

เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ความต้านทาน

SIMPLE REMOTE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR RESISTIVE SENSOR INTERFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเอกสารศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-060-129

เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน

SIMPLE REMOTE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR RESISTIVE SENSOR INTERFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

KMITL-2013-EN-M-060-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SIMPLE REMOTE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR RESISTIVE SENSOR INTERFACE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **KMITL-2013-EN-M-060-129** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน  
Thesis Title Simple Remote Measurement Technique for Resistive Sensors Interface  
นักศึกษา นายนวเรศ สุวรรณมงคล  
รหัสประจำตัว 52611101  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-060-129

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฟุคักดี	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิธรรม	
รศ.ดร.อัมพวัน	จุลเสรีวงศ์	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสรีวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 09.00-10.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุขขวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2556  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ ความต้านทาน
นักศึกษา	นายนวเรศ สุวรรณมงคล
รหัสประจำตัว	52611101
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน การสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดเพื่อสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด วงจรที่สร้างขึ้นประกอบด้วยวงจรสายพานกระแสร่นที่สอง ไดโอด บัฟเฟอร์ วงจรสุ่มและคงค่า และวงจรถยายแบบบวมสัญญาณ ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และผลทดลองจากการต่อวงจรจริงสามารถยืนยันได้ถึงไม่เพียงแต่การทำงานที่ดีเท่านั้น แต่ยังแสดงถึงการชดเชยค่าความต้านทานสายที่มีประสิทธิภาพของวิธีการที่ได้นำเสนออีกด้วย

Thesis	Simple Remote Measurement Technique for Resistive Sensor Interface
Student	Mr. Navarest Suwannamongkol
Student ID.	52611101
Degree	Master of Engineering
Program	Instrument Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Prasit Julsereewong

## ABSTRACT

This thesis presents a simple remote measurement technique for resistive sensor interface. The proposed realization method employs commercially available devices to generate the output voltage, which is linearly proportional to the sensing resistance. Implemented circuit consists of the second generation current conveyor, diodes, buffer, sample and hold circuits, and summing amplifier. PSPICE simulation and experimental results are given to confirm not only the good operation but also the effective lead-resistance compensation of the proposed method.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของ บุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะกล่าวหาได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่คุณศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณคือ รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อัมพวัน จุลเสรีวงศ์ และพื่อภิญญ์ ฤกษ์รัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษาตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของการออกแบบวงจรเลียนแบบผ่านโปรแกรม PSPICE และวงจรสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกล

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดามารดาที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คอยเป็นแรงผลักดันช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจที่ติดลวดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นวเรศ สุวรรณมงคล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VI
สารบัญตาราง .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 เทคนิคการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกล.....	4
2.1 กล่าวนำ .....	4
2.2 ความต้านทานไฟฟ้า.....	4
2.3 เซนเซอร์ความต้านทาน .....	7
2.3.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี .....	7
2.3.2 เซนเซอร์สเตรนเกจ .....	8
2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน.....	9
2.4.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรบริดจ์.....	9
2.4.1.1 อาร์ทีดีแบบ 2 สาย.....	9
2.4.1.2 อาร์ทีดีแบบ 3 สาย.....	10
2.4.1.3 อาร์ทีดีแบบ 4 สาย.....	11
2.4.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิสเตอร์.....	12
2.4.2.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 2 สาย .....	12
2.4.2.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 4 สาย .....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วงจรย่อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจร .....	16
3.1 กล่าวนำ .....	16
3.2 วงจรย่อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจร.....	16
3.2.1 วงจรสายพานกระแส.....	16
3.2.1.1 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.2	วงจรสายพานกระแสร่นที่สอง.....	18
3.2.1.3	วงจรสายพานกระแสร่นที่สาม.....	21
3.2.2	ออปแอมป์ .....	22
3.2.2.1	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส .....	24
3.2.2.2	วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส .....	26
3.2.2.3	วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน .....	27
3.2.2.4	วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ .....	28
3.2.2.5	วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ .....	29
3.2.3	วงจรสุ่ม และคงค่า .....	30
บทที่ 4	เทคนิคการวัดระยะไกลสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ที่นำเสนอ.....	33
4.1	กล่าวนำ .....	33
4.2	หลักการพื้นฐานการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกล.....	33
4.3	การสังเคราะห์วงจร .....	34
4.4	ผลการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE .....	36
4.5	ผลทดสอบด้วยการต่อวงจรจริง .....	44
บทที่ 5	บทสรุป และข้อเสนอแนะ .....	47
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	47
	เอกสารอ้างอิง.....	50
	ภาคผนวก ก บทควมวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	52
	ภาคผนวก ข แบบลายวงจรการเชื่อมต่อความต้านทานบนแผ่นวงจร.....	60
	ประวัติผู้เขียน .....	63

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น.....	6
2.2 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี ในอุตสาหกรรม .....	7
2.3 เซนเซอร์สเตรนเกจแบบต่าง ๆ .....	9
2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวิสต์โตนบริดจ์แบบ 2 สาย .....	10
2.5 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวิสต์โตนบริดจ์แบบ 3 สาย.....	11
2.5 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวิสต์โตนบริดจ์แบบ 4 สาย.....	12
2.7 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 2 สาย .....	12
2.8 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 4 สาย .....	13
ก) รูปสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบกระแส .....	13
ข) รูปสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบแรงดัน .....	13
2.9 เทคนิคการวัดระยะไกลโดยใช้เซนเซอร์ความต้านทานเป็นโหนดที่ถูกต้องลงกราวด์ของตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส .....	14
3.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส .....	16
3.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง .....	17
3.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง .....	19
3.4 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ .....	19
3.5 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส .....	20
3.6 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม .....	21
3.7 วงจรภายในออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ .....	23
3.8 ออปแอมป์ทางอุดมคติ.....	24
3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส.....	25
3.10 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส.....	26
3.11 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน .....	27
3.12 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ.....	28
3.13 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ.....	29
3.14 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ .....	31
3.15 สัญญาณต่างๆ ในวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ .....	31
ก) สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้วงจร .....	31
ข) สัญญาณนาฬิกา .....	31
ค) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจร .....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 หลักการพื้นฐานของเทคนิคที่นำเสนอ.....	33
4.2 การสังเคราะห์วงจรอย่างง่ายสำหรับเทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอ.....	35
4.3 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ $R_{SENS} = 400 \Omega$ ในกรณีที่ 1.....	37
4.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ $R_{SENS} = 400 \Omega$ ในกรณีที่ 2.....	38
4.5 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ $R_{SENS} = 400 \Omega$ ในกรณีที่ 3.....	38
4.6 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ $R_{SENS} = 400 \Omega$ ในกรณีที่ 4.....	39
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{SENS}$ และ $V_o$ ในกรณีที่ 1.....	40
4.8 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 1.....	41
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{SENS}$ และ $V_o$ ในกรณีที่ 2.....	41
4.10 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 2.....	42
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{SENS}$ และ $V_o$ ในกรณีที่ 3.....	42
4.12 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 3.....	43
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{SENS}$ และ $V_o$ ในกรณีที่ 4.....	43
4.14 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 4.....	44
4.15 การทดลองวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน.....	45
4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ $R_{SENS} = 401\Omega$ ในกรณีที่ 1.....	45
4.17 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ $R_{SENS} = 401\Omega$ ในกรณีที่ 2.....	46
4.18 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ $R_{SENS} = 401\Omega$ ในกรณีที่ 3.....	46
4.19 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ $R_{SENS} = 401\Omega$ ในกรณีที่ 4.....	47
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V_o$ ที่วัดได้และค่า $R_{SENS}$ .....	47
ข.1 ลายวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้านล่าง.....	58
ข.2 ลายวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้านบน.....	58
ข.3 ตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน.....	59
ข.4 รูปวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานบนแผ่นวงจร.....	59

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า และการนำไฟฟ้าของสารต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 °C.....	4
4.1 ค่าที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE .....	39
4.2 ค่าที่ได้จากการต่อวงจรจริงสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ระยะไกลบนแผ่นทดสอบ.....	45



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบการวัดอุณหภูมิทางอุตสาหกรรมมีเซนเซอร์ความต้านทานหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้อุตสาหกรรมคือ เซนเซอร์ความต้านทาน (resistive sensor) จำพวกอาร์ทีดี (Resistive Temperature Detector: RTD) สำหรับการวัดค่าอุณหภูมิที่มีพิสัยระบุ (Range) ต่ำกว่าประมาณ  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1] เนื่องจากราคาติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิไม่แพง เมื่อเทียบกับการใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และเซนเซอร์ความต้านทานแบบสเตรนเกจ (Strain Gauge) เพื่อตรวจวัดค่าความเค้น ค่าความดันหรือค่าตัวแปรกระบวนการอื่น ๆ โดยมีการต่อผ่านสายนำสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ความต้านทานแบบสเตรนเกจไปใช้งาน โดยสายนำสัญญาณส่งผ่านวงจรวัด (Bridge Circuit) สำหรับอ่านค่าสัญญาณเอาต์พุต แต่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรวัด เป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเอาต์พุตของเซนเซอร์เฉพาะกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าของตัวต้านทานที่ต่อเป็นแขนของวงจรวัด (All-element Varying) เท่านั้น ดังนั้น ในการตรวจวัดค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่ต่อเพียงแค่แขนเดียวของวงจรวัด (Single-element Varying) จำเป็นต้องใช้เทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ในปี ค.ศ. 2000 S. J. Azhari และ H. Kaabi [2] ได้นำเสนอเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยการออกแบบวงจรโดยใช้วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง หรือ CCII (Second Generation Current Conveyor) ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคที่นำเสนอดังกล่าวมีข้อจำกัดมาจากความต้านทานแฝงที่อินพุตพอร์ต  $X(R_x)$  ของวงจรสายพานกระแส ทำให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีความผิดพลาด ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Y. H. Ghallab และ W. Badawy [3] จึงได้นำเสนอวงจรในรูปแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบจากความต้านทาน  $R_x$  โดยใช้วงจร OFCC (Operational Floating current conveyor) จำนวน 3 วงจร ในการสังเคราะห์ OFCC แต่ละวงจรทำได้โดยใช้โอปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ AD846AQ 1 ตัว และวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) 4 วงจรที่สร้างจากทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ (Transistor Array) เบอร์ CA3096CE จากการสังเคราะห์วงจร OFCC จะเห็นได้ว่า ความถูกต้องในการทำงานของวงจร OFCC ขึ้นอยู่กับความสมพงษ์กันทุกประการของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรสะท้อนกระแส นอกจากนี้ในบทความวิจัย [3] ไม่ได้แสดงผลการเลียนแบบการทำงานหรือผลการต่อวงจรจริงเพื่อเป็นการยืนยันถึงความสามารถในการทำงานของเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ OFCC ที่นำเสนอในปีเดียวกัน S. Gift และ B. Maundy [4] ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรแบบใหม่ในการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ( $\Delta R$ ) ขนาดเล็ก โดยใช้ CCII ต่อร่วมกับโอปแอมป์ เทคนิคการสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอนี้มีจุดเด่นที่ใช้อุปกรณ์น้อยและโครงสร้างเรียบง่าย และใช้วงจรรวมหรือโอซีสำเร็จรูป แต่อย่างไรก็ตาม วงจรที่นำเสนอดังกล่าวมีเงื่อนไขในการออกแบบในการใช้งานคือ  $\Delta R$  ที่ต้องการตรวจวัดนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของเซนเซอร์มาก ๆ ไม่เช่นนั้นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจะมีความผิดพลาด ดังนั้นวงจรที่นำเสนอใน [4] จึงเหมาะสำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กของเซนเซอร์ความต้านทาน อาทิเช่น สเตรนเกจ เท่านั้น ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 A. Julsereewong และคณะ [5] ได้นำเสนอวงจรเชื่อมต่อที่มีความเป็นเชิงเส้นสำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป โดยวงจรที่นำเสนอนี้มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรบริดจ์คือลดจำนวนอุปกรณ์ที่ต่อในวงจรบริดจ์ลง และสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์ แต่อย่างไรก็ตาม หลักการที่นำเสนอตั้งกล่าวไม่ได้มุ่งเน้นการออกแบบวงจรที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการวัดระยะไกล

