA}$  กับ  $V_{int}$  แสดงได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\begin{aligned} V_{int}(t) &= K \int_0^{N_{ref}T} V_{IA} dt + V_{int}(0) \\ &= KN_{ref}TV_{IA} + V_{th} \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่  $K$  เป็นค่าคงที่

หลังจากนั้นวงจรควบคุมจะเปิดสวิตช์  $S_1$  และ ปิดสวิตช์  $S_2$  เพื่อส่งผ่านศักดาอ้างอิง ( $-V_{ref}$ ) เข้าสู่วงจรมินิเกรท  $I_1$  ซึ่งวงจรมินิเกรทมี slope การทำงานของวงจรเป็นลบ (-) ใน ขณะเดียวกันนั้นวงจรมินิเกรท  $CT_1$  จะเริ่มทำการนับสัญญาณนาฬิกาไปจนกระทั่ง  $V_{int}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{th}$  ซึ่งเป็นค่าระดับศักดาที่กำหนด วงจรมินิเกรท  $CT_1$  จะหยุดทำการนับ ให้ระยะเวลาที่วงจรมินิเกรท  $CT_1$  ทำงานเท่ากับ  $N_{OUT}T(t_2)$  วงจรควบคุมการทำงานจะทำการแปลงจำนวนสัญญาณนาฬิกา  $N_{OUT}$  ที่นับได้เป็นสัญญาณดิจิทัล ที่เทียบเท่ากับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  สมการแสดงความสัมพันธ์ในช่วง slope ขาลงระหว่าง ( $-V_{ref}$ ) กับ  $V_{int}$  แสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$V_{int}(t) = V_{int}(0) + K \int_0^{N_{OUT}T} (-V_{ref}) dt \quad (2.15)$$

เมื่อ  $t = N_{OUT}T$  จะได้ว่า

$$V_{int}(N_{OUT}T) = V_{int}(0) - KN_{OUT}TV_{ref} \quad (2.16)$$

จาก  $V_{int}(0) = KN_{ref}TV_{IA} + V_{th}$  ดังนั้น

$$V_{int}(N_{OUT}T) = [KN_{ref}TV_{IA} + V_{th}] - KN_{OUT}TV_{ref} \quad (2.17)$$

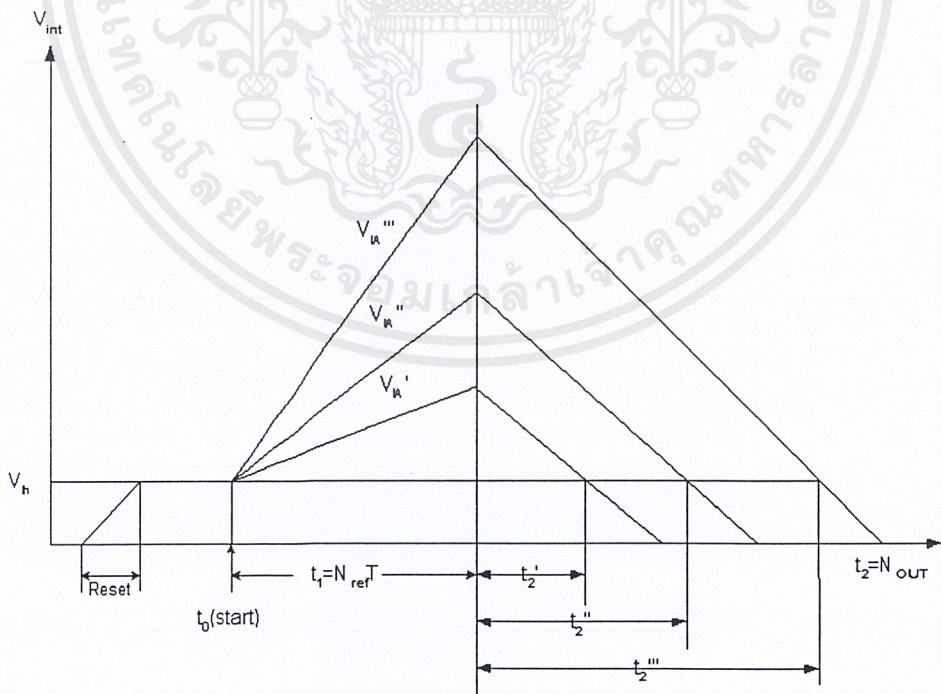
เนื่องจาก  $V_{int}(N_{OUT}T) = V_{th}$  ดังนั้น

$$V_{ref}(N_{OUT}T) = V_{IA}N_{ref} \quad (2.18)$$

หรือ

$$N_{OUT} = N_{ref} \left[ \frac{V_{IA}}{V_{ref}} \right] \quad (2.19)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักดาออกของวงจรอินทิเกรท  $V_{int}$  และเวลา  $t$  เป็นดังรูปที่ 2.14 และจากสมการที่ (2.17) จะเห็นได้ว่าการทำงานของวงจรมีไม่ขึ้นกับค่าศักดา Threshold ของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ, slope ของวงจรอินทิเกรท หรือสัญญาณนาฬิกา แต่การทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับระดับของศักดาจุดเข้าเท่านั้น ทำให้การทำงานของวงจรมีความเที่ยงตรงแม่นยำ สำหรับในกรณีที่สัญญาณต่อเนื่องจุดเข้ามีค่าเต็มสเกล (ระดับศักดาจุดเข้าสูงสุด) เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจะมีค่ามากที่สุดคือ  $2^{N+1}T$  วินาที โดยที่  $N$  เป็นจำนวนบิตที่ต้องการ



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาออกของวงจรอินทิเกรท  $V_{int}$  กับเวลา

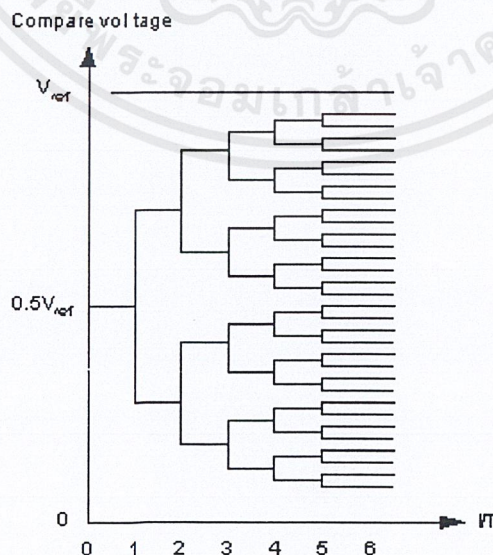
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.5 วงจร ADC ความเร็วปานกลาง

วงจร ADC ความเร็วปานกลางเป็นวงจร ADC ที่มีการทำงานเป็นแบบอนุกรม คือในการแปลงสัญญาณหนึ่งครั้งจะได้สัญญาณดิจิทัลหนึ่งบิต เมื่อเปรียบเทียบกับวงจร ADC ความเร็วต่ำ วงจร ADC ประเภทนี้จะซับซ้อนมากกว่า เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณไม่ขึ้นกับค่าระดับสัญญาณ ต่อเนื่องที่ป้อนเข้าสู่วงจร แต่ขึ้นกับจำนวนบิตที่ต้องการ วงจร ADC ที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่ วงจร Successive approximation ADC และวงจร Algorithmic ADC ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

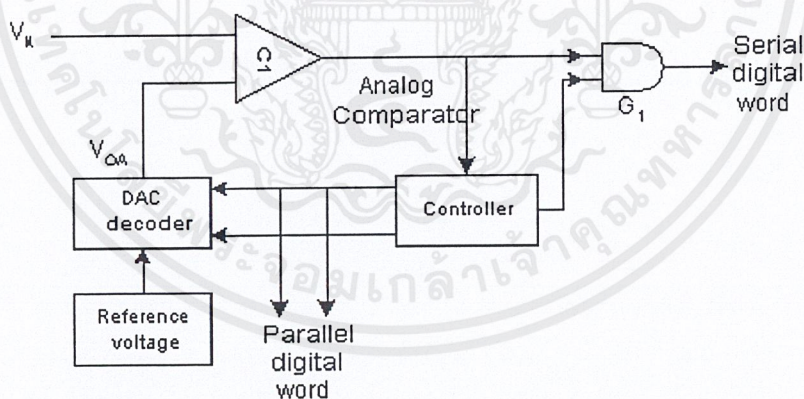
#### 2.4.51 Successive approximation ADC

วงจรมีหลักการพื้นฐานคือ วงจรทำการแปลงสัญญาณต่อเนื่องให้เป็นสัญญาณดิจิทัลทีละหนึ่งบิต เริ่มต้นจากบิต MSB ไปยังบิต LSB นั่นคือการแปลงสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าจะทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณเปรียบเทียบค่าหนึ่งๆ โดยในแต่ละรอบการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้าทำการเปรียบเทียบจะมีค่าต่างกัน ในรอบแรกค่าสัญญาณเปรียบเทียบจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของสัญญาณเต็มสเกลที่วงจรสามารถยอมรับได้ในกรณีที่สัญญาณต่อเนื่องจุดเข้ามากกว่าสัญญาณดิจิทัลบิต MSB จะมีค่าเป็น “1” แต่ถ้าสัญญาณต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าสัญญาณเปรียบเทียบ สัญญาณดิจิทัลบิต MSB จะมีค่าเป็น “0” หลังจากนั้นวงจรจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อหาค่าสัญญาณดิจิทัลบิตถัดไป โดยการเพิ่มหรือลดค่าสัญญาณเปรียบเทียบจากค่าเดิมอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับว่าสัญญาณจุดออกของวงจรเปรียบเทียบมีค่าอะไร ถ้าสัญญาณมีค่าเป็น “1” วงจรจะเพิ่มค่าสัญญาณเปรียบเทียบ แต่ถ้าสัญญาณนั้นมีค่าเป็น “0” วงจรจะลดค่าสัญญาณเปรียบเทียบลง การทำงานของวงจรสำหรับบิตถัดไป ก็จะปฏิบัติตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจนกว่าจะครบตามจำนวนบิตที่ต้องการ รูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณต่อเนื่องกับสัญญาณเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.15



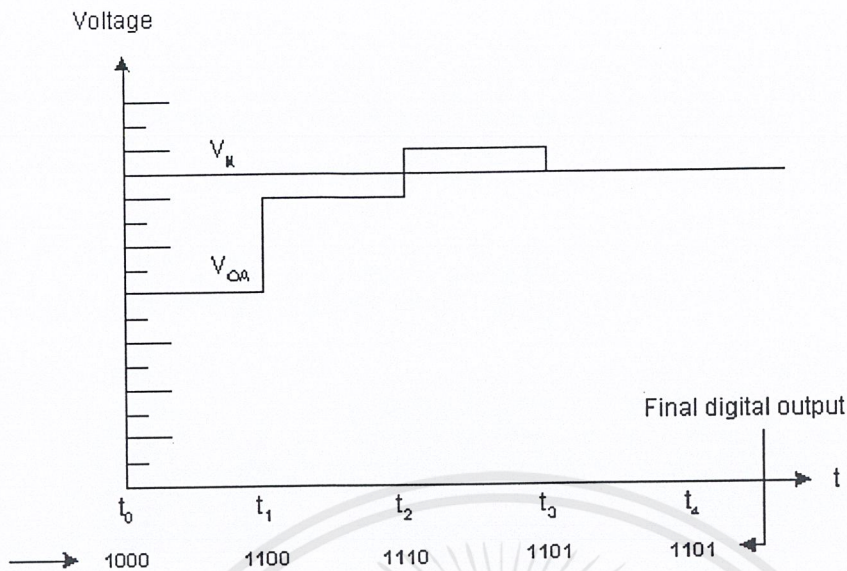
รูปที่ 2.15 รูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณต่อเนื่องกับสัญญาณเปรียบเทียบ

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์เป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.16 วงจรประกอบไปด้วย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ  $C_1$ , วงจรเกท  $G_1$ , วงจรควบคุมการทำงาน, วงจร DAC และแหล่งจ่ายศักดาอ้างอิง การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณต่อเนื่องเข้าจุด  $V_{IA}$  ป้อนเข้าสู่ วงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  วงจรควบคุมการทำงาน จะกำหนดค่าเริ่มต้นของสัญญาณจุดเข้าบิต MSB ของวงจร DAC ให้เป็น “1” และค่าบิตอื่นๆ ให้เป็น “0” วงจร DAC จะทำการแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณต่อเนื่องจุดออก  $V_{OA}$  ซึ่งต่อเข้าไปยังวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณจุดเข้า  $V_{IA}$  ถ้า  $V_{IA} > V_{OA}$  สัญญาณจุดออกของวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  จะเป็น “1” แต่ถ้า  $V_{IA} < V_{OA}$  สัญญาณขาออกของ  $C_1$  จะเป็น “0” ค่าสัญญาณจุดออกของวงจร  $C_1$  นี้จะส่งไปยังวงจรควบคุมการทำงาน เพื่อที่จะนำไปใช้ในการกำหนดค่าสัญญาณเปรียบเทียบในครั้งต่อไป และสำหรับสัญญาณดิจิทัลของบิตนั้นจะส่งไปยังวงจรถัดไปผ่านทางวงจรเกท  $G_1$  ซึ่งการทำงานของเกท  $G_1$  จะถูกควบคุมโดยจังหวะสัญญาณนาฬิกา หลังจากนั้นวงจรจะเริ่มดำเนินการทำงานเพื่อหาบิตถัดไปตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น โดยวงจรควบคุมการทำงานจะกำหนดบิต ที่ถูกพิจารณาต่อไปให้มีค่าเป็น “1” สำหรับบิตที่เปรียบเทียบไปแล้วจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ป้อนเข้าสู่ วงจร DAC วงจรจะสิ้นสุดการทำงานในการแปลงสัญญาณต่อเนื่องหนึ่งค่าเมื่อวงจรได้ทำการแปลงสัญญาณจนครบตามจำนวนบิตที่ต้องการ