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการวัดที่ใช้เซนเซอร์ความต้านทานในระยะไกล ความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ ความต้านทานมีผลต่อความถูกต้องในการวัด วิทยานิพนธ์นี้จึงมีความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคการวัดระยะไกลที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน โดยเทคนิคที่นำเสนอมีฟังก์ชันการทำงานที่ถูกต้องและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนยุ่งยาก นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์วงจรได้ง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาด

## 1.3 การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์

จากการติดตามผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดระยะไกลที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน พบว่าในปี ค.ศ. 2009 T. K. Maiti และ A. Kar [6] ได้นำเสนอเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับการวัดระยะไกลที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน โดยใช้เซนเซอร์ความต้านทานเป็นโหลดที่ถูกต้องลงกราวด์ของตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส (Voltage-to-Current Converter) แต่ในบทความวิจัย [6] ไม่ได้มุ่งเน้นการออกแบบในส่วนการจัดการสัญญาณเอาต์พุต แต่ใช้ดิจิตอลสโตเรจออสซิลโลสโคป (Digital Storage Oscilloscope) ในการประมวลผลสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเทคนิคที่นำเสนอในบทความวิจัย [6] มาพัฒนาต่อ โดยเพิ่มหลักการออกแบบวงจรในส่วนการจัดการสัญญาณเพื่อให้มีโครงสร้างที่ง่ายและได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบหลักการพื้นฐานในการทำงาน และสังเคราะห์วงจรโดยใช้อุปกรณ์และไอซีสำเร็จรูป แล้วทำการทดสอบสมรรถนะของเทคนิคที่นำเสนอด้วยการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSPICE และทำการต่อวงจรบนแผ่นทดลองเพื่อเป็นการยืนยันถึงฟังก์ชันในการทำงานว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท และภาคผนวก 3 ส่วนโดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงเซนเซอร์ความต้านทานชนิดต่าง ๆ และการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรต่าง ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงนิยามของวงจรสายพานกระแส วงจรขยายสัญญาณต่าง ๆ หลักการต่าง ๆ พร้อมทั้งสังเคราะห์วงจร

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการออกแบบวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกลที่นำเสนอ และการเลียนแบบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยโปรแกรม PSPICE เทียบกับการต่อวงจรทดสอบ

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการวิทยานิพนธ์ และพัฒนาต่อไป

ในส่วนสุดท้ายของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นภาคผนวกที่แสดงผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ และประวัติผู้เขียน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติของความต้านทานไฟฟ้า เช่น เซอร์ความต้านทาน การเชื่อมต่อ เซอร์ความต้านทาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการวัดระยะไกลสำหรับการเชื่อมต่อเซอร์ความต้านทาน

#### 2.2 ความต้านทานไฟฟ้า [7] - [8]

ความต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไหลผ่านไปได้มากหรือน้อย ความต้านทานไฟฟ้าน้อยการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าผ่านไปได้มาก แต่ถ้าความต้านทานไฟฟ้ามากซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับท่อน้ำ ท่อขนาดใหญ่จะทำให้น้ำไหลผ่านได้มากกว่าท่อเล็ก หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยว่า ท่อขนาดใหญ่มีความต้านทานน้อยกว่าท่อขนาดเล็ก โดยปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

- ชนิดของลวดตัวนำ ตัวนำของสารแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ความต้านทานหรือขีดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านสารนั้น ๆ แตกต่างกันไป โลหะแต่ละชนิดก็มีความต้านทานแตกต่างกันไปเป็นค่าเฉพาะตัว ดังตารางที่ 2.1 โดยที่โลหะเงิน (Silver: Ag) จะมีความต้านทานน้อยที่สุดและรองลงมาคือ ทองแดง (Copper: Cu)

ตารางที่ 2.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า และการนำไฟฟ้าของสารต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 °C

Material	Electrical resistivity ( $\Omega\text{m}$ )	Electrical conductivity ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )
<b>Metals</b>		
Ag	$1.61 \times 10^{-8}$	$6.2 \times 10^7$
Cu	$1.69 \times 10^{-8}$	$5.92 \times 10^7$
Au	$2.26 \times 10^{-8}$	$4.44 \times 10^7$
Al	$2.83 \times 10^{-8}$	$3.57 \times 10^7$
<b>Semiconductors</b>		
Ge	0.47	2.1
Si	$3 \times 10^3$	$3 \times 10^{-4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) สภาพต้านทานไฟฟ้า และการนำไฟฟ้าของสารต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 °C

Material	Electrical resistivity ( $\Omega\text{m}$ )	Electrical conductivity ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )
<b>Insulators</b>		
Diamond	$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{-14}$
Mica	$9 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{-15}$

- ขนาดลวดตัวนำ ตัวนำชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกัน ทำให้ความสามารถต้านทานหรือขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านสารนั้น ๆ แตกต่างกัน โดยความต้านทานจะแปรผกผันกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ โดยลวดตัวนำชนิดเดียวกันและยาวเท่ากัน ลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่จะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก แต่ความต้านทานจะแปรผันตรงกับความยาวของลวดตัวนำ โดยลวดตัวนำชนิดเดียวกัน และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ลวดตัวนำที่สั้นจะมีความต้านทานน้อยกว่าลวดตัวนำที่ยาว

- ความยาวของลวดตัวนำ ความต้านทานจะแปรผันตรงกับความยาวของลวดตัวนำ โดยลวดตัวนำชนิดเดียวกัน และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ลวดตัวนำที่สั้นจะมีความต้านทานน้อยกว่าลวดตัวนำที่ยาวโดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของตัวนำกับความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับการนำไฟฟ้าของวัสดุเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

โดยที่

$R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม  $\Omega$  (Ohm)

$l$  คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $\text{m}^2$ )

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของสาร มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร( $\Omega\cdot\text{m}$ )

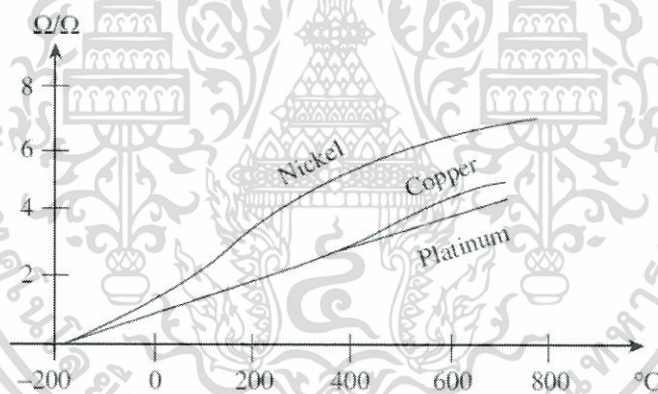
$\sigma$  คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เป็นส่วนกลับกับ  $\rho$  มีหน่วยเป็น  $(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ประเภทได้แก่

1. ตัวนำที่ทำมาจากโลหะบริสุทธิ์ เมื่อวัดความต้านทานของตัวนำที่เป็นโลหะ ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำจะเพิ่มขึ้น และความต้านทานจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งโลหะแต่ละชนิดก็มีความต้านทานแตกต่างกันไปเป็นค่าเฉพาะตัว ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของแพลทินัม (Platinum) มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานมีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นมากกว่านิกเกิล (Nickel) หรือทองแดง (Copper) โดยความรู้นี้ได้้นำแพลทินัม นำไปสร้างเทอร์มอมิเตอร์ชนิดความต้านทานอย่างแพร่หลาย

2. ตัวนำที่ทำมาจากโลหะผสมหรือการเติมธาตุผสมในโลหะบริสุทธิ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำจะเพิ่มขึ้น หรือทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นไปด้วยความยากมากขึ้น  $\rho_{Pure} > \rho_{Alloy}$  ซึ่งโลหะผสมบางชนิด พบว่า เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง แต่ความต้านทานของโลหะผสมเปลี่ยนน้อยมาก และได้นำความรู้นี้ใช้สร้างเทอร์มอมิเตอร์ชนิดความต้านทานมาตรฐาน สำหรับเป็นตัววัดที่อ้างอิงซึ่งมีความต้านทานคงตัว เช่น ตัวต้านทานที่ทำด้วยแมงกานีส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

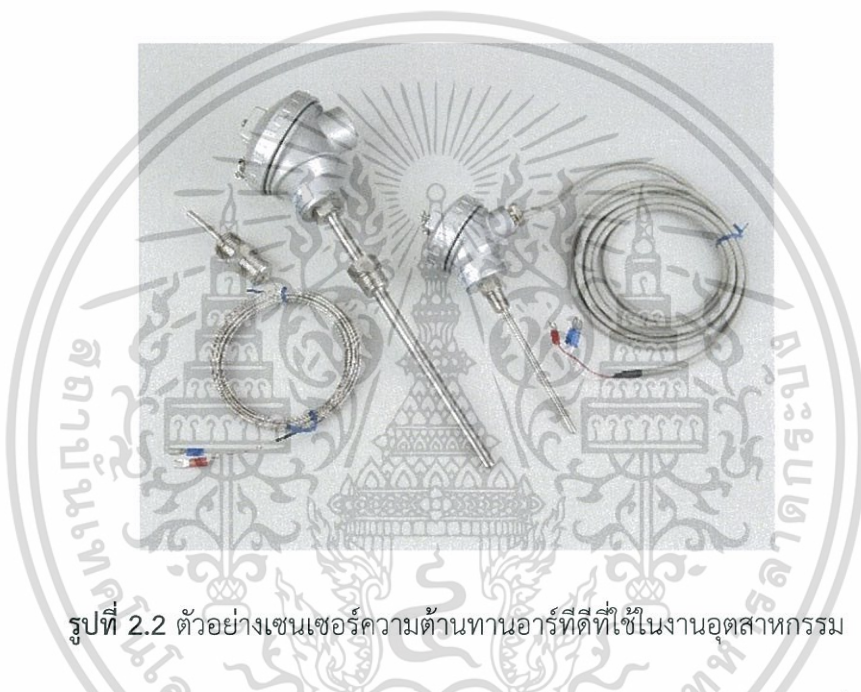
3. ตัวนำที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำสภาพต้านทานอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนสารกึ่งตัวนำ เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง โลหะที่นำไฟฟ้าได้ และ นำไฟฟ้าไม่ได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สภาพต้านทานของตัวนำจะมีค่าสูงขึ้นหรืออุณหภูมิต่ำลง ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำจะลดลงอย่างรวดเร็วและว่าการนำไฟฟ้าจะดีขึ้น อย่างเช่น คาร์บอน และซิลิคอน ดังนั้นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ประเภทรกึ่งตัวนำประกอบอยู่ในวงจรจึงทำงานเป็นปกติเฉพาะในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซนเซอร์ความต้านทาน [7] - [8]

เซนเซอร์ความต้านทานมีการนำไปใช้วัดหลาย ๆ อย่างในปัจจุบันเช่น อุณหภูมิ หรือตราซิ่ง ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม หรือแม้แต่ในชีวิตประจำวัน ในวิทยานิพนธ์นี้ขออธิบายถึงเซนเซอร์ความต้านทานที่นิยมใช้เท่านั้นคือ เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และเซนเซอร์จำพวกสเตรนเกจ สำหรับวัดน้ำหนัก หรือวัดความดัน

### 2.3.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ในปี ค.ศ. 1821 เซอร์ฮัมฟรีย์ เดวี ได้ค้นพบว่า ค่าความต้านทานของลวดโลหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่อมาปี ค.ศ. 1871 เซอร์วิลเลียม ซีเมนส์ได้ทำการทดลองอย่างจริงจังและพบว่าความต้านทานของเส้นลวดแพลทินัมสามารถใช้เป็นตัวกลางวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ และต่อมาได้นำหลักการนี้พัฒนามาเป็นเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี (Resistance Temperature Detectors) ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ตัวอย่างเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีสำหรับการวัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเหมาะกับการวัดที่มีจุดแข็งตัวของออกซิเจน ( $-182.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ไปจนถึงจุดแข็งตัวของแอนติโมนี ( $630.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

หลักการของอาร์ทีดีคือ ความต้านทานไฟฟ้าในเส้นลวดโลหะจะเปลี่ยนค่าไปตามสมการที่ (2.3) ดังนี้

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- $R_t$  คือ ค่าความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิ  $t$  °C  
 $R_0$  คือ ค่าความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิ 0 °C  
 $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ต่ออุณหภูมิ 1 °C

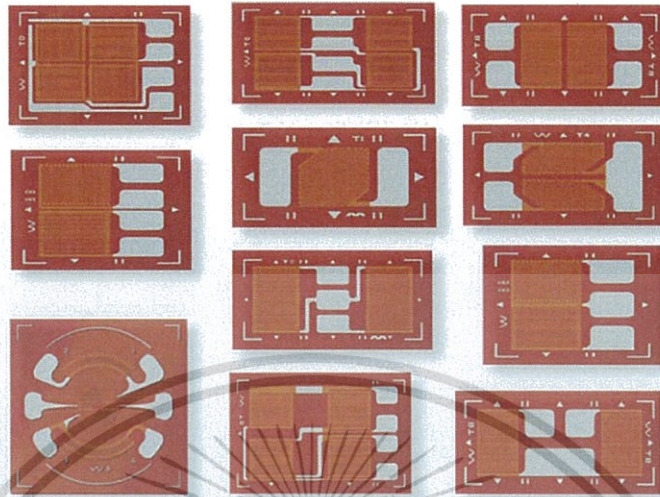
โดยค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  จะขึ้นอยู่กับชนิดโลหะที่นำมาเป็นเซนเซอร์ความต้านทาน เช่น แพลทินัม 0.00392  $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$  จากย่านอุณหภูมิ 0-100 °C, นิกเกิล 0.0063  $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$  หรือทองแดงที่ 0.00425  $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละช่วงไม่แปรผันเป็นเส้นตรง (Non Linearity) ในห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ต้องการค่าที่ถูกต้อง จะใช้สมการดังต่อไปนี้ในการคำนวณ

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^4) \quad (2.4)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  เป็นค่าที่ทางผู้ผลิตเป็นผู้กำหนด เช่น แพลทินัมมีค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  มีค่าเท่ากับ 0.00375, 0.16 และ 1.605 ตามลำดับ [8] ในการใช้งานจริง ถึงแม้สมการที่ (2.4) จะมีค่าความถูกต้อง (หรือ Accuracy) สูง แต่โดยทั่วไปนิยมใช้สมการที่ (2.3) โดยเลือกค่า  $\alpha$  ตามแต่ละชนิดของโลหะ

### 2.3.2 เซนเซอร์สเตรนเกจ

สเตรนเกจ (Strain) เป็นตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน (Passive Transducer) ที่ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในขดลวด เพื่อการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น ที่เกิดจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่นการวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ (Displacement) สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบยึดติด (Bonded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gage) ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้าง และการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ ขดไปขดมาดังแสดงในรูปที่ 2.3 และนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการวัด สเตรนเกจจะถูกดึงเมื่อเกิดความเครียดของวัตถุ ถูกดึงให้ยืดออก ทำให้ความยาวของขดลวดเล็กเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันพื้นที่หน้าตัดของขดลวดลดลง ผลก็คือ ความต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของตัวนำกับความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุได้ดังสมการที่ (2.1) ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.3 เซนเซอร์สเตรนเกจแบบต่าง ๆ

## 2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน [7]

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานจำพวกอาร์ทีดีและสเตรนเกจที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีด้วยกันคือ การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรถัด (Bridg e Circuit) และการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Commercial Transmitter)

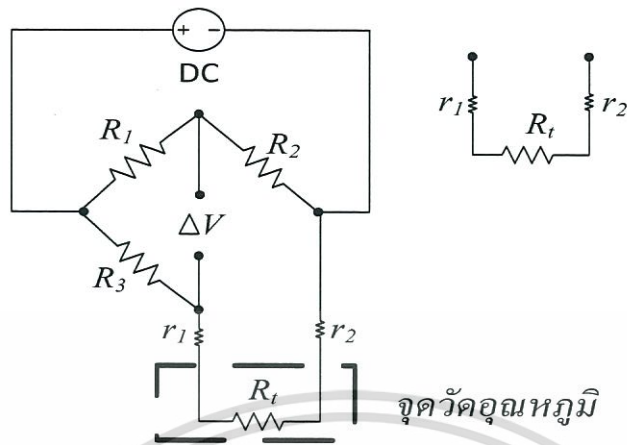
### 2.4.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรถัด

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรถัด มีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับเซนเซอร์แต่ละชนิด ยกตัวอย่าง การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบอาร์ทีดีมีด้วยกัน 3 วิธีคือ

#### 2.4.1.1 อาร์ทีดีแบบ 2 สาย

วงจรใช้งานพื้นฐานของเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีชนิด PT-100 (เมื่อเซนเซอร์ความต้านทานที่อุณหภูมิ 0 °C จะมีความต้านทาน 100 Ω) ต่อกับวงจรถัด แบบ 2 สาย โดยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีจะติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ โดยมีค่าความต้านทาน 100 Ω อีก 3 ตัวในวงจรคือ  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  ซึ่งต้องอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์ แบบ 2 สาย

จากรูปที่ 2.4 วงจรบริดจ์ จะอยู่ในสภาวะสมดุล อาร์ทีดีอยู่ที่  $0^\circ\text{C}$  แล้วทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ของเซนเซอร์ความต้านทาน  $R_t$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  ดังสมการต่อไปนี้

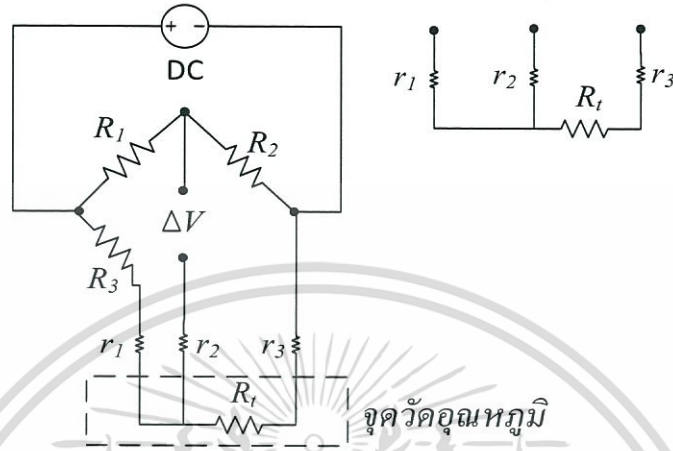
$$\frac{R_t}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.5)$$

ซึ่งจะไม่มีกระแสไหลผ่านกัลวานมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิที่เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีสูงขึ้นค่า เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีจะเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรบริดจ์ ไม่สมดุลและมีกระแสไหลผ่านกัลวานมิเตอร์ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี 2 สายเหมาะกับการใช้งานที่เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีอยู่ใกล้กับวงจรเท่านั้น ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องลากสายยาว ๆ เนื่องจากจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากค่าความต้านทานสะสมของสายตัวนำ และวิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นใน เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดเพี้ยนไปด้วยดังนั้นการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์ แบบ 2 สายจึงเหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง

#### 2.4.1.2 อาร์ทีดีแบบ 3 สาย

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์ แบบ 3 สายดังรูปที่ 2.5 เป็นที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 ที่อยู่ระหว่างจุดที่วัดกับวงจร จะต้องมีขนาด, ความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเพื่อให้ค่าความต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันด้วยขนาดที่เท่ากัน ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ของเซนเซอร์ความต้านทาน  $R_t$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{R_t + r_3}{R_3} = \frac{R_1 + r_1}{R_2} \quad (2.6)$$

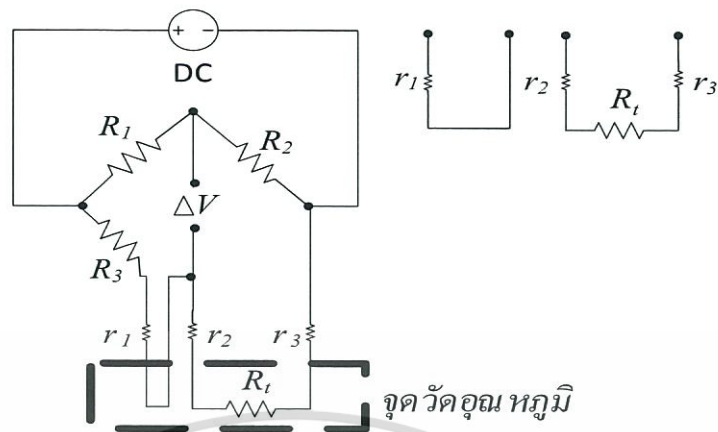


รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์ แบบ 3 สาย

เนื่องจาก  $r_1$  เท่ากับ  $r_3$  เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่วัดจึงขึ้นอยู่กับเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีเพียงตัวเดียว เนื่องจากสายเส้นที่ 3 จะช่วยชดเชยความต้านทานของสายที่เกิดขึ้น ทำให้เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี 3 สายมีความถูกต้องสูงกว่าเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีแบบ 2 สาย ดังนั้นวิธีแบบ 3 สาย จึงเป็นการปรับปรุงจากวิธีแบบ 2 สาย ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีและจะมีการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม สายเส้นที่สามจะช่วยชดเชยความต้านทานของสายที่เกิดขึ้น แต่วิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นใน เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดเพี้ยนในการวัดดังที่กล่าวมา

#### 2.4.1.3 อาร์ทีดีแบบ 4 สาย

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์ แบบ 4 สายดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นแบบที่มีความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องจากเลื่อนจุดต่อของวงจรบริดจ์ ออกไปอยู่ภายนอกทั้ง 4 จุด ดังนั้นสามารถชดเชยความต้านทานของสายตัวนำได้ทั้งหมด โดยสายทั้ง 4 ต้องมีขนาด และความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอด ดังนั้นหากนำไปวัดค่าความต้านทานของสายทั้งสองคู่ก็จะเจอสภาพแวดล้อมเหมือนกัน จึงทำให้ผลของความต้านทานของสายถูกกำจัดออกไป วิธีนี้จะช่วยกำจัดความผิดพลาดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในความต้านทานอาร์ทีดี ทำให้ค่าที่อ่านได้มีความถูกต้องสูงมากกว่าวิธีแบบ 2 และแบบ 3 สาย