รูปที่ 2.16 วงจรพื้นฐานของ Successive approximation ADC

ตัวอย่างความสัมพันธ์ของสัญญาณต่อเนื่องจุดออก  $V_{OA}$  จาก DAC กับสัญญาณต่อเนื่องขาเข้า  $V_{IA}$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของสัญญาณต่อเนื่องจุดออก  $V_{OA}$  จาก DAC กับสัญญาณต่อเนื่องขาเข้า  $V_{IA}$

ข้อดีของวงจรชนิดนี้คือ ใช้ขั้นตอนในการแปลงสัญญาณเพียง  $N$  ขั้นตอนเท่านั้น โดยที่  $N$  เป็นจำนวนบิตที่ต้องการ ทำให้ความเร็วในการแปลงสัญญาณดีกว่าวงจร ADC ความเร็วต่ำทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น แต่ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของวงจรขึ้นอยู่กับวงจร DAC ที่ใช้ในวงจร ซึ่งจะต้องมีค่าความผิดพลาดในการทำงานไม่เกิน  $0.5 \text{ LSB}$  มิฉะนั้น จะทำให้สัญญาณของวงจร ADC มีความผิดพลาดมาก

#### 2.4.6 Algorithmic ADC

หลักการแปลงสัญญาณของวงจรจะเริ่มต้นจากบิต MSB ไปหาบิต LSB วงจรประกอบไปด้วยวงจรย่อยหรือวงจร ADC ขนาดหนึ่งบิตจำนวนเท่ากับจำนวนบิตที่ต้องการ ต่ออนุกรมกัน โดยวงจรย่อยแต่ละวงจรมีหลักการทำงานดังนี้คือ วงจรจะทำการขยายสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าเป็นสองเท่า แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปบวกหรือลบกับสัญญาณอ้างอิงของวงจร ผลลัพธ์ที่ได้จะส่งผ่านเป็นสัญญาณจุดเข้าสำหรับวงจรย่อยบิตถัดไป การบวกหรือการลบสัญญาณที่กล่าวมาข้างต้นขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของสัญญาณจุดเข้าของวงจรย่อยนั้น ถ้าสัญญาณจุดเข้าเป็นบวก (+) วงจรจะลบสัญญาณอ้างอิงจากสัญญาณจุดเข้า และสัญญาณดิจิทัลสำหรับบิตนี้จะมีค่าเป็น "1" แต่ถ้าสัญญาณจุดเข้าเป็นลบ (-) วงจรจะสั่งให้ทำการบวกสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน สัญญาณดิจิทัลที่ได้จะมีค่าเป็น "0"

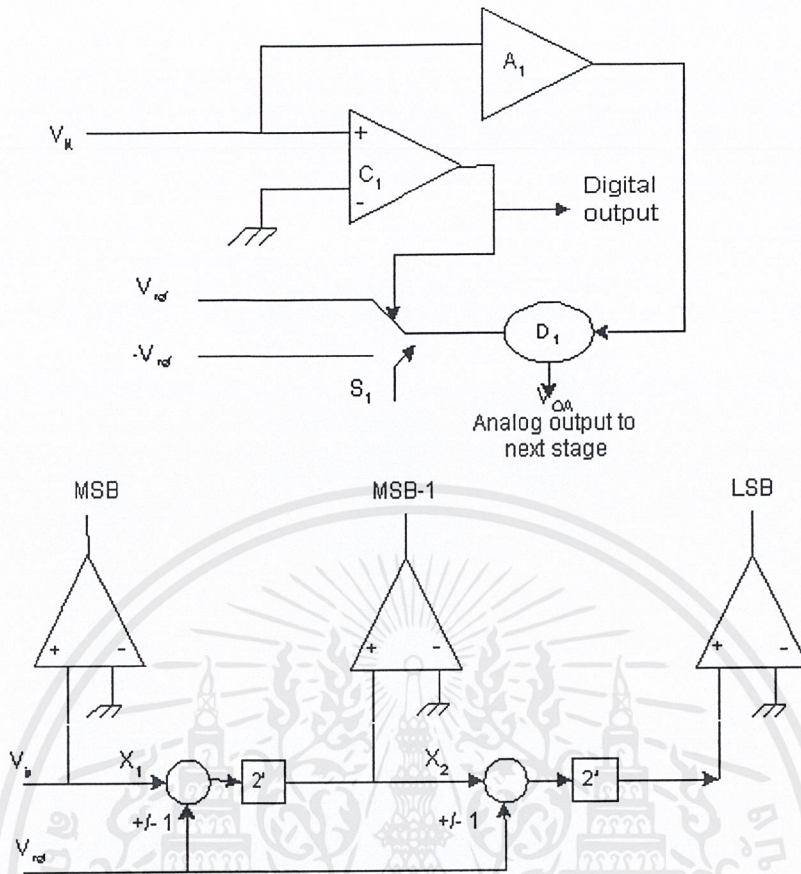
รายละเอียดพื้นฐานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 วงจรย่อยแต่ละวงจรประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ  $C_1$ , วงจรขยายสัญญาณขนาดสองเท่า  $A_1$ , วงจรบวก  $D_1$ , วงจรควบคุมการทำงานและ สวิตช์  $S_1$  เมื่อสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  ป้อนเข้าสู่วงจรย่อยวงจรแรก สัญญาณจุดเข้า  $V_{IA}$  จะเปรียบเทียบกับระดับศักดาติน (0 โวลท์) สัญญาณจุดเข้า  $V_{IA} > 0$  สัญญาณจุดออกจากวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  จะมีค่าเป็น “1” วงจรควบคุมสวิตช์  $S_1$  ให้ส่งผ่านค่าสัญญาณอ้างอิง  $-(V_{ref})$  ไปทำการบวกสัญญาณจุดเข้าที่ผ่านวงจขยายคือ  $2V_{IA}$  แต่ถ้า  $V_{IA} < 0$  สัญญาณจุดออกจากวงจรเปรียบเทียบ  $C_1$  จะมีค่าเป็น “0” วงจรควบคุมสวิตช์  $S_1$  ให้ผ่านค่าสัญญาณอ้างอิง  $V_{ref}$  ไปบวกกับสัญญาณ  $2V_{IA}$  ผลลัพธ์จากวงจรบวก  $D_1$  จะเป็นสัญญาณจุดเข้าสำหรับวงจรย่อยบิตถัดไป ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  กับสัญญาณดิจิตอล  $D_1$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.20)

$$V_{IA} = V_{ref} \sum_{i=1}^N b_i 2^{-i} \quad (2.20)$$

โดยที่  $b_i = 1$  ถ้าบิตนั้นมีค่าเป็น “1”

และ  $b_i = -1$  ถ้าบิตนั้นมีค่าเป็น “0”

ตัวอย่างเช่น ต้องการแปลงสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิตอลจำนวน 3 บิต สมมติให้  $V_{IA} = 2$  โวลท์ และ  $V_{ref} = 3$  โวลท์ ดังนั้นจะได้สัญญาณดิจิตอลมีค่าเท่ากับ “110” เมื่อทำการคำนวณกลับเพื่อหาระดับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าจะได้  $V_{IA} = 3[(1/2)+(1/4)-(1/8)]$  หรือเท่ากับ 1.875 โวลท์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากการแปลงกลับจะมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า ซึ่งถ้าจำนวนบิตยิ่งมากค่า สัญญาณดิจิตอลที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้ามากขึ้น



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานและวงจรพื้นฐานของ Algorithmic ADC

วงจรชนิดนี้มีข้อดีคือสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้าสามารถเป็นสัญญาณ ที่เป็น ได้ทั้งสัญญาณบวก หรือสัญญาณลบ (bipolar signal) โดยบิตแรกสามารถชี้ให้เห็นถึงทิศทางของสัญญาณ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณใช้เพียง  $N$  รอบสัญญาณนาฬิกาเท่านั้น โดยที่  $N$  เป็นจำนวนบิตที่ต้องการ และการเพิ่มหรือลดจำนวนบิตของวงจรทำได้โดยง่าย

#### 2.4.6 วงจร ADC ความเร็วสูง

วงจร ADC ความเร็วสูงเป็นวงจรที่ทำการแปลงสัญญาณ โดยใช้เวลาน้อยกว่า  $N$  รอบสัญญาณนาฬิกา แต่วงจรจะมีความซับซ้อนมาก และขนาดของวงจรจะแปรตามจำนวนบิตที่ต้องการ ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ กินพื้นที่มาก วงจรที่กล่าวถึงในประเภทนี้คือ วงจร Parallel ADC

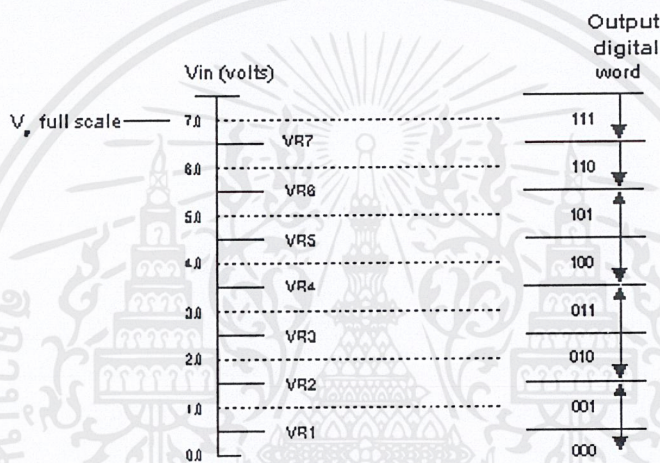
##### 2.4.6.1 Parallel ADC หรือ Flash ADC

หลักการของวงจรคือการแปลงสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลทุกบิตพร้อมกันโดยการเปรียบเทียบสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า กับระดับสัญญาณอ้างอิงที่มีค่าแตกต่างกันขึ้นลงระดับสัญญาณ LSB พร้อมๆกัน ดังนั้นจำนวนสัญญาณอ้างอิงจึงมีจำนวนเท่ากับ  $2^{N-1}$  ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

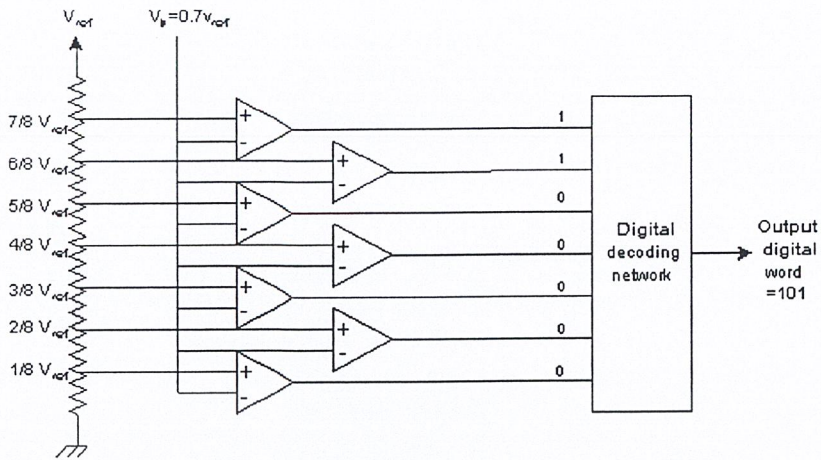
โดยที่  $N$  เป็นจำนวนบิตที่ต้องการ และสัญญาณจุดออกที่ได้จากการเปรียบเทียบ จะนำมาทำการเข้ารหัสเพื่อให้ได้ค่าสัญญาณดิจิทัลที่เทียบเท่ากับสัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า ซึ่งหลักการข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.20

จากหลักการสามารถนำมาพัฒนาเป็นวงจรดังรูปที่ 2.21 โดยที่วงจรประกอบไปด้วยสัญญาณอ้างอิงจำนวน  $2^{N-1}$ , วงจรเปรียบเทียบสัญญาณจำนวน  $2^{N-1}$  วงจรและวงจรถอดรหัสสัญญาณ โดยที่สัญญาณต่อเนื่องจุดเข้า  $V_{IA}$  จะทำการเปรียบเทียบกับ  $V_{ref}$  ถ้า  $V_{IA} > V_{ref}$  สัญญาณจุดออกวงจรเปรียบเทียบที่  $i$  จะมีค่าเป็น “1” แต่ถ้า  $V_{IA} < V_{ref}$  สัญญาณจุดออกวงจรเปรียบเทียบที่  $i$  นั้นจะมีค่าเป็น “0” โดยที่  $i$  เป็นวงจรใดๆมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $2^{N-1}$  และจากค่าสัญญาณจุดออกทั้ง  $2^{N-1}$  ค่า จะนำมาเข้ารหัสเพื่อ หาค่าสัญญาณดิจิทัลเอาท์พุท



รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Parallel ADC

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำงานประกอบด้วยขั้นตอนเพียง 2 ขั้นตอนเท่านั้น คือขั้นตอนเปรียบเทียบและขั้นตอนการเข้ารหัส ทำให้เวลาการแปลงสัญญาณ  $N$  บิต สามารถทำได้ในหนึ่งสัญญาณนาฬิกาเท่านั้น แต่วงจร ADC ชนิดนี้ถ้าต้องการเพิ่มความละเอียดในการแปลงสัญญาณ (resolution) จำนวนอุปกรณ์ ในวงจรจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ วงจร ADC ชนิดนี้เหมาะที่จะใช้กับการแปลงสัญญาณที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก ซึ่งโดยปกติจะอยู่ระหว่าง 3 – 6 บิต นอกจากนั้นความผิดพลาดของวงจรยังขึ้นกับวงจรเปรียบเทียบ และค่าสัญญาณอ้างอิงอีกด้วย



รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของ Parallel ADC

## 2.5 วงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ คือวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งส่วนมากจะให้สัญญาณรูปไซน์ ดังนั้นวงจรออสซิลเลเตอร์จึงถูกนำมาใช้งานในวงจรเครื่องส่ง วงจรสร้างสัญญาณเสียงดนตรี วงจรในเครื่องมือพวกสร้างสัญญาณเสียงและเป็นวงจรต้นกำเนิดสัญญาณความถี่ต่างๆ นอกจากนี้วงจรออสซิลเลเตอร์ยังเป็นวงจรในส่วนประกอบย่อยของวงจรอื่นอีกเป็นจำนวนมาก

การกำเนิดสัญญาณด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์มีได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีลักษณะพิเศษอื่นๆ ประกอบด้วย เช่นให้ความถี่ต่ำๆ หรือให้ความถี่สูงๆ เสถียรภาพทางความถี่ดี การปรับความถี่เป็นไปได้ง่ายหรือยาก เป็นต้น

### 2.5.1 หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ก็ต้องขยายชนิดหนึ่งนั่นเอง แต่เป็นวงจขยายชนิดป้อนกลับและที่สำคัญคือการป้อนกลับของสัญญาณ จะมีได้ป้อนกลับในลักษณะลบเหมือนกับวงจขยายป้อนกลับ หลักการง่ายๆของวงจรออสซิลเลท คือ เมื่อมีสัญญาณขนาดเล็กๆ ป้อนเข้ามาทางอินพุทของวงจขยาย สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จะกลับเฟสแล้วมาเสริมกับอินพุทของวงจขยายทำให้อินพุทมีขนาดเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เอาต์พุทมีขนาดใหญ่ด้วย เมื่อมีการป้อนกลับเข้ามาอีกก็จะทำให้อินพุทใหญ่ขึ้นอย่างไม่สิ้นสุด โดยปกติการเพิ่มขึ้นของสัญญาณจะถูกจำกัดที่ค่าแรงดันค่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อกลับมาแล้วก็จะเสมือนกับการป้อนกลับด้วยค่าแรงดันคงที่ วงจรจึงทำให้อินพุทได้ที่ระดับแรงดันเสมือนกับคงที่คือการออสซิลเลทนั่นเอง การออสซิลเลทหรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุทจากค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุด

## 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่บริษัท Intel Corp. ได้พัฒนาขึ้นเพื่อการใช้งานทั่วไป ซึ่งต่อมาทางบริษัท Atmel ได้ซื้อลิขสิทธิ์ ไปเพื่อพัฒนาต่อ

### 2.6.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่ง ที่รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ

### 2.6.2 คุณสมบัติที่สำคัญของ MCS-51 มีดังนี้

- มีหน่วยความจำ ROM 4k byte
  - มีหน่วยความจำ RAM 128 byte
  - มี Port I/O ขนาด 8 บิต 4 Port
  - มี Timer 16 บิต 2 ตัว
  - สามารถ Interrupt ได้ 5 แหล่ง
  - มีวงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรรนาฬิกาบนชิพ
  - มี Port ออนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex ความเร็วสูง
  - อ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64k
  - อ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64k
  - สามารถประมวลผลทีละบิตได้
  - สามารถอ้างหน่วยความจำแบบบิตได้ 210 ตำแหน่ง
  - หนึ่งวัฏจักรคำสั่ง กินเวลาประมาณ 1 ไมโครวินาที ขณะทำงานด้วย Clock 12 Mhz
- เบอร์พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ประกอบด้วย 8051,8031,8751 ซึ่ง

แตกต่างกันที่ชนิดและหน่วยความจำภายใน

### 2.6.3 โครงสร้างหน่วยความจำใน MCS-51

แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

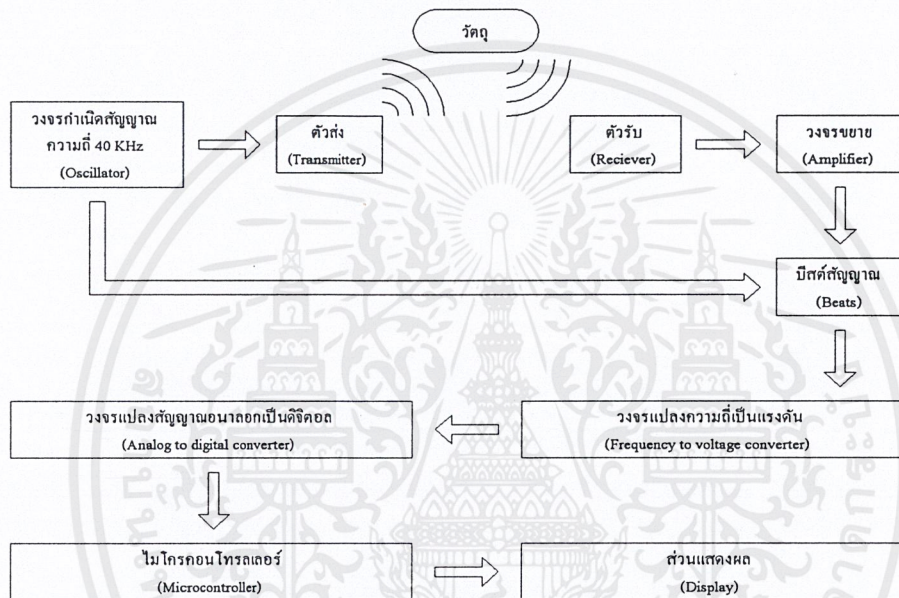
1. หน่วยความจำโปรแกรม
2. หน่วยความจำข้อมูล

MCS-51 ทุกเบอร์จะมีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในอย่างน้อย 128 ไบต์ไปจนถึง 256 ไบต์ หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในบริเวณ 128 ไบต์แรกเรียกว่า Lower 128 และในบริเวณ 128 ไบต์หลังที่มีเพิ่มในบางเบอร์มีชื่อเรียกว่า Upper 128

### บทที่ 3

#### การออกแบบและหลักการทำงานของวงจร

ในการออกแบบเครื่องวัดความเร็วซึ่งเป็นหัวข้อของโครงการนี้ ได้ออกแบบออกแบบโดยประยุกต์ใช้หลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีมาแล้วดังในบทที่ 2 โดยโครงสร้างของเครื่องวัดความเร็วแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดความเร็ว

พิจารณาจากโครงสร้างของเครื่องวัดความเร็วจะพบว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- 1) ภาคส่ง
- 2) ภาครับ
- 3) ส่วนประมวลผล
- 4) ส่วนแสดงผล

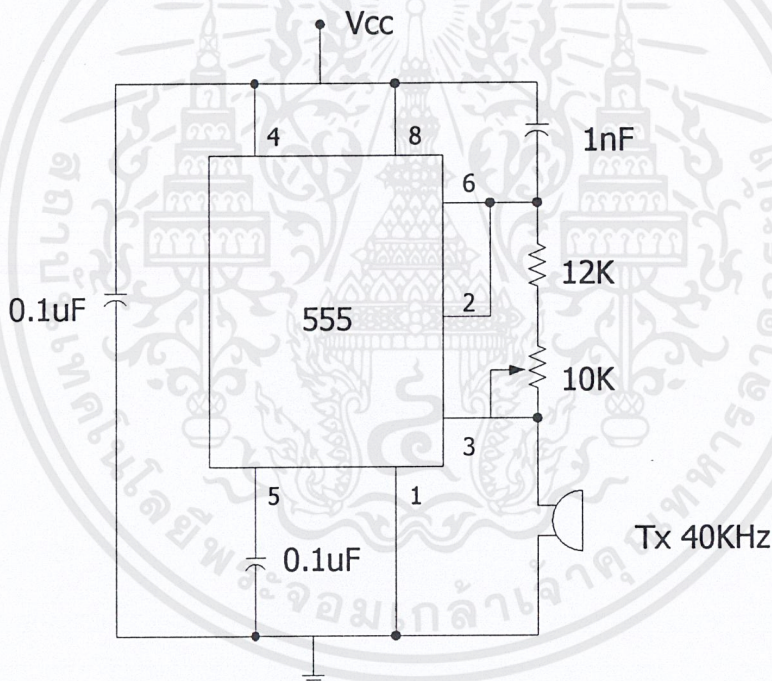
โดยจากโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ดังกล่าวจะสามารถอธิบายหลักการทำงานโดยรวมได้คือ ภาคส่งซึ่งประกอบไปด้วยวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณ และตัวส่งจะส่งสัญญาณความถี่ 40 KHz ไปตกกระทบวัตถุที่เคลื่อนที่ แล้วสะท้อนกลับไปยังตัวรับซึ่งตัวรับจะรับสัญญาณได้โดยจะมีสเปกตรัมทางความถี่เปลี่ยนไปนั่นคือ จะมีลักษณะของสัญญาณเป็นแบบ AM โดยความถี่ที่เปลี่ยนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจะแปรผันตามความเร็วของวัตถุ ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ ดอปเปลอร์นั่นเองซึ่งสัญญาณจากตัวรับจะนำเข้าไปสู่วงจรขยายเพื่อขยายสัญญาณแล้วนำไปบีทกับสัญญาณจากวงจรถ้าเนตสัญญาณซึ่งก็คือวิธีเฮเทอโรไดน์(heterodyne)นั่นเอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็คือความแตกต่างระหว่างความถี่สัญญาณทั้งสองหรือก็คือความถี่ที่เปลี่ยนไป นั่นเองซึ่ง ความถี่ค่านี้นี้จะถูกนำไปเป็นอินพุทของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันซึ่งเอาท์พุทที่ได้ก็คือระดับแรงดันไฟตรง โดยระดับแรงดันดังกล่าวนี้จะนำไปผ่านวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล แล้วจึงนำไปประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วนำไปแสดงผล

หลักการออกแบบและหลักการทำงานของวงจรต่างๆ

### 3.1 วงจรถ้าเนตสัญญาณความถี่ 40KHz

ในส่วนนี้ได้ออกแบบวงจรโดยใช้ไอซี ตั้งเวลา LM555 มาต่อเป็นวงจร อะสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ (Astable multivibrator)ซึ่งต่อวงจรได้ดังรูป 3.2



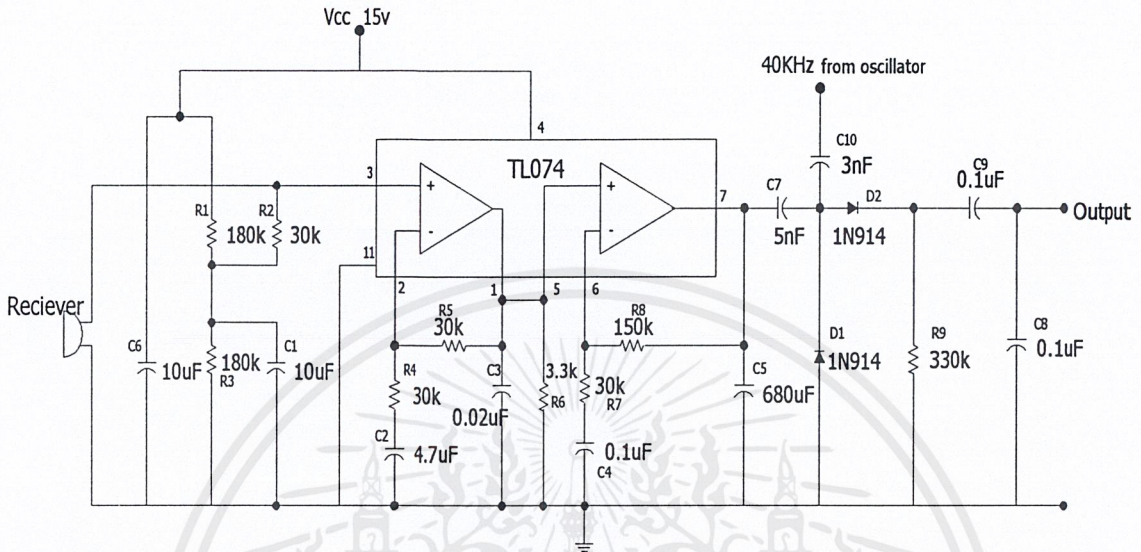
รูปที่ 3.2 รูปวงจรถ้าเนตสัญญาณ 40KHz

เมื่อพิจารณาจากวงจร จะพบว่าสามารถปรับค่าความถี่ได้โดยการปรับค่า VR1 นั่นเอง ซึ่งในการเลือกการต่อวงจรในลักษณะนี้ ก็เนื่องจากการต่อในลักษณะนี้มีข้อดีคือเอาท์พุทของวงจรจะมีค่า ดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ประมาณ 50% เสมอนั่นเอง นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดขนาดแรงดันเอาท์พุทได้ง่าย โดยการกำหนดที่แรงดัน  $V_{cc}$  นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วงจรขยายและบิตสัญญาณ

ในส่วนของวงจรขยายนี้ได้ออกแบบโดยใช้วงจรดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 รูปวงจขยายและบิตสัญญาณ

จากวงจรจะพบว่า จะประกอบไปด้วยวงจขยายไม่กลับเฟสต่อกันอยู่สองภาค ซึ่งมีหลักการการทำงานคือ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า มีไฟเลี้ยงบวกเลี้ยงไอซีอยู่เพียงชุดเดียว จึงต่อ R1 และ R3 เข้าไปในวงจรเพื่อแบ่งแรงดันมาป้อนไบอัสให้กับขานอนอินเวอร์ตติ้งของวงจขยายภาคแรก ซึ่งเมื่อตัวรับได้รับสัญญาณที่สะท้อนมาจากวัตถุ C1 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุบายพาสจะทำหน้าที่เสมือนลัดวงจรที่ R3 ลงกราวด์ทำให้เสมือนกับว่าตัวรับมีเพียง R2 เป็นโหลดเท่านั้น ดังนั้นการกำหนดค่า R2 ก็เป็นการกำหนดแถบความถี่ในการทำงานของตัวรับนั่นเอง เมื่อสัญญาณเข้าสู่วงจขยายภาคแรกจะขยายสัญญาณออกที่เอาท์พุทด้วยอัตราขยายที่กำหนดโดย R4 และ R5 ซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.1

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (3.1)$$

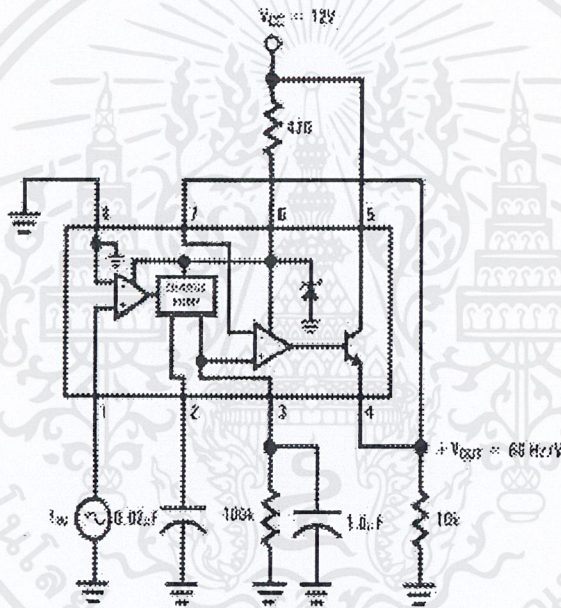
โดยจากวงจรจะพบว่า จะมี C2 คอยทำหน้าที่เพิ่มอัตราขยายที่ความถี่สูงๆ อีกด้วย นอกจากนี้ในวงจรยังได้นำเอาเอาท์พุทของวงจขยายภาคแรกมาต่อโดยตรงกับวงจขยายภาคที่สอง ซึ่งเป็นการให้ไบอัสที่เหมาะสมแก่ขานพุทของภาคที่สองไปด้วยในตัว ส่วนหลักการของในภาคที่สองก็เหมือนกันกับภาคแรก เพียงแต่เปลี่ยนแปลงค่าอุปกรณ์บางตัวให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ และลดอัตราขยายที่ความถี่ต่ำลง เพื่อลดปัญหาในการทำงานลงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่เอาต์พุตของวงจรถะพบว่าต่อผ่าน C7 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling) ไปปัดกับสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่ เพื่อนำเอาความแตกต่างทางความถี่ของสัญญาณทั้งสองออกมา ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า เฮเทอโรไดน์ (Heterodyne) นั่นเอง โดยความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่ได้นี้ก็คือความถี่ที่เปลี่ยนไปจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์นั่นเอง ซึ่งค่านี้เองที่จะนำไปป้อนเป็นอินพุตให้กับส่วนต่อไป

### 3.3 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

การออกแบบในส่วนนี้ ได้ออกแบบโดยใช้ไอซีเบอร์ LM2917 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้ในการแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตเป็นระดับแรงดันเอาต์พุตออกมา ซึ่งหลักการการทำงานจะใช้เทคนิคของการชาร์จปั๊ม (Charge Pump) โดยโครงสร้างภายในและการต่อวงจรแสดงดังรูป



รูปที่ 3.4 รูปวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

หลักการการทำงานของวงจรถะเริ่มจากวงจรขยายความแตกต่างทางด้านอินพุต ซึ่งที่อินเวอร์ตติ้งอินพุต (Inverting Input) จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มทางด้านอินพุต (Input Threshold Voltage) ซึ่งจากวงจรถะจะเห็นว่าต่อลงกราวด์นั่นเอง ส่วนที่นอนอินเวอร์ตติ้งอินพุตจะต่ออยู่กับ  $F_{in}$  นั่นก็คือ เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาและสวิงตัดผ่านระดับของแรงดันขีดเริ่มทางด้านอินพุต จะทำให้เกิดเอาต์พุตที่ส่วนนี้เกิดขึ้น และส่งต่อไปในส่วนของการชาร์จปั๊ม ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้แปลงความถี่อินพุตเป็นระดับแรงดันไฟตรงนั่นเอง โดยการทำงานในส่วนนี้จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์ 3 ตัว คือ ไทมิงคาปาซิเตอร์ (Timing Capacitor) ,เอาต์พุตรีซิสเตอร์ (Output Resistor) และฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์ (Filter Capacitor) นั่นเอง การทำงานในส่วนนี้จะเริ่มจากเมื่อสัญญาณอินพุตของส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับ นั่นก็คือเมื่อสัญญาณอินพุตของวงจรเคลื่อนที่ตัดผ่านระดับของแรงดันขีดเริ่มทางด้านอินพุต ไทมิ่งคาปาซิเตอร์จะชาร์จ (Charge) หรือดิชาร์จ (Discharge) อย่างเป็นเชิงเส้น ระหว่างค่าแรงดันสองค่า ซึ่งมีความแตกต่างกันเท่ากับ  $V_{CC}/2$  หลังจากนั้นภายในครึ่งไซเคิลของความถี่อินพุต หรือเท่ากับ  $1/(2F_{in})$  การเปลี่ยนแปลงของประจุที่ ไทมิ่งคาปาซิเตอร์จะเท่ากับ  $(V_{CC}/2) * C1$  ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุคือ

$$\Delta Q/T = i_{c(AVG)} = C1 * (V_{CC}/2) * (2F_{in}) = V_{CC} * F_{in} * C1$$

และในส่วนสุดท้ายคือวงจรสะท้อนกระแสที่เอาท์พุท ซึ่งจะทำให้ได้ค่ากระแสที่ถูกต้อง แม่นยำผ่านตัวต้านทานโวลตดลงกราวด์ จนกระทั่งพัลส์ของกระแสถูกอินทิเกรตด้วยฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์ จะได้ว่า  $V_o = i_c$  นั่นก็คือจะได้สมการที่ใช้ในการแปลงความถี่เป็นแรงดันคือ

$$V_o = V_{CC} * F_{in} * C1 * R1 * K$$

โดย K คือ ค่า Gain Constant ซึ่งโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1 นั่นเอง ส่วนขนาดของตัวเก็บประจุที่เหลืออีกตัวคือ ค่า  $C = 1.0 \mu F$  ก็จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันริปเปิ้ล (Ripple Voltage) และผลตอบสนองทางเวลานั่นเอง

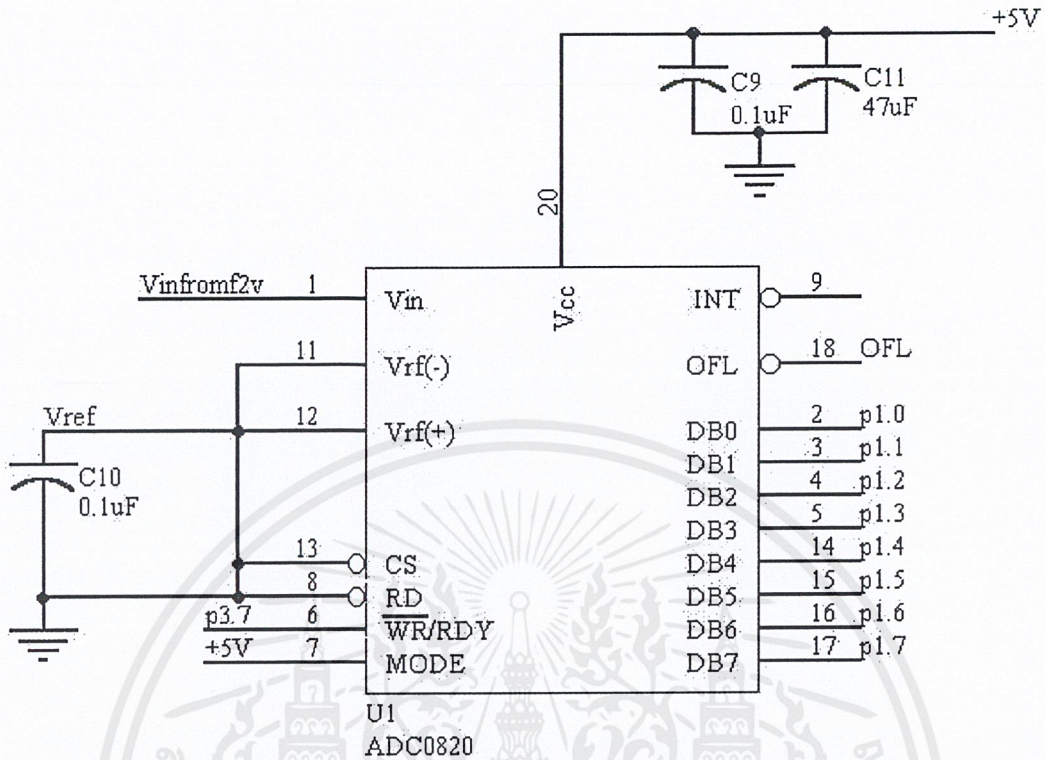
แต่ในการออกแบบวงจรนี้ การเลือกค่าของ R1 และ C1 จะได้มาจากการทดลอง เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามสมการ

$$V_o = V_{CC} * f_{in} * C1 * R1 * K \quad \text{โดย } K = 1$$

ที่ได้มาจากคู่มือ ไอซีแต่ละจะพบว่าค่าความถี่ต่อแรงดันที่ได้จะผิดพลาดไปจากการต่อใช้งานจริงเป็นอย่างมาก แต่จากผลการทดลองซึ่งจะแสดงในบทต่อไป จะพบว่าความถี่ยังแปรผันตามแรงดันอย่างเป็นเชิงเส้นอยู่นั่นเอง

### 3.4 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ได้ทำการเลือกใช้ ไอซีเบอร์ ADC0820 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ 8 บิต ที่ใช้เทคนิคของการแปลงแบบฮาล์ฟแฟลช (Half Flash) ซึ่งประกอบไปด้วยคอมพาราเตอร์ (Comparator) ทั้งหมด 32 ตัว โดยมีฟังก์ชันแทรคและโฮลด์ (Track and Hold) อยู่ในตัว นอกจากนี้ยังสะดวกต่อการนำมาเชื่อมต่อกับเพื่อใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่ ADC0820 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำเป็น อินพุท เอาท์พุท พอร์ต (I/O port) โดยไม่ต้องใช้ต่อวงเชื่อมต่อทางตรรก โดยการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยใช้ ADC0820