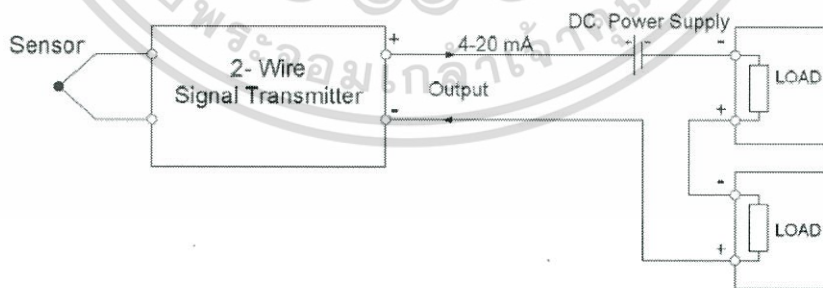
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรบริดจ์แบบ 4 สาย

#### 2.4.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ดังนี้

##### 2.4.2.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สาย

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สาย (2-Wire Signal Transmitter) เป็นแบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.7 โดยใช้สายเพียง 2 เส้น ซึ่งสายเป็นสัญญาณเอาต์พุตของทรานสมิตเตอร์ และเป็นสายของ Power Supply สำหรับจ่ายเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Loop Power โดยสัญญาณของทรานสมิตเตอร์ เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ข้อดีของการเชื่อมต่อทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สายแบบนี้คือ ประหยัดสายในการติดตั้ง

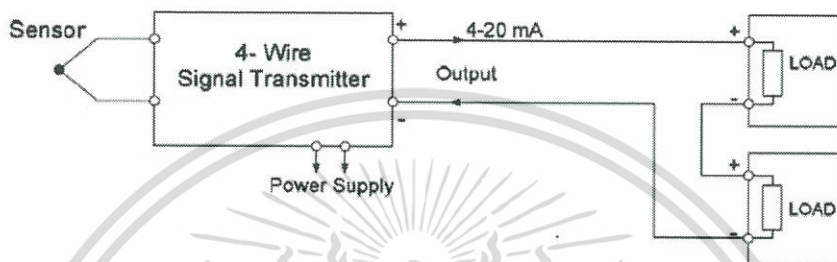


รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สาย

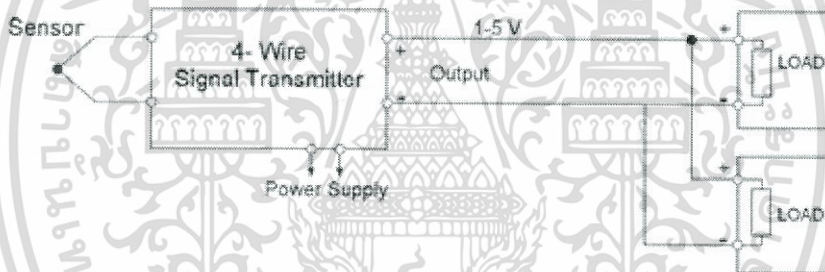
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 4 สาย

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 4 สาย (4-Wire Signal Transmitter) จะใช้สายสัญญาณ 2 เส้น และสาย Power Supply อีก 2 เส้นแยกกันสัญญาณเอาต์พุต ของ 4 Wire Signal Transmitter มีทั้งที่เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน และสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน สัญญาณจะแตกต่างกันดังรูปที่ 2.8



ก) รูปสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบกระแส

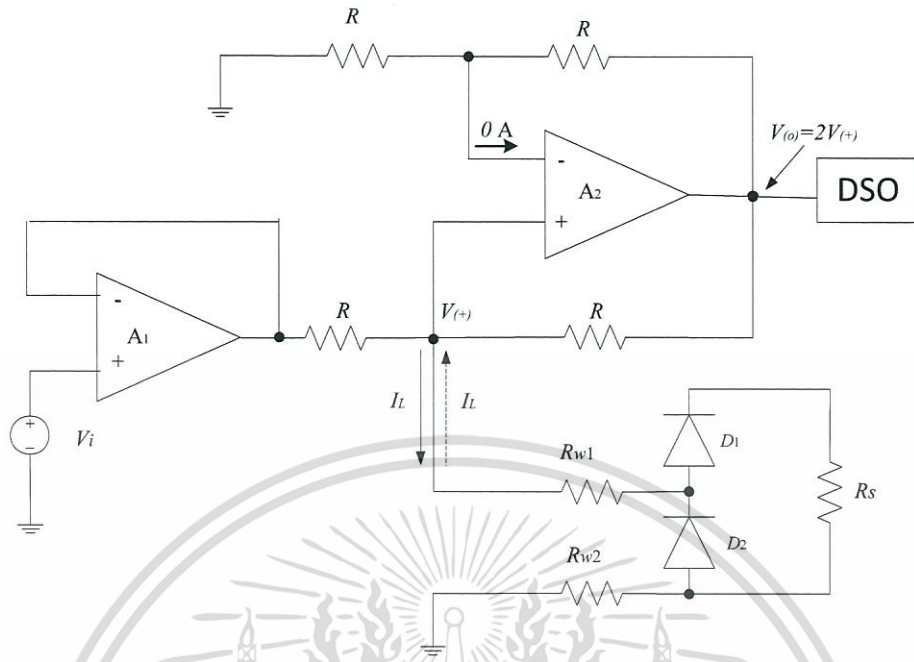


ข) รูปสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบแรงดัน

รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 4 สาย

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการวัดระยะไกลสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานที่จะอธิบายในเนื้อหาส่วนนี้เป็นงานวิจัยที่นำเสนอโดย T. K. Maiti และ A. Kar [6] ซึ่งเป็นการนำเสนอการวัดระยะไกลที่มีการชดเชยค่าความต้านทานของสายสัญญาณสำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน โดยใช้เซนเซอร์ความต้านทานเป็นโหลด ที่ถูกต่อลงกราวด์ของตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสที่สร้างจากออปแอมป์ โดยสามารถแสดงรายละเอียดวงจรได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เทคนิคการวัดระยะไกลโดยใช้เซนเซอร์ความต้านทานเป็นโหลดที่ถูกต่อลงกราวด์ของตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส

จากรูปที่ 2.9 วงจรประกอบไปด้วยออปแอมป์สองตัว A<sub>1</sub> และ A<sub>2</sub> โดย A<sub>1</sub> ทำหน้าที่วงจรับuffer (Buffer Circuit) และ A<sub>2</sub> ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันให้อยู่ในรูปของกระแส (Voltage-to-Current Converter) โดยค่าเอาต์พุตที่ได้เป็น  $V_o$  เมื่อค่าแรงดันอินพุตเท่ากับ  $V_i$  โดยสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณที่เป็นพัลส์ โดยโหลดของวงจรนี้คือ  $R_s$  ซึ่งเป็นเซนเซอร์ความต้านทาน เมื่อมีการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกลจะทำให้เกิดค่าความต้านทานที่ในสาย ( $R_{w1}, R_{w2}$ ) และมีการเชื่อมต่อไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแส ณ จุด  $V_{(+)}$  โดยกระแสที่ไหล ( $I_L$ ) ในวงจรจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$I_L = \pm \frac{V_i}{R} \tag{3.38}$$

จากค่าแรงดันอินพุต  $V_i$  มีค่าเป็นบวก ทำให้ทิศทางของกระแสไหลผ่าน ความต้านทานของสาย ( $R_{w1}, R_{w2}$ ) ไดโอดตัวที่หนึ่ง  $D_1$  และผ่านเซนเซอร์ความต้านทาน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต  $V_{o(+)}$  ดังนี้

$$V_{o+} = 2V_+ = 2[(R_{w1} + R_s + R_{w2})I_L + V_{D1}] \tag{3.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าแรงดันอินพุต  $V_i$  มีค่าเป็นลบ ทำให้ทิศทางของกระแสไหลผ่านตรงกันข้ามกับแรงดันอินพุตที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งทำให้กระแสไหลผ่านความต้านทานของสาย ( $R_{w1}, R_{w2}$ ) และ ไดโอดตัวที่สอง  $D_2$  ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต  $V_{o(-)}$  ดังสมการที่ (3.40)

$$V_{o-} = 2V_- = -2[(R_{w1} + R_{w2})I_L + V_{D2}] \quad (3.40)$$

โดยที่

$V_{D1}$	คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดตัวที่หนึ่ง
$V_{D2}$	คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดตัวที่สอง
$R_{w1}$	คือ ค่าความต้านทานของสายเส้นที่หนึ่ง
$R_{w2}$	คือ ค่าความต้านทานของสายเส้นที่สอง
$R_s$	คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

จากสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.40) สามารถหาค่าเอาต์พุตเฉลี่ย ได้ดังสมการที่ (3.41)

$$V_{OMEAN} = 0.5[V_{o-} + V_{o+}] = R_s I_L \quad (3.41)$$

จากสมการที่ (3.41) แสดงให้เห็นถึงแรงดันเอาต์พุตที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของสาย ( $R_{w1}, R_{w2}$ ) ซึ่งทำให้ค่าในการวัดระยะไกลไม่มีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความต้านทานของสายทำให้ค่าเอาต์พุตนั้นมีค่าความผิดพลาด

## บทที่ 3

### วงจรร้อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจร

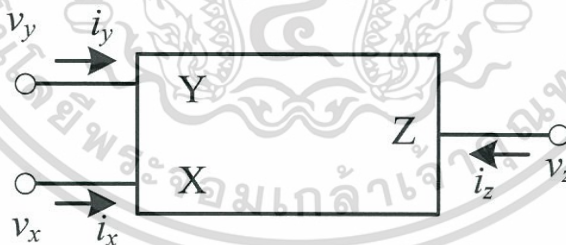
#### 3.1 กล่าวนำ

จากหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ วงจรการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน โดยนำเสนอการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์รวมเข้ากับวงจรรอปแอมป์ (Operational Amplifier) สำหรับทำการชดเชยความต้านทานสายนำสัญญาณที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลง และกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรสายพานกระแส วงจรขยายที่ใช้ออปแอมป์ และวงจรมุม และคงค่า

#### 3.2 วงจรร้อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจร

##### 3.2.1 วงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) เป็นอุปกรณ์ Active Building Block ที่มี 3 พอร์ตคือ มีพอร์ต X , Y เป็นพอร์ตอินพุต และพอร์ต Z เป็นพอร์ตเอาต์พุต ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 วงจรสายพานนำกระแสเป็นวงจรที่มีการพัฒนาปรับปรุงมาเป็นแต่ละรุ่นต่างกันไป โดยเริ่มจากวงจรกระแสรุ่นที่หนึ่ง (Current Conveyor I : CCI) [9] พัฒนาต่อเป็นสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Current Conveyor II) [10] และวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม (Third Generation Current Conveyor : CCIII) [11]

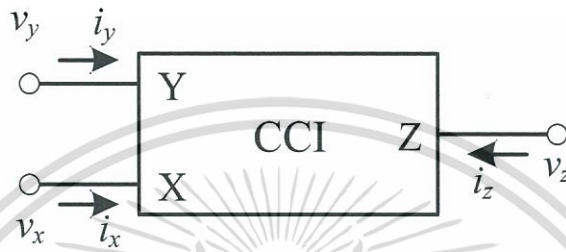


รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส

ซึ่งวงจรสายพานกระแสก็นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เพราะว่าวงจรสายพานกระแสแต่ละรุ่นสามารถนำไปใช้ในการประมวลสัญญาณได้ทั้งในโหมดแรงดัน และโหมดกระแส อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ในการออกแบบวงจรต่าง ๆ ได้อีกมากมาย โดยคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสในแต่ละรุ่นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 3.2.1.1 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) ได้มีการนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย A.Sedra และ K.C. Smith [9] ในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งเรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (The First-Generation Current Conveyor : CCI) จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ Active Building Block ที่มีพอร์ตอินพุต และพอร์ตเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง

หลักการทำงานของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่งคือ เมื่อมีแรงดันตกคร่อมด้านอินพุตพอร์ต Y แล้วจะทำให้มีแรงดันค่าเท่ากันเกิดขึ้นที่พอร์ต X ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่านพอร์ต X ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าค่าเท่ากันที่พอร์ต Y และกระแสไฟฟ้าเดียวกันนี้จะถูกนำพา (Conveyor) ไปด้านเอาต์พุตพอร์ต Z โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปของเมทริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$i_y = i_x \quad (3.2)$$

$$v_x = v_y \quad (3.3)$$

$$i_z = \pm i_x \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.1) แสดงพารามิเตอร์ที่ 3,2 มีค่าเป็น  $\pm 1$  แสดงให้เห็นถึงทิศทางกระแสที่เข้าหรือออกจากพอร์ต Z และพอร์ต X ว่ามีทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม ตามลำดับ สำหรับวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X มีทิศทางเดียวกันดังสมการที่ (3.4) เช่น ถ้า

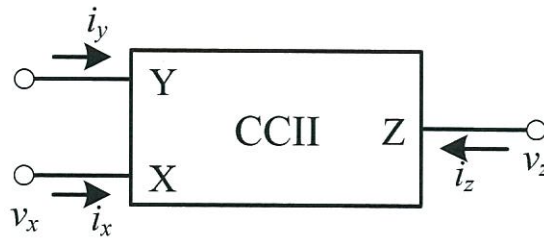
กระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X และกระแส  $i_z$  ไหลเข้าที่พอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCII+)” และวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X ทิศทางตรงข้ามกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X แต่กระแส  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCII-)” และที่พารามิเตอร์ที่ 1,2 มีค่าเป็น 1 ทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $i_y$  ที่พอร์ต Y เท่ากับกระแส  $i_x$  ที่พอร์ต X

### 3.2.1.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง

ในปี ค.ศ. 1970 A. Sedra และ K.C. Smith [10] ได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสโดยทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ทางด้านอินพุตที่พอร์ต Y ให้มีค่าสูงขึ้นจากวงจรสายพานรุ่นหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current Conveyor : CCII) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ Active Building Block แบบ 3 พอร์ตที่ถูกออกแบบให้สามารถรับอินพุตที่เป็นทั้งกระแสและแรงดันได้ โดยทั่วไปนิยามแทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2 โดยที่พอร์ต Y มีค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก เหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดัน ส่วนพอร์ต X มีค่าความต้านทานอินพุตต่ำ เหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณกระแส และที่พอร์ต Z มีค่าความต้านทานเอาต์พุตสูงมากซึ่งให้เอาต์พุตที่เป็นสัญญาณกระแส คุณสมบัติทางอุดมคติของ CCII ที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่งสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) เครื่องหมายบวกและลบ ( $\pm$ ) แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสที่เข้าหรือออกจากพอร์ต Z และพอร์ต X ว่ามีทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม ตามลำดับ สำหรับวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X ทิศทางตรงข้ามกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X และกระแส  $i_z$  ไหลเข้าที่พอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCII+)” และวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X ทิศทางตรงข้ามกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X แต่กระแส  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCII-)”



รูปที่ 3.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง

1) วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์  
 วงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าโดยทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically Tunable Second-Generation Current Controlled Conveyor : ECCII) คือ พอร์ต X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ ดังสมการที่ (3.6)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$i_y = 0 \quad (3.7)$$

$$v_x = v_y \quad (3.8)$$

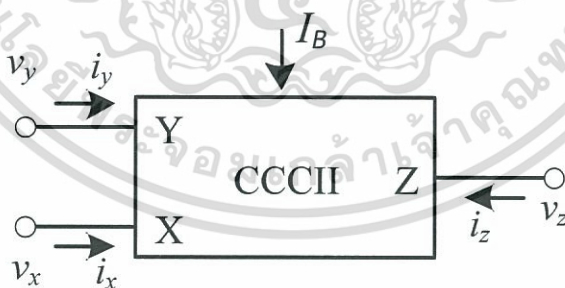
$$i_z = \pm A i_x \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.6) แสดงพารามิเตอร์ที่ 3,2 มีค่าเป็น  $\pm A$  ซึ่งสามารถปรับค่าได้ และจะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  พอร์ต X เป็น  $i_z = \pm A i_x$  ดังสมการที่ (3.9) กรณีที่  $i_z = A i_x$  กระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  พอร์ต X มีทิศทางการไหลกระแสทิศทางเดียวกัน เรียกว่าวงจรกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดบวก (ECCII+) กรณีที่  $i_z = -A i_x$  กระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  พอร์ต X มีทิศทางการไหลกระแสทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่าวงจรกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดลบ (ECCII-) คุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสที่พอร์ตต่าง ตามสมการที่(3.7) ถึงสมการที่ (3.9) อิมพีแดนซ์ที่พอร์ต Y, Z<sup>+</sup> และ Z<sup>-</sup> จะต้องมีค่าสูงมาก และอิมพีแดนซ์ที่พอร์ต X จะต้องมีค่าต่ำมาก

## 2) วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส [12] - [13]

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส (Second Generation Current Controlled Conveyor : CCCII) ได้พัฒนาขึ้นโดย A. Fabra [12] – [13] ซึ่งใช้วงจรทรานส์ลิเนียร์รูป มาต่อร่วมกับ วงจรสะท้อนกระแส และสามารถนำไปใช้งานได้ในงานได้ในย่านความถี่สูง [14] วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส จะมีคุณสมบัติคล้ายคลึง กับวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง แต่จะแตกต่างกันตรงที่เมื่อใช้กระแสไบอัสป้อนให้กับวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมกระแส ที่มีค่าไม่สูงมาก จะทำให้เกิดค่าความต้านทานแฝงปรากฏขึ้น (Parasitic Resistance) หรือค่าความต้านทานภายในเกิดขึ้นที่พอร์ต X ของวงจรสายพานกระแส ค่าความต้านทานนี้จะแปรผกผันกับค่ากระแสไบอัสจากภายนอก และจะแปรผันตรงกับอิมพีแดนซ์รอบข้าง วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส สามารถแทนด้วยพอร์ต X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส

เมื่อพิจารณารวมค่าความต้านทานภายใน จากพอร์ต Y และ X จะสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ ในรูปทั่วไปของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแสดังสมการที่ (3.10)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ค่าพารามิเตอร์ที่ 2,2 มีค่าความต้านทานภายในพอร์ต X ของวงจรสายพานกระแส ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $R_x$  นี้ขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้าง และสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการแปรค่ากระแสไบอัส  $I_R$  ซึ่งเป็นกระแสไบอัสจากภายนอกนั่นเอง โดยค่า  $R_x$  จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3.11)

$$R_x = \frac{V_T}{2I_B} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $V_T$  คือ แรงดันความร้อน (Thermal Voltage)

### 3.2.1.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม

ในปี ค.ศ. 1995 A. Fabre ได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม [9] ซึ่งมีคุณลักษณะที่สามารถนำไปทำการตรวจจับกระแสในอุปกรณ์แบบลอยตัวได้ (Floating Current Sensing Device) และได้ถูกนิยามว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม (Third Generation Current Conveyor: CCIII) โดยวงจรมี 3 พอร์ตเช่นเดียวกันรุ่นก่อน ๆ สามารถแทนด้วยพอร์ต X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม

เมื่อพิจารณารวมค่าความต้านทานภายใน จากพอร์ต Y และ X จะสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ในรูปทั่วไปของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สามแบบควบคุมได้ด้วยกระแสดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) จะได้ว่า

$$i_y = -i_x \quad (3.13)$$

$$v_x = v_y \quad (3.14)$$

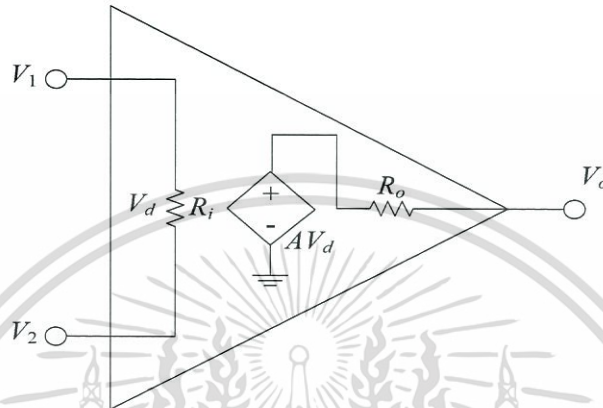
$$i_z = \pm i_x \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.12) ค่าพารามิเตอร์ที่ 1,2 มีค่าเป็น -1 ซึ่งจะแตกต่างไปจากเดิมที่มีค่าเป็น 1 และ 0 เท่านั้น ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $i_y$  ในพอร์ต Y และกระแส  $i_x$  ในพอร์ต X เป็น  $i_y = -i_x$  ค่าพารามิเตอร์ที่ 3,2 มีค่าเป็น  $\pm 1$  แสดงให้เห็นถึงทิศทางการไหลของกระแสที่เข้าหรือออกจากพอร์ต Z และพอร์ต X ว่ามีทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้ามดังสมการที่ (3.15) ตามลำดับ สำหรับวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X มีทิศทางเดียวกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X และกระแส  $i_z$  ไหลเข้าที่พอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCIII+)” และวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X ทิศทางตรงกันข้าม เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X แต่กระแส  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCIII-)” โดยที่กล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรกระแสรุ่นที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง และวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สาม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำค่าความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการ โดยแต่ละพารามิเตอร์ในแต่ละวงจรสายพานกระแสในแต่ละรุ่นจะให้ค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งวงจรสายพานกระแสแต่ละรุ่นอาจมีความเหมาะสมกับการใช้งาน กับชนิดวงจรใดชนิดหนึ่ง

### 3.2.2 ออปแอมป์

ออปแอมป์ (Operational Amplifier) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดวางอุปกรณ์ภายในอย่างซับซ้อน อันประกอบด้วย อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ และไดโอด เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงออปแอมป์ในลักษณะของบล็อกของวงจร และการต่อขั้วภายนอกเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์และใช้งานในทางปฏิบัติเท่านั้น ออปแอมป์อาจพิจารณาได้ว่าเป็นวงจรขยายแรงดันที่มีอัตราขยายสูงมาก ๆ หรือมองว่าเป็นหน่วยทาง อิเล็กทรอนิกส์ที่มีพฤติกรรมเหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบใช้แรงดันควบคุม (Voltage

Controlled Voltage Source) และนอกจากสามารถใช้ทำเป็นแหล่งจ่ายแบบแรงดันควบคุมหรือกระแสควบคุมได้แล้ว ยังใช้รวมสัญญาณ ขยายสัญญาณ อินทิเกรต หรือหาค่าอนุพันธ์ของสัญญาณได้ด้วย ความสามารถในการดำเนินการทางคณิตดังกล่าวจึงทำให้ถูกเรียกว่า Operational Amplifier หรือสั้น ๆ ว่า ออปแอมป์ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับสัญญาณได้หลากหลาย และเมื่อพิจารณาถึงวงจรภายในออปแอมป์ ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal) จะประกอบไปด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรภายในออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ