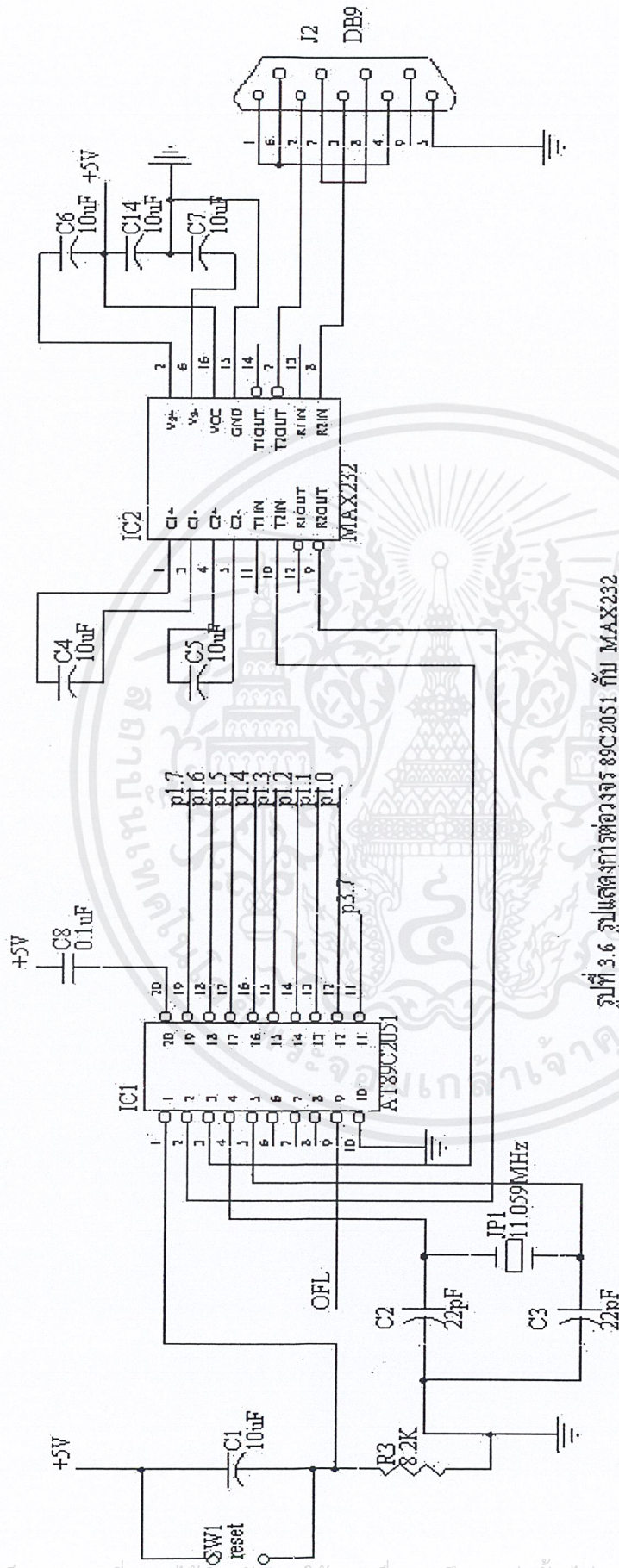
### 3.5 ส่วนประมวลผล

ในส่วนนี้ได้เลือกใช้ไอซีในตระกูล MCS-51 เบอร์ 89C2051 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก ใช้งานง่าย โครงสร้างภายในของ AT89C2051 จะคล้ายกับโครงสร้างหลักของ MCS-51 แต่จะลดจำนวนพอร์ตลง ทำให้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กขนาด 20 ขา โดยจะนำมาเป็นส่วนของการส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ ในลักษณะการสื่อสารแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 จึงได้เลือกใช้ IC เบอร์ MAX232 ซึ่งได้ทำการต่อโดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.6 เพื่อทำการส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณและแสดงผลต่อไป

ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้ก็เนื่องมาจากการใช้งานทำได้ง่ายทั้งยังหาอุปกรณ์ได้ง่ายนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

- มีโครงสร้างและชุดคำสั่งเหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51
- มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิด Flash Memory ขนาด 2kByte
- มีหน่วยความจำแบบ RAM 8 bit ขนาด 128 Byte (Internal Ram)
- ทำงานที่แรงดัน 2.7-6 โวลต์
- Run ที่ความเร็วนาฬิกา 0Hz-24MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



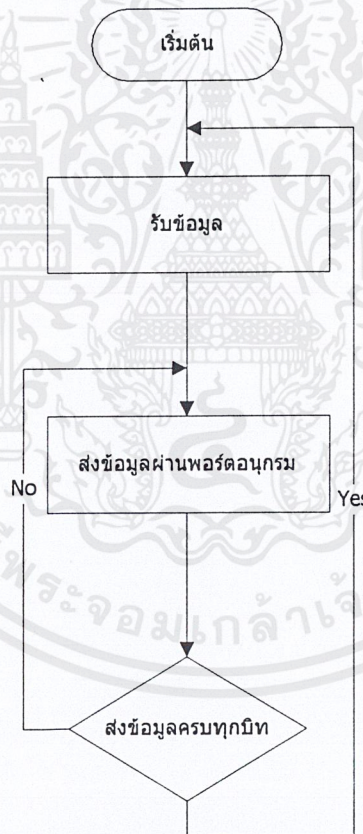
รูปที่ 3.6 รูปร่างการต่อวงจร 89C2051 กับ MAX232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีพอร์ต I/O 15 บิต (พอร์ต 1 และ 3)
- พอร์ตสามารถ Sink กระแสได้ 20 mA และใช้เป็นเอาต์พุตขับ LED ได้โดยตรง
- มีพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม 1 Channel (UART)
- สามารถโปรแกรมข้อมูลเพื่อป้องกันการอ่าน-เขียนได้ 2 ระดับ
- มีวงจรถ่ายโอนและวงจรมีขนาด 16 บิต จำนวน 2 Channel
- มีสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 5 แหล่ง แบ่งระดับความสำคัญได้ 2 ระดับ
- มีวงจรถ่ายโอนสัญญาณอนาล็อก 1 Channel

### 3.6 โปรแกรมประมวลผล

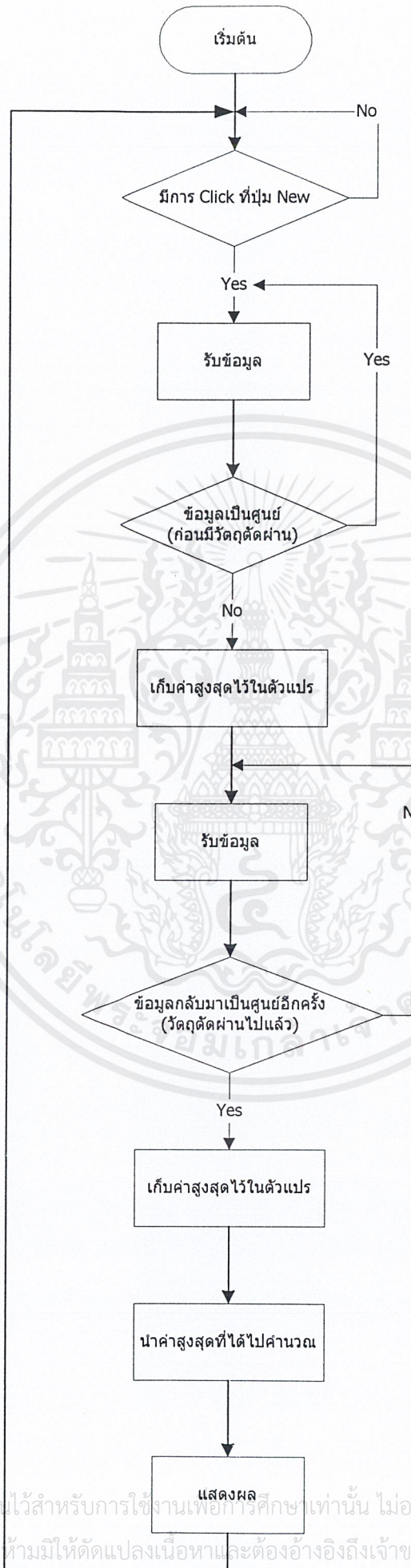
สำหรับโปรแกรมเพื่อรับค่าจาก A/D ไปยัง MAX232 ใช้ภาษา Assembly เก็บไว้ใน Flash Memory ของ AT89C2051 ที่มีรายละเอียดการทำงานตาม Flowchart ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดง Flowchart โปรแกรมที่อยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งใช้ในการส่งค่าจาก A/D ไปยัง MAX232

และในส่วนโปรแกรมแสดงผลซึ่งแสดงในไมโครคอมพิวเตอร์ มีรายละเอียดการทำงานตาม Flowchart ดังรูปที่ 3.8

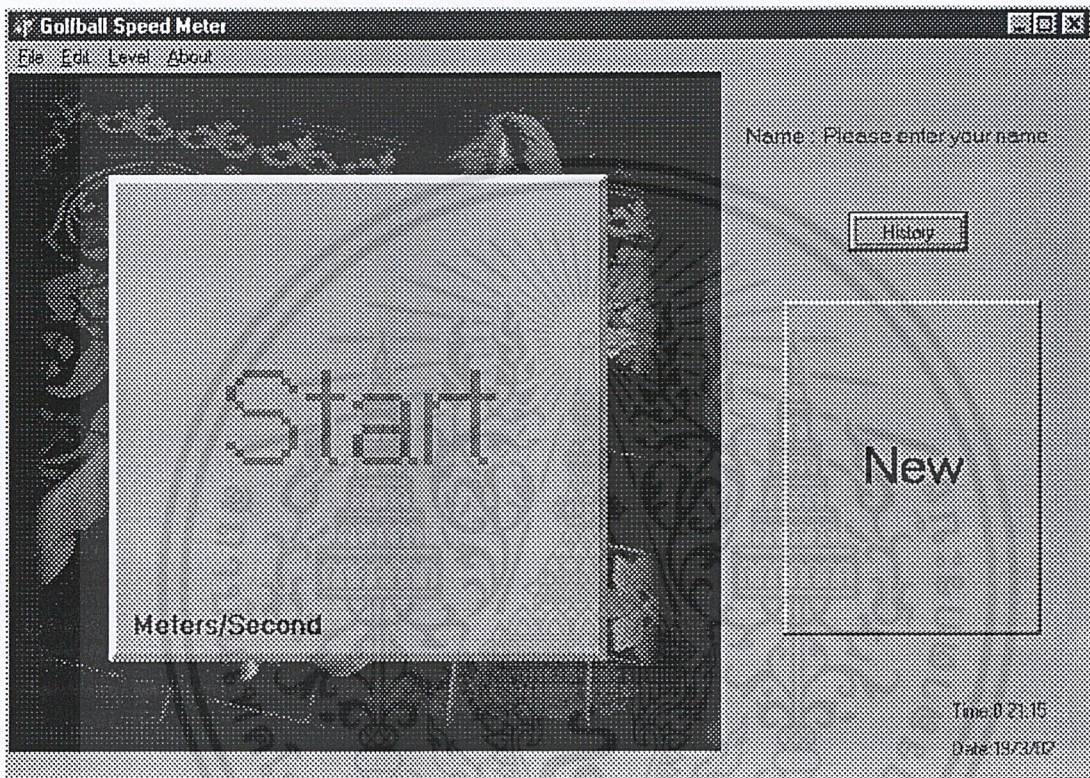
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ส่วนแสดงผล

ในส่วนนี้ได้เลือกให้แสดงผลโดยใช้หน้าจอคอมพิวเตอร์โดยการรับข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม โดยใช้การอินเทอร์เฟซตามมาตรฐาน RS-232 และควบคุมการแสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้งานโดยใช้โปรแกรม Delphi โดยมีลักษณะของโปรแกรมดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแสดง โปรแกรมแสดงผลและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดสอบของโครงการ

ในโครงการนี้ได้ผ่านการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวงจร โดยแบ่งเป็น ...  
การทดลองดังต่อไปนี้

1. การทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์
2. การทดสอบวงจรขยายและบีทสัญญาณ
3. การทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน
4. การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล
5. การทดสอบเครื่องวัดความเร็วโดยรวมส่วนต่างๆ ทั้งหมดของวงจร

จากการทดสอบวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถแสดงขั้นตอนการทดลองและผล  
การทดลองได้ดังต่อไปนี้

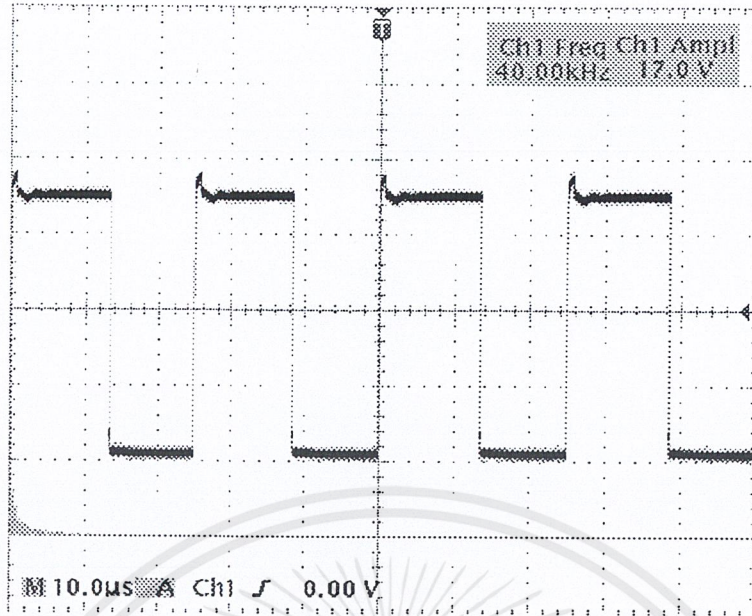
#### 4.1 การทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์

##### 4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจร
2. วัดสัญญาณที่จุดเอาต์พุตของวงจร
3. ปรับค่า R2 จนได้ค่าความถี่ที่เอาต์พุตเป็น 40 KHz
4. บันทึกรูปสัญญาณ
5. ทำการต่อตัวส่งสัญญาณอุลตราโซนิกเข้าที่เอาต์พุตของวงจร
6. บันทึกรูปสัญญาณ

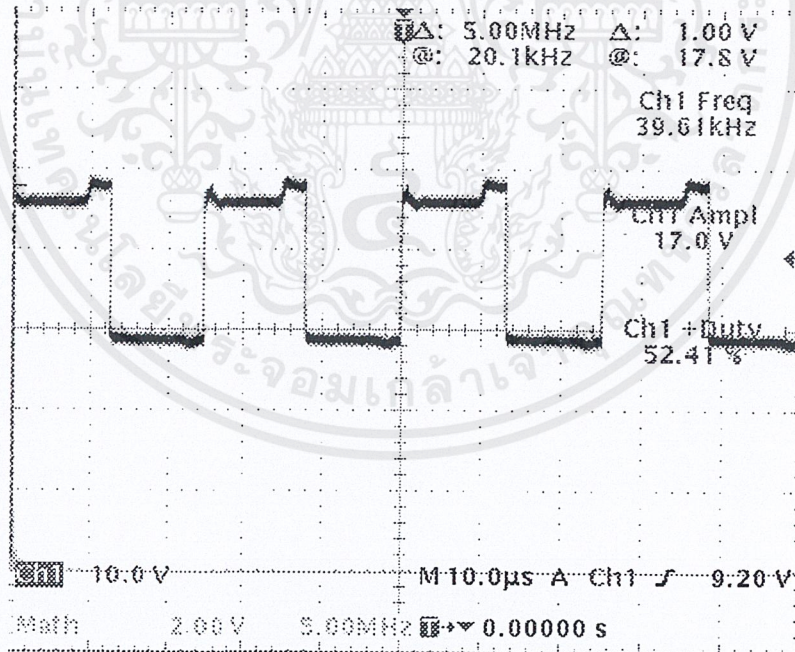
##### 4.1.2 ผลการทดลอง

1. รูปสัญญาณก่อนทำการต่อตัวส่ง ดังแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงเอาต์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์

2) รูปสัญญาณหลังจากทำการต่อตัวส่งเข้ากับวงจร



รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณหลังจากทำการต่อตัวส่งเข้ากับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบภาครับ

การทดสอบในส่วนของภาครับนี้จะประกอบไปด้วยส่วนของตัวรับ และวงจรขยายและบีทสัญญาณ โดยจะมีขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองดังนี้

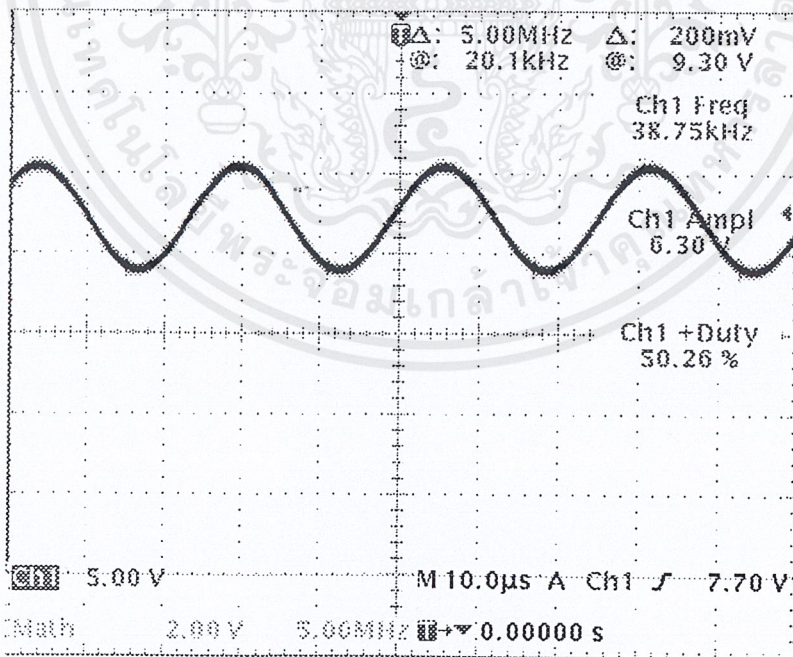
### 4.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจรทั้งทางภาคส่ง และภาครับ
2. หันตัวส่งและตัวรับเข้าหากันโดยให้ตรงกัน
3. วัดและบันทึกสัญญาณที่จุดต่างๆ ดังนี้
  - ที่ตัวรับ
  - ที่เอาต์พุทของวงจรขยาย
  - ที่เอาต์พุทหลังจากผ่านการบีทสัญญาณ
4. หันตัวส่งและตัวรับ ไปหาวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ให้มุมเท่ากันพอดี เพื่อให้สัญญาณจากตัวส่งสะท้อนไปยังตัวรับได้พอดี
5. วัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ดังข้อ 3

### 4.2.2 ผลการทดลอง

#### 4.2.2.1 รูปสัญญาณที่จุดต่างๆขณะที่หันตัวส่งและตัวรับเข้าหากันโดยตรง

1. รูปสัญญาณที่ตัวรับ



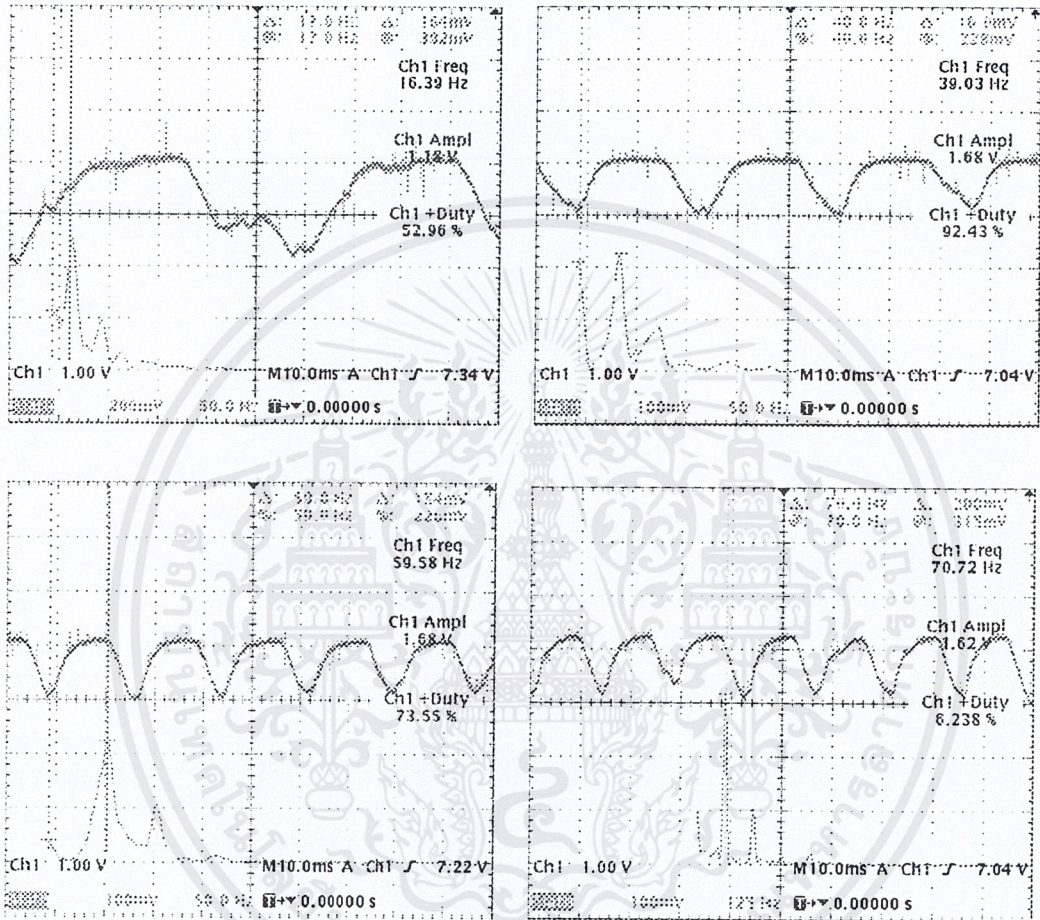
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 รูปสัญญาณที่จุดต่างๆขณะที่หันตัวส่งและตัวรับไปหาวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่

1) รูปสัญญาณที่ตัวรับ

2) รูปสัญญาณที่เอาท์พุทหลังจากผ่านการบีทสัญญาณ ที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณหลังการบีท ที่ความเร็ว 0.52m/s 1.23m/s 1.87m/s 2.23m/s ตามลำดับ

### 4.3 การทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

#### 4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจร
2. ป้อนความถี่ต่างๆ ให้กับวงจร
3. วัดค่าแรงดันเอาท์พุท
4. ทำการเปลี่ยนค่า C1 ที่ต่ออยู่กับขา 2 ของไอซีเป็นค่าต่างๆ แล้วทำตามข้อ 2 และ

ข้อ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองโดยใช้  $C1 = 50\text{nF}$ 

ความถี่ (Hz)	แรงดัน (v)
25.83	1.00
53.72	2.00
80.4	3.00
105.83	4.00
132.51	5.00

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองโดยใช้  $C1 = 20\text{nF}$ 

ความถี่ (Hz)	แรงดัน (v)
64	1.00
127	2.00
192	3.00
261	4.00
324	5.00

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองโดยใช้  $C1 = 10\text{nF}$ 

ความถี่ (Hz)	แรงดัน (v)
136.2	1.00
268	2.00
406	3.00
539	4.00
687	5.00

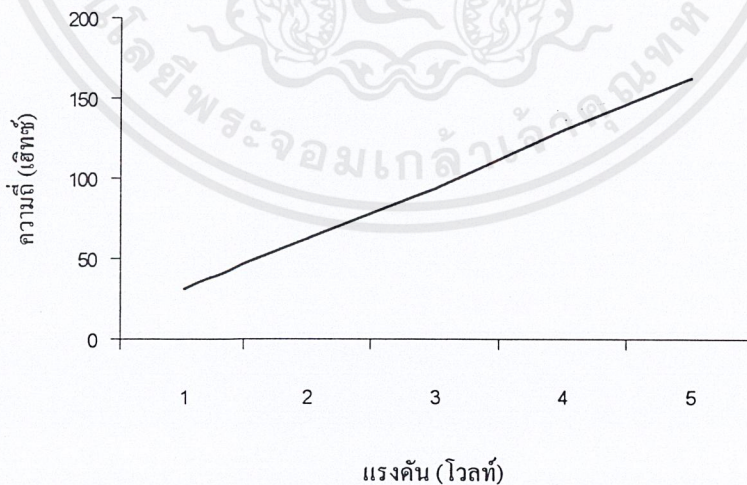
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองโดยใช้  $C1 = 4\text{nF}$ 

ความถี่ (Hz)	แรงดัน (v)
345	1.00
684.6	2.00
1040.2	3.00
1384.7	4.00
1719	5.00

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดลองโดยเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในวงจร

1. ป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจร
2. ป้อนความถี่ต่างๆ ให้กับวงจรจนได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 1 ,2 ,3 ,4 และ 5 ตามลำดับ
3. วัดค่าความถี่ที่แรงดันต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น
4. ทำการเปลี่ยนค่า  $C1$  ที่ต่ออยู่กับขา 2 ของไอซีเป็นค่าต่างๆ แล้วทำตามข้อ 2 และข้อ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความถี่ของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน เมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุ  $25\text{pF}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองโดยวัดค่าความถี่ที่ตัวเก็บประจุและแรงดันเอาต์พุต  
ค่าต่างๆ

ระดับแรงดัน (V)	1	2	3	4	5
ค่าของตัวเก็บประจุ (pF)	ความถี่ที่วัดได้ (KHz)				
1000	1.36	2.71	4.16	5.54	6.89
820	1.736	3.368	5.029	6.69	8.32
680	2.13	4.22	6.31	8.38	10.43
560	2.52	4.98	7.46	9.92	12.27
500	2.926	5.81	8.6	11.39	14.16
390	3.42	6.8	10.12	13.45	16.72
300	4.54	9.01	13.36	17.81	22
120	9.71	19.6	29.8	39.55	49.55
82	13.7	27.11	41.57	55.21	68.6
68	16.3	33	49.2	66.12	82.63
56	18.3	36.55	55.52	74.7	93.2
50	20.75	42.45	63.07	83.4	105.7
39	24.33	47.9	73.95	96.5	124.4
27	30.58	62.12	92.71	128.3	160.2
25	31.78	62.62	93.52	129.7	163.1
18	37	76.81	119.2	164.6	203.2
12	42.2	87.05	144.3	184.3	233.2
10	41.19	92.84	154.1	194.8	249
7	44.72	100.8	182.5	229.6	307.9