จากรูปที่ 3.7 วงจรสมมูลภายใน ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ (Non-Ideal Op amp) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.16)

$$V_o = AV_d = A(V_2 - V_1) \quad (3.16)$$

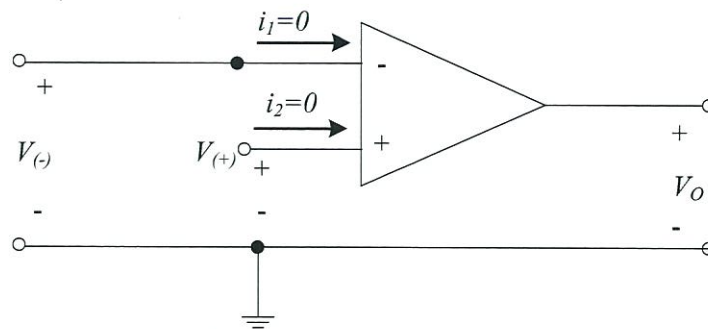
ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดัน จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อ มีแรงดันตกคร่อมที่  $R_i$  ซึ่งจะเกิดขึ้นจากแรงดันอินพุต  $V_1$  และ  $V_2$  นั่นเอง โดยปกติ และง่ายในการวิเคราะห์วงจรออปแอมป์ จะให้คุณลักษณะทางอุดมคติในการวิเคราะห์ออปแอมป์ทางอุดมคติคือ จะกำหนดให้อัตราขยายรูปเปิด  $A$  มีค่านันต์ ความต้านทานอินพุตมีค่าเป็นอนันต์ และความต้านทานเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์คือ

$$A \cong \infty \quad (3.17)$$

$$R_i \cong \infty \quad (3.18)$$

$$R_o \cong 0 \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.17) – (3.18) สามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ออปแอมป์ทางอุดมคติ

ดังนั้นจากรูปที่ 3.8 กระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางด้านอินพุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i_1 = 0 \quad (3.20)$$

$$i_2 = 0 \quad (3.21)$$

$$i_1 = i_2 \quad (3.22)$$

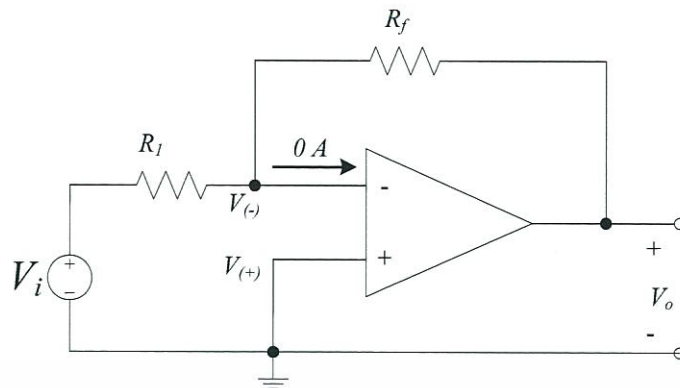
และแรงดันที่ขาบวกและขาลบจะมีค่าเท่ากัน

$$V_{(+)} = V_{(-)} \quad (3.23)$$

จากรูปที่ 3.7 และสมการที่ (3.20 – 3.23) ทำให้เริ่มคำนวณง่ายขึ้นจากวงจรสมมูลออปแอมป์ทางอุดมคติ (Ideal Op amp) และเราสามารถหาสมการของแรงดันอินพุต และเอาต์พุตได้จากทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ เคอร์เรนท ลอว์ (Kirchhoff's Current Laws : KCL) มาช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของแต่ละวงจรได้ดังนี้

### 3.2.2.1 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) คือ วงจรออปแอมป์ที่กลับสัญญาณอินพุต ให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม ซึ่งสามารถแสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

ซึ่งในวงจรขยายออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราขยายของวงจรได้ จากรูปที่ 3.9 เราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตคือ

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)} \quad (3.24)$$

จากรูปที่ 3.9 ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ขั้วบวกมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย และพิจารณาที่โหนด  $V_{(-)}$  ด้วยทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) จะได้สมการที่ (3.25)

$$\frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0 \quad (3.25)$$

เมื่อแทนค่า  $V_{(-)} = 0$  ในสมการที่ (3.25) จะได้สมการความสัมพันธ์คือ

$$\begin{aligned} \frac{-V_i}{R_1} + \frac{-V_o}{R_f} &= 0 \\ V_o &= -\frac{R_f}{R_1} V_i \end{aligned} \quad (3.25)$$

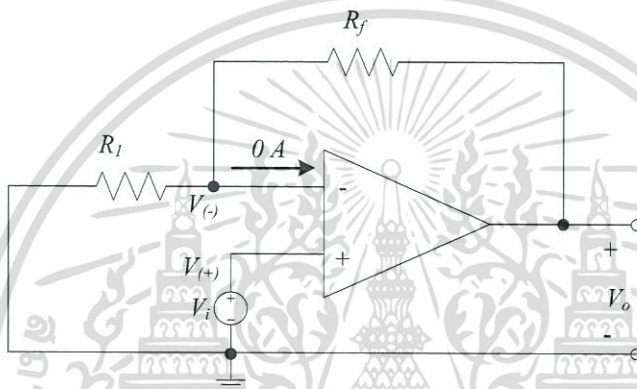
ซึ่ง  $-\frac{R_f}{R_1}$  คือ ค่าอัตราขยาย (voltage gain) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายมีค่าติดลบซึ่งเป็นการบ่ง

บอกถึงวงจรดังกล่าวทำหน้าที่กลับสัญญาณนั่นเอง และจะเห็นว่าอัตราขยายได้จากความต้านทานป้อนกลับหารด้วยความต้านทานที่ต่อด้านขาเข้า นั่นคือ อัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่

ต่อเข้ากับขั้วต่าง ๆ ของออปแอมป์เท่านั้น สำหรับตัวอย่างการใช้งานวงจรขยายแบบกลับขั้ว จะนิยมใช้เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกลับเฟสแรงดัน เป็นต้น

### 3.2.2.2 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Noninverting Amplifier) คือ วงจรออปแอมป์ที่มีสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตให้มีเครื่องหมายเหมือนเดิม ซึ่งสามารถแสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

จากรูปที่ 3.10 เราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตคือ

$$V_{(+)} = V_i = V_{(-)} \quad (3.26)$$

จากรูปที่ 3.10 ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันที่ขั้วจึงมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย และพิจารณาที่โหนด  $V_{(-)}$  ด้วยทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) จะได้สมการที่ (3.27)

$$\frac{V_{(-)}}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0 \quad (3.27)$$

เมื่อแทนค่า  $V_{(-)} = V_i$  ในสมการที่ (3.27) จะได้สมการความสัมพันธ์คือ

$$\frac{V_i}{R_1} + \frac{V_i - V_o}{R_f} = 0$$

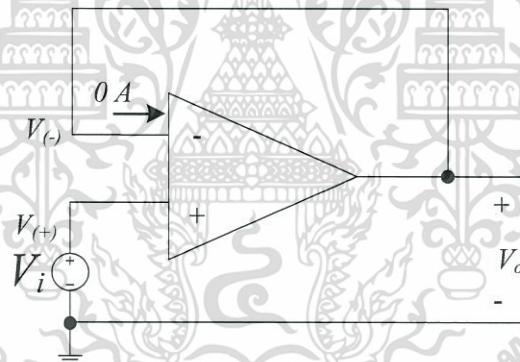
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i \quad (3.28)$$

ซึ่ง  $\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$  คือ ค่าอัตราขยาย (voltage gain) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายมีค่าเป็นบวก ดังนั้น แรงดันด้านขาออกจะมีขั้วเหมือนกับแรงดันด้านขาเข้า นั่นคือ วงจรขยายแบบไม่กลับขั้วจะถูกออกแบบให้มีอัตราขยายเป็นบวกนั่นเอง และก็เหมือนกับวงจรขยายแบบกลับขั้วที่อัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเท่านั้น

### 3.2.2.3 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer)) จะมีแรงดันทางด้านเอาต์พุตเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต



รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

พิจารณาจากรูปที่ 3.11 จะได้

$$V_{(+)} = V_i = V_{(-)} \quad (3.29)$$

และ  $V_{(-)} = V_o$  แทนสมการ (3.29)

$$V_{(-)} = V_o \quad (3.30)$$

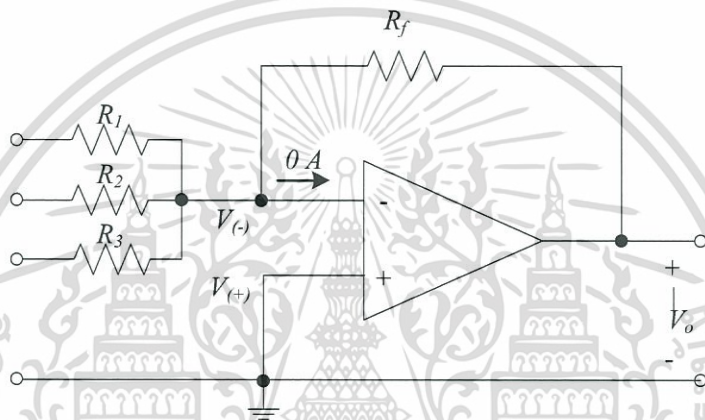
จากสมการที่ (3.30) แสดงให้เห็นถึงอัตราขยายของวงจรอยู่ที่หนึ่ง ซึ่งทำให้วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน จะมีแรงดันทางด้านเอาต์พุตเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต และเนื่องจากออปแอมป์มีค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าสูงมาก จึงใช้ประโยชน์เป็นตัวคั่นระหว่างวงจรขยายซึ่งอาจเรียกว่า บัฟเฟอร์ (Buffer) ใช้สำหรับแยกวงจร โดยบัฟเฟอร์จะเป็นตัวกลางกั้นไม่ให้วงจรทั้งสองกวนซึ่งกันและกัน และยังช่วยไม่ให้วงจรชั้นถัดไปกินกำลัง (Loading) วงจรแรกอีกด้วย

### 3.2.2.4 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

จากรูปที่ 3.12 ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันหลายแรงดัน เมื่อพิจารณาที่โหนด  $V_{(+)}$  จะได้สมการที่ (3.31)

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)} \quad (3.31)$$

เมื่อพิจารณาที่โหนด  $V_{(-)}$  ด้วยทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) จะได้สมการที่ (3.32)

$$\frac{V_{(-)} - V_1}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_2}{R_2} + \frac{V_{(-)} - V_3}{R_3} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0 \quad (3.32)$$

เมื่อแทนค่า  $V_{(-)} = 0$  ในสมการที่ (3.31) ข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

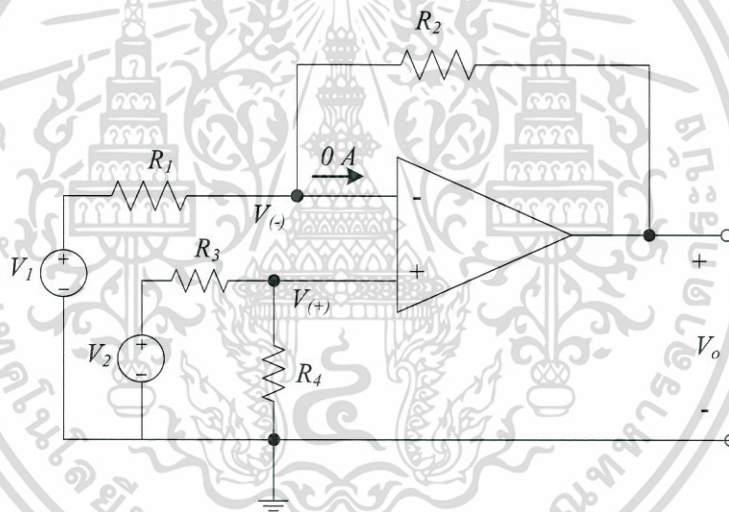
$$\frac{-V_1}{R_1} - \frac{-V_2}{R_2} - \frac{-V_3}{R_3} - \frac{-V_o}{R_f} = 0$$