#### 4.4 การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

##### 4.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนสัญญาณแรงดันที่จุดต่างๆ ตามวงจร
2. ป้อนสัญญาณนาฬิกาให้กับขา WR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ป้อนระดับแรงดันอินพุทค่าต่างๆ ให้กับวงจร
4. วัดค่าแรงดันเอาต์พุทที่บิตต่างๆ ตั้งแต่ DB0 ถึง DB7
5. บันทึกผล
6. เปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง และทำตามขั้นตอนที่ 3,4 และ 5 ตามลำดับ

#### ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองโดยใช้แรงดันอ้างอิง 5 โวลต์

แรงดันอินพุท ( $V_m$ )	แรงดัน (v)
1.0	00110010 (50) : 0.98
2.0	01100111 (103) : 2.02
3.0	10011010 (154) : 3.02
4.0	11001111 (207) : 4.06
5.0	11111111 (255) : 5.00

#### ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองโดยใช้แรงดันอ้างอิง 2 โวลต์

แรงดันอินพุท ( $V_m$ )	แรงดัน (v)
0.5	01000000 (64) : 0.502
1.0	10000001 (129) : 1.01
1.5	10111101 (189) : 1.48
2.0	11111111 (255) : 2.00

### 4.5 การทดสอบเครื่องวัดความเร็วโดยรวมส่วนต่างๆ ทั้งหมดของวงจรเข้าด้วยกัน

#### 4.5.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำวงจรส่วนต่างๆ มาประกอบรวมกัน
2. ป้อนไฟเลี้ยงให้กับส่วนต่างๆ ของวงจร
3. หันตัวส่งและตัวรับเข้าหาตำแหน่งที่ต้องการวัดความเร็ววัตถุ
4. ส่งวัตถุที่มีความเร็วผ่านตำแหน่งที่ตัวส่งและตัวรับหันเข้าหากันพอดี
5. วัดสัญญาณที่เอาต์พุทของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน แล้วนำค่าที่วัดได้ไป

คำนวณตามสมการที่ 2.14 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_D = \left( \frac{2f_e V \cos \theta}{C} \right)$$

พร้อมทั้งบันทึกผล

6. นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณค่าความเร็วและเปรียบเทียบกับผลจากส่วนแสดงผล

#### 4.5.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองโดยรวมส่วนต่างๆ ของวงจรทั้งหมด

ค่าความเร็วจากการ คำนวณ (เมตร/วินาที)	ค่าความเร็วจากส่วน แสดงผล (เมตร/วินาที)	ค่า Error (%)
0.99	0.96	3.03
1.4	1.33	5.00
1.71	1.61	5.85
1.98	1.91	3.54
2.21	1.38	37.56
2.42	1.27	47.52
2.8	1.13	59.64
3.13	1.07	65.81
3.42	1.03	69.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองโดยรวมส่วนต่างๆ ของวงจรทั้งหมด โดยเพิ่มระยะห่างระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง

ค่าความเร็วจากการ คำนวณ (เมตร/วินาที)	ค่าความเร็วจากส่วน แสดงผล (เมตร/วินาที)	ค่า Error (%)
0.99	1.03	4.04
1.4	1.48	5.71
1.71	1.64	4.09
1.98	1.85	6.56
2.21	2.15	2.72
2.42	2.29	5.37
2.8	2.51	10.36
3.13	2.43	22.36
3.42	2.41	29.53

หมายเหตุ : ระยะห่างระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง ในตารางที่ 4.6 มีระยะห่าง 9.7 เซนติเมตร และในตารางที่ 4.7 มีค่า 18.2 เซนติเมตร

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผล

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองโดยการทดสอบคุณสมบัติที่วงจรต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นโครงงานชิ้นนี้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนดังนี้คือ

- 1). ภาคส่ง
- 2). ภาครับ
- 3). ส่วนประมวลผล
- 4). ส่วนแสดงผล

โดยจากผลการทดลองจะพบว่า ในส่วนแรกที่เป็นภาคส่ง ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ และตัวส่งนั้น จะมีผลการทดลองคือสามารถปรับความถี่ได้ตามต้องการ คือ 40KHz นอกจากนี้ยังมีค่า Duty cycle ประมาณ 50% ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการ นอกจากนี้เมื่อต่อโหลดคือตัวส่ง จะพบว่าเมื่อมีผลต่อเอาต์พุตของวงจรมีผลน้อยมาก ไม่เพียงเท่านั้น ยังสามารถจ่ายขนาดสัญญาณเอาต์พุตได้สูงถึง 18 โวลต์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในส่วนของภาคส่งนี้เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการ เนื่องจากตัวส่งในโครงงานนี้คุณสมบัติหนึ่งที่ต้องการคือ กำลังที่ส่งต้องสูง เพื่อให้สัญญาณสะท้อนกลับไปยังตัวรับได้มากพอนั่นเอง

ในส่วนที่สองซึ่งเป็นส่วนของภาครับและส่วนประมวลผล จะประกอบไปด้วยตัวรับ วงจรขยาย และบีสต์สัญญาณ วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล และวงจรส่วนประมวลผล จะพบว่าผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากเมื่อแยกพิจารณาทีละส่วนจะพบว่าที่ตัวรับสามารถรับสัญญาณ และส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณชาชนัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ส่วนวงจรขยายและบีสต์สัญญาณก็สามารถ ขยายสัญญาณได้ตามที่ต้องการ ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปบ้างก็ตาม เนื่องจากใช้ค่าอัตราขยายที่สูงมาก เพราะว่าการขยายสัญญาณความถี่ที่ Modulation เข้ามา จะมีระดับต่ำมาก หากใช้อัตราขยายที่ต่ำเกินไป อาจจะไม่สามารถตรวจจับได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่สเปกตรัมทางความถี่ของสัญญาณที่แยกออกมาที่จุดก่อนบีสต์ และหลังบีสต์พบว่าสเปกตรัมทางความถี่ที่แยกออกมาได้ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นไปตามหลักการของวิธีเฮเทอโรไดน์ ในส่วนของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันนั้น แม้ว่าผลการทดลองจะมีค่าไม่เท่ากันกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยการใส่สมการจากคู่มือไอซีก็ตาม แต่แรงดันก็ยังแปรผันตามความถี่แบบเชิงเส้นอยู่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 จึงกล่าวได้ว่าผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ และส่วนประกอบในส่วนต่อไปซึ่งก็คือวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะพบว่า มีความผิดพลาดบ้างในด้านบิตค่า ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากการที่เครื่องมือวัดที่ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

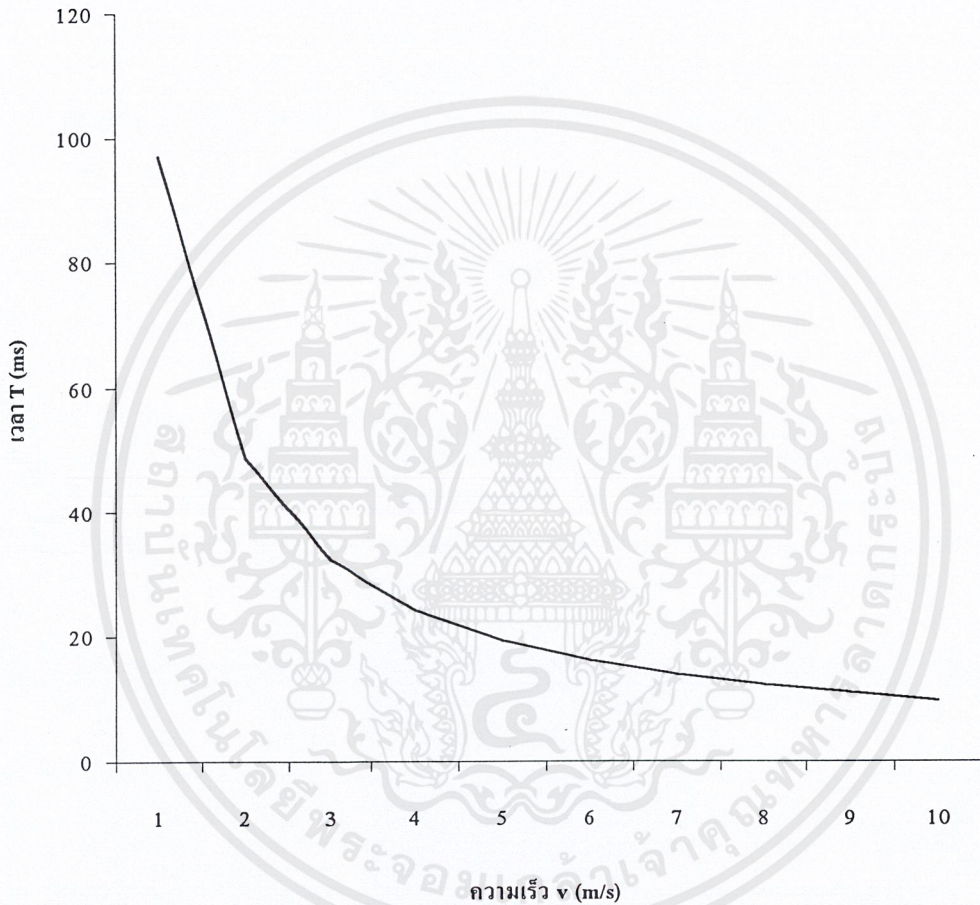
การทดลอง ซึ่งก็คือโวลท์มิเตอร์แบบเข็มนั้นจะไม่มี ความละเอียดมากพอ ทำให้เมื่อวัดสัญญาณอินพุทก่อนที่จะป้อนเข้าวงจรแล้วไม่ได้ค่าที่มีความละเอียดจนถึงทศนิยมตำแหน่งที่ต้องการนั่นเอง ทั้งนี้เพราะหากใช้ค่าแรงดันอ้างอิงที่ระดับแรงดันต่อหนึ่งระดับสัญญาณดิจิทัล จะมีค่าต่ำมากจนถึงหน่วยมิลลิโวลท์นั่นเอง แต่ในส่วนของบิตสูงจะให้ค่าค่อนข้างแม่นยำ จึงกล่าวได้ว่าผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

ส่วนสุดท้ายของโครงการนี้ ซึ่งก็คือส่วนแสดงผล โดยจะเป็นการแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งในโครงการนี้จะใช้โปรแกรม Delphi ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งจะพบว่าสามารถแสดงผลได้ตามที่ต้องการโดยให้ค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อย ซึ่งไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดที่ตัวโปรแกรมแต่เป็นความผิดพลาดจากส่วนของฮาร์ดแวร์นั่นเอง จึงกล่าวได้ว่าผลการทดลองในส่วนนี้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

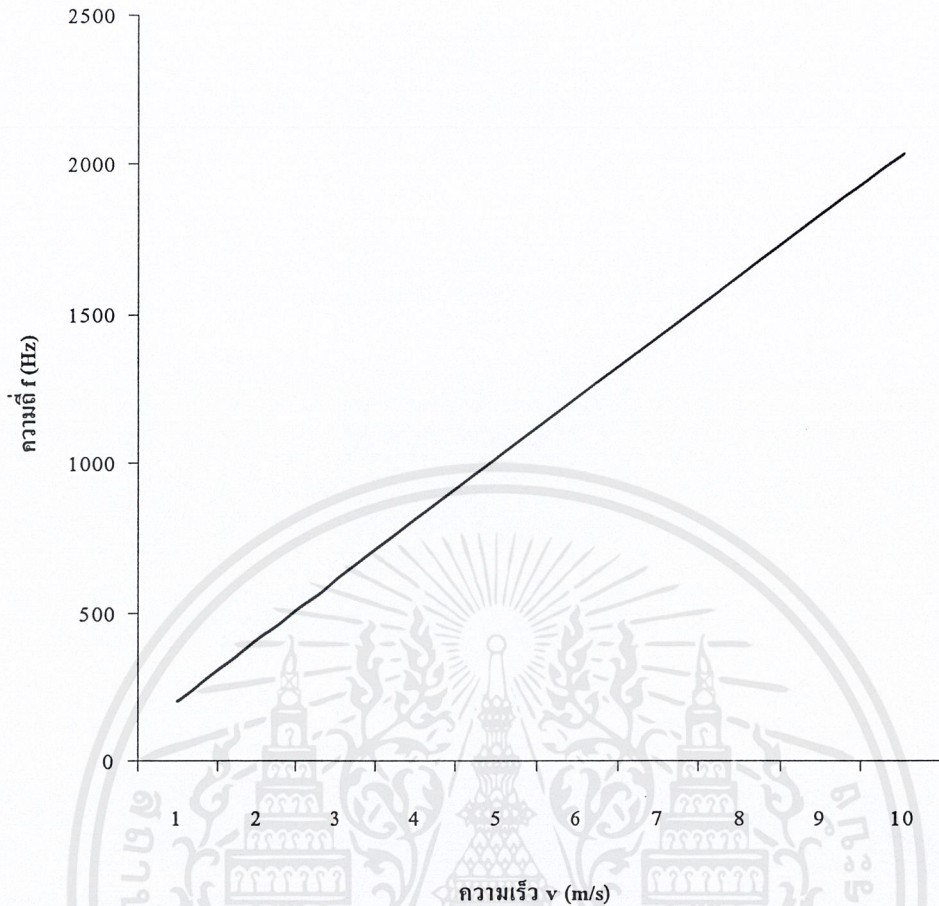
จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาจะพบว่าวงจรแต่ละส่วนสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้แต่เมื่อทำการทดลองโดยนำเอาทุกส่วนมาประกอบรวมกันและใช้ในการวัดจริง จะพบว่าเมื่อทำการวัดความเร็วของวัตถุที่ความเร็วต่ำนั้น ผลการทดลองที่ได้คือเครื่องสามารถแสดงค่าค่อนข้างแม่นยำ โดยผิดพลาดประมาณ 4.75% แต่เมื่อความเร็วมีค่าสูงประมาณ 2.5 จะพบว่าผลที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันซึ่งใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยในหลักการทำงานของวงจรจะใช้ไอซีเบอร์ LM2917 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถแปลงความถี่เป็นแรงดันได้โดยใช้หลักการซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