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right) \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.33) แสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านเอาต์พุต เป็นผลรวมของแรงดันด้านขาเข้า เราจึงเรียกวงจรนี้ได้ว่าตัวรวม (Summer) โดยจำนวนจุดต่อรับสัญญาณด้านขาเข้าอาจมากกว่าที่ได้กล่าวข้างต้นก็ได้

### 3.2.2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ (Difference Amplifier) คือ วงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองอินพุต ซึ่งสามารถแสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส



รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 3.13 พิจารณาที่โหนด  $V_{(+)}$  จาก KCL;

$$\frac{V_{(+)} - V_2}{R_3} + \frac{V_{(+)}}{R_4} = 0$$

จะได้

$$V_{(+)} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)V_2 \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 พิจารณาที่โหนด  $V_{(-)}$  จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)} - V_1}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} = 0$$

$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_{(-)} - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (3.35)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน  $V_{(+)} = V_{(-)}$  แทนสมการ (3.34) ใน (3.35) จะได้

$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

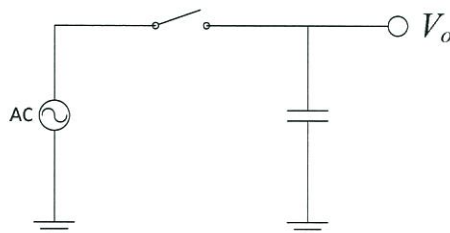
$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (3.36)$$

ถ้ากำหนดให้  $R_1 = R_2$  และ  $R_3 = R_4$  ลงในสมการที่ (3.36) จะได้ความสัมพันธ์ของวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณคือ

$$V_o = V_2 - V_1 \quad (3.37)$$

### 3.2.3 วงจรสุ่ม และคงค่า

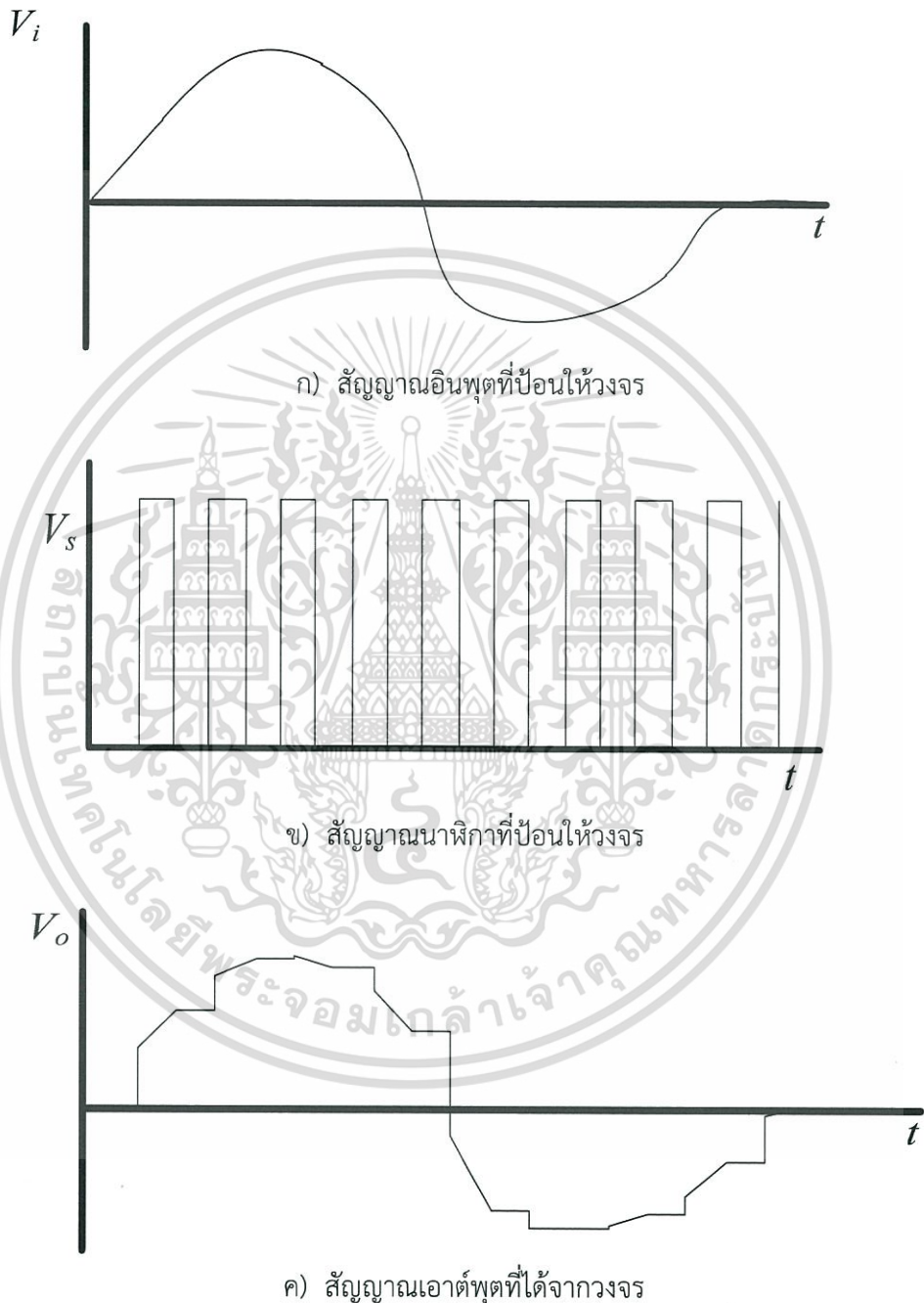
วงจรสุ่ม และคงค่า (Sample and Hold Circuit) จะถูกมาใช้ในระบบประมวลผลสัญญาณที่ต้องการสุ่มค่าสัญญาณ (Sample) และคงค่าสัญญาณ (Hold) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อให้ระบบสามารถนำค่าสัญญาณทำการประมวลผลได้ โดยการทำงานของวงจรสุ่มค่าและคงค่าสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงการคงค่าเอาต์พุตของวงจรจะคงที่ อยู่ที่ค่าที่สุ่มมาในเวลาสุดท้ายก่อนเข้าสู่ช่วงคงค่า



รูปที่ 3.14 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample & Hold)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ [15] แสดงในรูปที่ 3.14 ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ใช้คงค่าสัญญาณ และ สวิตช์ซึ่งถูกควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเป็นการควบคุมช่วงการสุ่มค่า และการคงค่าสัญญาณของวงจร



รูปที่ 3.15 สัญญาณต่าง ๆ ในวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 ถ้าป้อนอินพุตตามรูปที่ 3.15 (ก) และใช้สัญญาณนาฬิกาตามรูปที่ 3.15 (ข) จะได้เอาต์พุตตามรูปที่ 3.15 (ค) ซึ่งอธิบายการทำงานได้ว่าในเวลาที่สัญญาณนาฬิกามีค่าสูง สวิตช์จะปิด ด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจะต่อถึงกัน เอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับอินพุต และค่าแรงดันเอาต์พุตนี้จะตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ที่ทำหน้าที่คงสัญญาณอีกด้วย เมื่อสัญญาณนาฬิกามีค่าต่ำลง สวิตช์จะเปิดออก เอาต์พุตของวงจรจะแยกออกจากอินพุต และมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่เก็บไว้บนตัวเก็บประจุ C ซึ่งเท่ากับค่าเอาต์พุตค่าสุดท้ายในช่วงเวลาสุ่มค่านั้นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

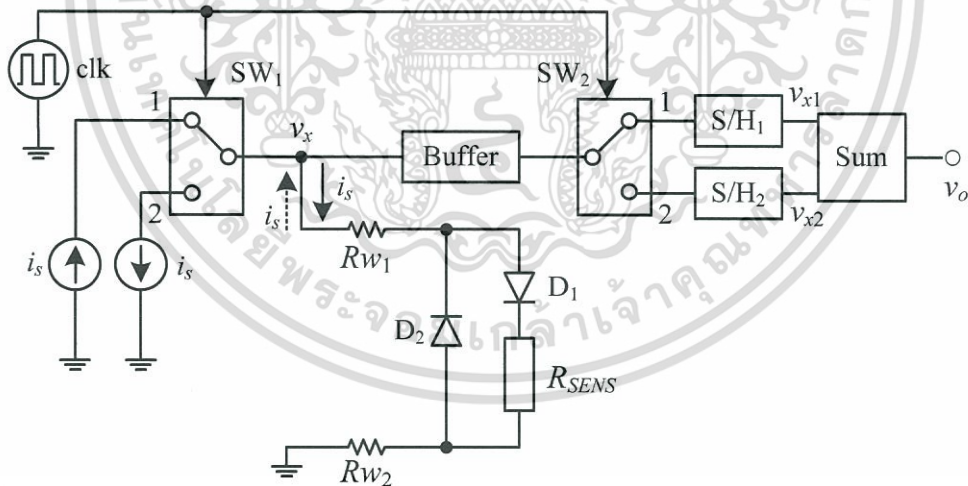
### เทคนิคการวัดระยะไกลสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ที่นำเสนอ

#### 4.1 กล่าวนำ

การออกแบบวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกลได้มีการประยุกต์วงจรต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นำมาใช้ในการออกแบบวงจร เพื่อสามารถนำวงจรการเชื่อมต่อไปใช้งานได้จริง ดังนั้นในบทนี้จะแสดงหลักพื้นฐานการออกแบบ รวมไปถึงการสังเคราะห์วงจรตามลำดับ

#### 4.2 หลักการพื้นฐานการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกล

พื้นฐานของเทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้แสดงการสังเคราะห์วงจร และหลักการ จากรูปที่ 4.1 โดยใช้สวิตช์  $SW_1$  ควบคุมทิศทางการไหลของกระแส  $i_s$  ผ่านเซนเซอร์ความต้านทาน ( $R_{SENS}$ ) และสวิตช์  $SW_2$  ควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า (sample and hold circuit) S/H<sub>1</sub> และ S/H<sub>2</sub> ซึ่งวิธีการชดเชยค่าความต้านทานสายในส่วนที่ใช้ต่อกับเซนเซอร์ ( $R_{w1}, R_{w2}$ ) สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 หลักการพื้นฐานของเทคนิคที่นำเสนอ

การทำงานของสวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา (clock) ในกรณีที่สวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  อยู่ในตำแหน่งที่ 1 ไดโอด  $D_1$  อยู่ในสภาวะนำกระแส จากการทำงานของบัฟเฟอร์ (Buffer) และวงจร S/H<sub>1</sub> จะได้ค่าแรงดัน  $V_{x1}$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{x1} = v_{D1} + i_s (R_{w1} + R_{SENS} + R_{w2}) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $V_{D1}$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด  $D_1$  ในทางตรงกันข้าม ถ้าสวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  อยู่ในตำแหน่งที่ 2 กระแส  $i_s$  จะไหลกลับทิศ (ตั้งเส้นประ) ทำให้ไดโอด  $D_2$  อยู่ในสภาวะนำกระแส จากการทำงานของ บัพเฟอร์และวงจร S/H<sub>2</sub> จะได้ค่าแรงดัน  $v_{x2}$  คือ

$$v_{x2} = -v_{D2} - i_s (R_{w1} + R_{w2}) \quad (4.2)$$

โดยที่  $V_{D2}$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด  $D_2$  เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของวงจร S/H<sub>1</sub> และ S/H<sub>2</sub> มารวมกันโดยใช้วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier) ที่มีอัตราขยาย  $A_G$  จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  คือ

$$v_o = A_G (v_{x1} + v_{x2}) \quad (4.3)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ลงใน (4.3) พร้อมทั้งกำหนดให้  $v_{D1} = v_{D2}$  จะได้