จากหลักการทำงานของวงจรทั้งหมดที่กล่าวมา จึงสามารถตั้งสมมติฐานของสาเหตุที่ทำให้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไม่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ 2 ประการคือ 1. จำนวนคาบของสัญญาณที่ทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับได้ มีจำนวนไม่เพียงพอที่จะทำให้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันทำงานได้ และ 2. ช่วงเวลาที่วัตถุตัดผ่านทรานซิสเตอร์เร็วเกินกว่าที่จะทำให้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันทำงานได้อย่างสมบูรณ์

สำหรับสมมติฐานข้อแรก จากหลักการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่กล่าวมาในตอนต้น จะพบว่าต้องมีสัญญาณอินพุทเข้าไปในวงจรอย่างน้อยเท่ากับครึ่งไซเคิลของความถี่อินพุทวงจรจึงจะทำงานได้ แต่เมื่อพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่วัตถุวิ่งตัดผ่านส่วนดีเทคเตอร์ (Detector) ดังรูปที่ 5.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ที่ได้จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ดังรูป 5.2



รูปที่ 5.1 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่วัตถุวิ่งตัดผ่านส่วนดีเทคเตอร์



รูปที่ 5.2 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ที่ได้จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ตามทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2

เมื่อนำกราฟทั้งสองมาพิจารณาร่วมกันจะพบว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ที่ได้จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ จะมีคุณสมบัติเป็นกราฟเชิงเส้น ในขณะที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่วัตถุวิ่งตัดผ่านส่วนดีเทคเตอร์ จะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อนำกราฟทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าไม่ว่าเวลาที่วัตถุตัดผ่านส่วนดีเทคเตอร์จะมีค่าเท่าไรก็ตาม แต่จำนวนไซเคิลของสัญญาณที่บรรจุอยู่ในช่วงเวลาดังกล่าวก็จะเท่ากันเสมอ นั่นก็หมายความว่าสมมติฐานข้อนี้ไม่เป็นจริง

และในส่วนสมมติฐานที่สองที่ว่า ช่วงเวลาที่วัตถุตัดผ่านทรานสดิวเซอร์เร็วเกินกว่าที่จะทำให้อุปกรณ์แปลงความถี่เป็นแรงดันทำงานได้อย่างสมบูรณ์นั้น จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 ซึ่งได้ทำการทดลองเพิ่มเพื่อพิสูจน์สมมติฐานข้อนี้ ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าสมมติฐานข้อนี้เป็นจริง โดยได้ทำการทดลองเพิ่มระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ เพื่อเพิ่มช่วงเวลาที่วัตถุตัดผ่านทรานสดิวเซอร์ ซึ่งผลที่ได้ก็คือสามารถวัดและแสดงผลความเร็วที่ถูกต้องได้มากขึ้นกว่าเดิม

ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของไอซี LM2917 จะพบว่าเป็นไอซีที่เหมาะสมกับการใช้งานในการแปลงความถี่ที่ต่อเนื่องเป็นแรงดัน เช่น ใช้เป็นเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) เป็นต้น

## 5.2 สรุปผล

จากผลการทดลองโดยทดสอบคุณสมบัติต่างๆของโครงการที่ได้ทำการออกแบบ และสร้างขึ้นมาพบว่าทุกส่วนสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของภาคส่ง ซึ่งสามารถส่งสัญญาณออกมาที่มีความถี่ และระดับแรงดัน ตามที่ต้องการ ในส่วนของภาครับเองก็สามารถรับสัญญาณได้เป็นอย่างดีแล้วส่งสัญญาณเอาท์พุทไปยังส่วนต่อไปได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อนำทุกส่วนมาต่อใช้งานร่วมกันจะพบว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทำให้ไม่สามารถวัดความเร็วของวัตถุที่มีความเร็วสูง เช่น ความเร็วต้นของลูกกอล์ฟได้ถูกต้องเนื่องจากสาเหตุดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่โครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วของวัตถุที่ตัดผ่านทรานสดิวเซอร์อย่างต่อเนื่อง เช่น สายพาน ของเหลวที่ไหลผ่านท่อ ฯลฯ หรือนำไปวัดวัตถุที่ตัดผ่านทรานสดิวเซอร์เพียงครั้งเดียวที่มีความเร็วต่ำๆ ซึ่งจะให้ผลที่ค่อนข้างถูกต้องตามทฤษฎีในระดับความเร็วต่ำๆ ซึ่งเกิดจากการทำงานในส่วนของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ต้องอาศัยเวลาในการทำงานดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั่นเอง

### 5.2.1 ปัญหาที่พบ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และแนวทางแก้ไข

ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไขในการออกแบบและจัดทำโครงการชิ้นนี้ประกอบไปด้วยประเด็นหลักคือ

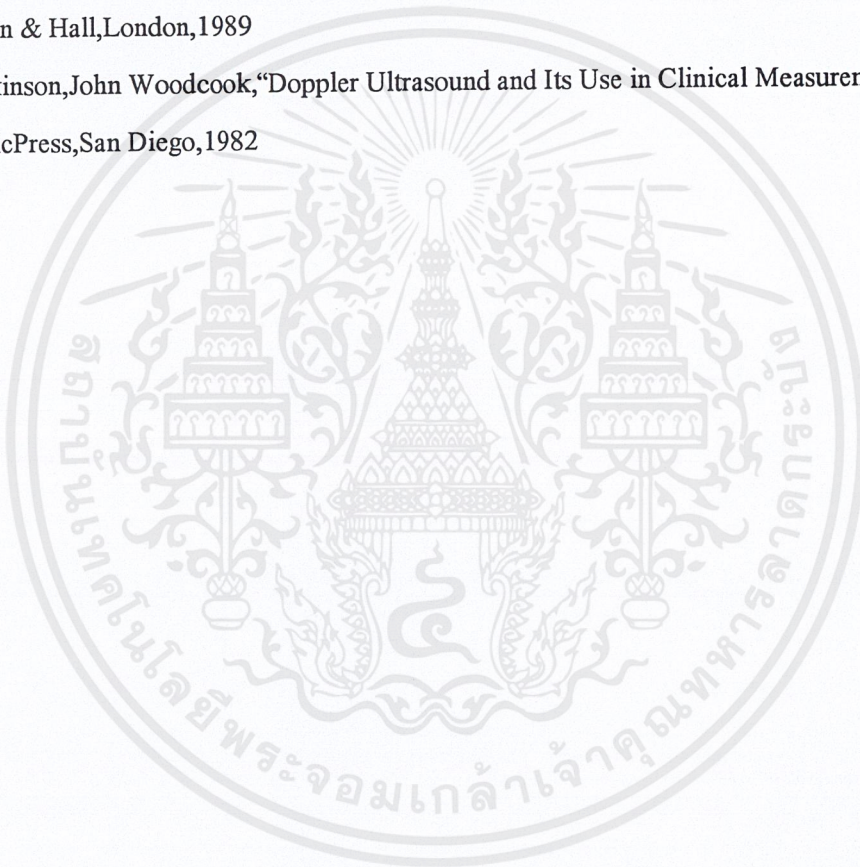
1. สถานที่ในการทดลอง เนื่องจากในการจัดทำโครงการชิ้นนี้ผู้จัดทำค่อนข้างเริ่มการทำโครงการค่อนข้างช้า ทำให้เกิดปัญหาห้องทดลองไม่เพียงพอ กับจำนวนนักศึกษาใช้เครื่องมือกันมากในช่วงนั้นจึงทำให้เกิดปัญหาในเรื่องสถานที่ จึงจำเป็นต้องไปใช้ในห้องทดลองรวมของทางภาควิชา ซึ่งค่อนข้างเล็กและไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โครงการค่อนข้างล่าช้ากว่าที่วางแผนเอาไว้อย่างมาก แต่สุดท้ายก็ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์ และกลุ่มนักศึกษาในความดูแล เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทดลองจนโครงการชิ้นนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี สำหรับแนวทางแก้ไขในปัญหานี้ก็คือ ทางภาควิชาหรือทางอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการควรจัดหาสถานที่ที่สามารถให้นักศึกษาทุกกลุ่ม สามารถทำการทดลองได้ตลอด 24 ชม.
2. ขาดการวางแผนงานที่ดีทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางชิ้น ซึ่งต้องทำการซื้อจากบ้านหม้อ ซึ่งค่อนข้างอยู่ไกลจากสถาบันทำให้ต้องรอให้มีอุปกรณ์ที่ต้องซื้อมากพอแล้วไปซื้อในแต่ละครั้ง และในบางครั้งจำเป็นต้องเดินทางไปเพียงเพื่อซื้ออุปกรณ์เพียงตัวเดียว จะเป็นการเสียเวลาอย่างมาก จึงทำให้การทดลองค่อนข้างล่าช้า

3. ข้อผิดพลาดที่ไม่ได้ทำการทดลองและศึกษาทดลองจนหาข้อมูล เกี่ยวกับวงจรที่เป็น ส่วนประกอบในโครงการให้ตีก่อนที่จะนำมาใช้งานจนทำให้ โครงการไม่สามารถใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น แนวทางแก้ไขก็คือ ควรที่จะศึกษาทำความเข้าใจหลักการทำงาน ของวงจรทดลองจนทำการทดลองกับสภาวะที่ต้องใช้งานจริงก่อนที่จะเลือกวงจรมานั้นมาใช้งาน และประการสำคัญ ก็คือควรพบกับอาจารย์ที่ปรึกษาบ่อยๆ เช่นเดียวกับในข้อสาม

จะเห็นว่าการออกแบบและจัดสร้างโครงการขึ้นนี้ได้มีข้อผิดพลาด และประสบกับปัญหาพอสมควร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นแต่ก็สามารถแก้ไขปัญหานั้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ หลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามา ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการนี้ได้ทำให้ผู้จัดทำ โครงการได้รับประสบการณ์ ความรู้ อีกทั้งทักษะต่างๆที่ไม่สามารถหาได้ในห้องเรียน ซึ่งผลที่ได้ก็คือโครงการขึ้นนี้ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานในด้านต่างๆได้มากมายโดยมีข้อจำกัดคือ หากเป็นวัสดุที่ตัดผ่านทรานสดิวเซอร์เพียงครั้งเดียว ต้องเป็นวัสดุที่มีความเร็วต่ำ แต่ถ้าเป็นวัสดุที่ตัดผ่านทรานสดิวเซอร์อย่างต่อเนื่องจะสามารถวัดที่ความเร็วสูงๆได้ นอกจากนี้ยังอาจนำไปพัฒนา โดยการปรับปรุงแก้ไขส่วนต่างๆของโครงการเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในด้านต่างๆได้อีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าโครงการขึ้นนี้ไม่เพียงแต่บรรลุวัตถุประสงค์ของผู้จัดทำโครงการ แต่ยังเป็นไปตาม วัตถุประสงค์ของทางภาควิชาในอันที่จะฝึกทักษะ ประสบการณ์ ตลอดจนการแก้ปัญหา ให้กับผู้จัดทำโครงการอีกด้วย

### บรรณานุกรม

1. ชีรวัดน์ ประกอบผล ,“ การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์” ,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น),กรุงเทพฯ,2542
2. ทนง โชติสรยุทธ์, “ เทคนิคการใช้งานอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์ สำหรับนักทดลอง” ,ซีเอ็ดยูเคชั่น ,กรุงเทพฯ,2537
3. Chapman and Hall Staff ,“ ULTRASONIC MEASUREMENT AND TECHNOLOGIES” ,Chapman & Hall,London,1989
4. Peter Adkinson,John Woodcook,“Doppler Ultrasound and Its Use in Clinical Measurement” ,AcademicPress,San Diego,1982



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้