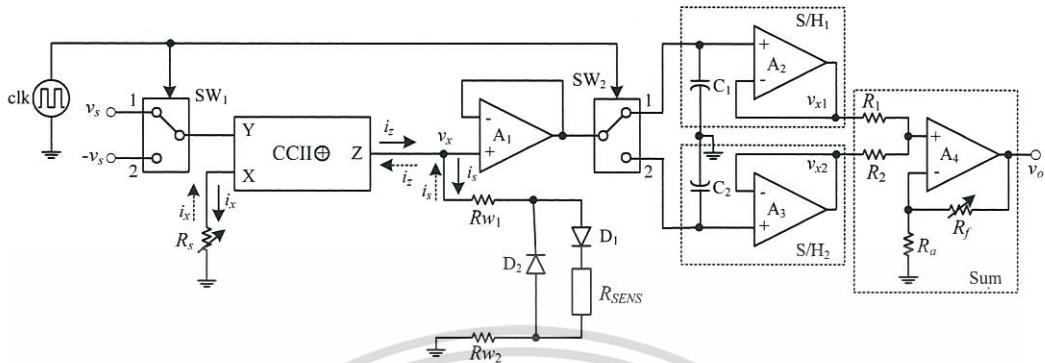
$$v_o = A_G (i_s R_{SENS}) \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  เป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  โดยค่าความต้านทานในสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ถูกชดเชยไป ดังนั้นหลักการพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดระยะไกลได้ โดยไม่จำเป็นต้องต่อสายเพิ่มสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเพื่อชดเชยความต้านทานสายดังเช่นเทคนิคการชดเชยแบบ 3 สาย หรือ 4 สาย (3-wire or 4-wire compensation)

### 4.3 การสังเคราะห์วงจร

จากหลักการพื้นฐานในรูปที่ 4.1 สามารถนำมาสังเคราะห์วงจรอย่างง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง CCI+ ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสเพื่อสร้างสัญญาณกระแส  $i_s$  ที่ควบคุมทิศทางการไหลได้ด้วยสวิตช์  $SW_1$  เมื่อค่าแรงดันบวก  $v_s$  ถูกป้อนเข้าที่พอร์ต Y จะได้กระแส  $i_x$  และ  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต X และ Z ตามลำดับ ถ้าค่าแรงดันลบ  $v_s$  ถูกป้อนเข้าที่พอร์ต Y แทน กระแส  $i_x$  และ  $i_z$  จะไหลเข้าพอร์ต X และ Z ตามลำดับ จากสมการที่ (4.1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การสังเคราะห์วงจรอย่างง่ายสำหรับเทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอ

$$i_z = \pm i_x = \pm \frac{v_s}{R_s} \quad (4.5)$$

วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer)) โดยใช้โอปแอมป์  $A_1$  ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ใช้สำหรับแยกวงจร โดยบัฟเฟอร์จะเป็นตัวกลางกันไม่ให้วงจรทั้งสองกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้นกระแส  $i_s$  มีค่าเท่ากับ  $i_z$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$i_s = \begin{cases} \frac{v_s}{R_s} & ; SW_1 = 1 \\ -\frac{v_s}{R_s} & ; SW_1 = 2 \end{cases} \quad (4.6)$$

วงจรสุ่มและคงค่า (Sample and Hold)  $S/H_1$  และ  $S/H_2$  สังเคราะห์โดยใช้โอปแอมป์ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ  $A_2$ ,  $C_1$  และ  $A_3$ ,  $C_2$  ตามลำดับ ในส่วนของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณใช้โอปแอมป์  $A_4$  ต่อร่วมกับตัวต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_f$  และ  $R_a$  [16] โดยที่

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) \left(\frac{R_T}{R_1} v_{x1} + \frac{R_T}{R_2} v_{x2}\right)$$

$$v_o = A_G \left(\frac{R_T}{R_1} v_{x1} + \frac{R_T}{R_2} v_{x2}\right) \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$A_G = \left( 1 + \frac{R_f}{R_a} \right) \quad (4.8)$$

และ

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.9) ถ้าออกแบบ  $R_1 = R_2$  จะได้

$$v_o = \frac{A_G}{2} (v_{x1} + v_{x2}) \quad (4.10)$$

จากหลักการพื้นฐานดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2 จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรในรูปที่ 4.2 ดังสมการที่ (4.11)

$$v_o = \frac{A_G}{2} (i_s R_{SENS}) \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.11) แสดงให้เห็นว่า ความต้านทานสาย  $R_{n1}$  และ  $R_{n2}$  ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  นอกจากนั้นค่าอัตราขยาย  $A_G$  ยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสมกับช่วงแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการได้ โดยปรับค่าอัตราส่วนระหว่างตัวต้านทาน  $R_f$  และ  $R_a$

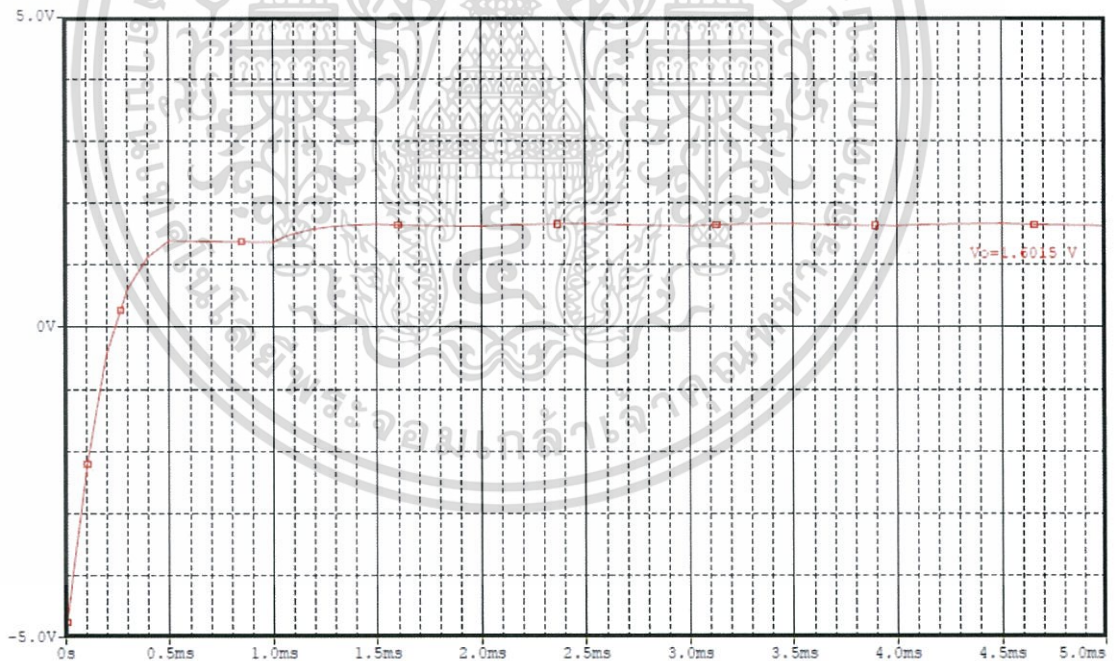
#### 4.4 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

จากการออกแบบวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานระยะไกลตามหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นดังกล่าวสามารถทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานได้ตามหลักที่ได้เสนอไว้ และมีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ โดยการนำวงจรที่ได้ออกแบบมาทำการวิเคราะห์เลียนแบบการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป “PSPICE” [13] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปที่มีความแม่นยำสูง โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

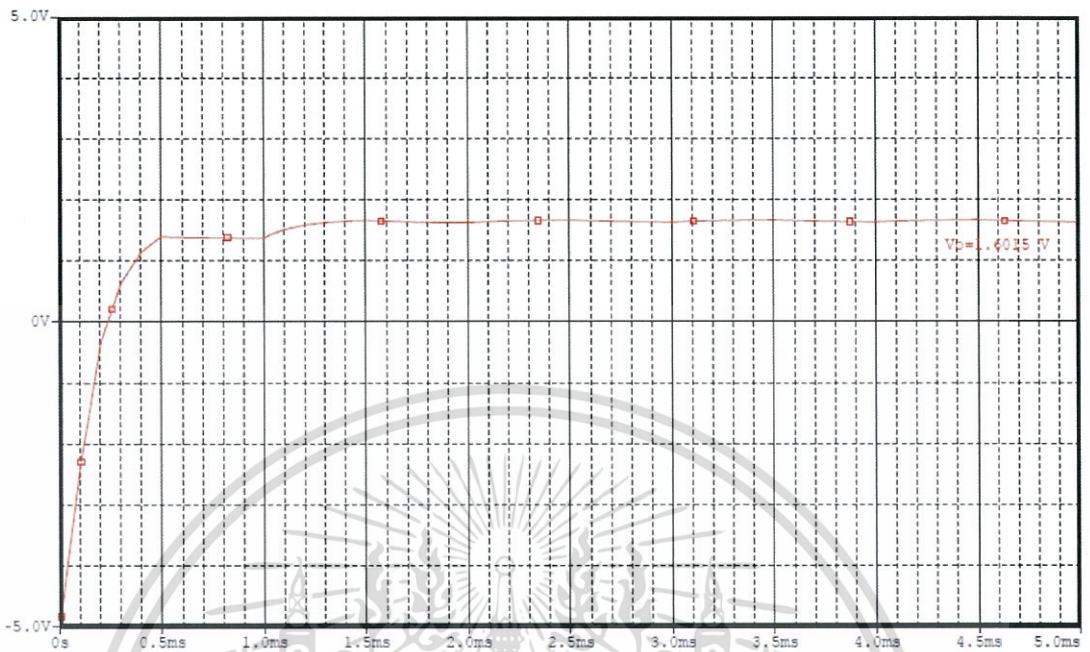
กำหนดรายละเอียดลักษณะการต่อกันของวงจรให้กับโปรแกรมดังกล่าว โดยกำหนดค่าอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ไอซีเบอร์ AD844, LF351, MUX CD4053 และ 1N4148 สำหรับวงจรสายพานกระแส, ออปแอมป์, อิเล็กทรอนิกส์สวิทช์ และไดโอด ตามลำดับ พร้อมทั้งได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรดังนี้  $v_s = \pm 5$  V,  $R_s = 5$  k $\Omega$ ,  $i_s = \pm 1$  mA,  $R_1 = R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $A_G = 8$ ,  $C_1 = C_2 = 15$  nF สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางตัว และสัญญาณนาฬิกาได้กำหนดค่าให้เท่ากับ  $\pm 5$  V และ 1 kHz ตามลำดับ

ในการบันทึกผลการทดลองที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงการวัดระยะไกลด้วยการกำหนดค่าความต้านทานสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ให้มีค่าต่าง ๆ จำนวน 4 กรณีด้วยกัน เพื่อยืนยันผลการชดเชยค่าความต้านทานสายของเทคนิคที่ได้นำเสนอ พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  ด้วยการกำหนดค่าความต้านทานในช่วง 100  $\Omega$  – 1 k $\Omega$  ตัวอย่างผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรถูกกล่าวในกรณีที่  $R_{SENS} = 400$   $\Omega$  สามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตได้จากรูปที่ 4.3 – รูปที่ 4.6 และค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรการเชื่อมต่อระยะไกลด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

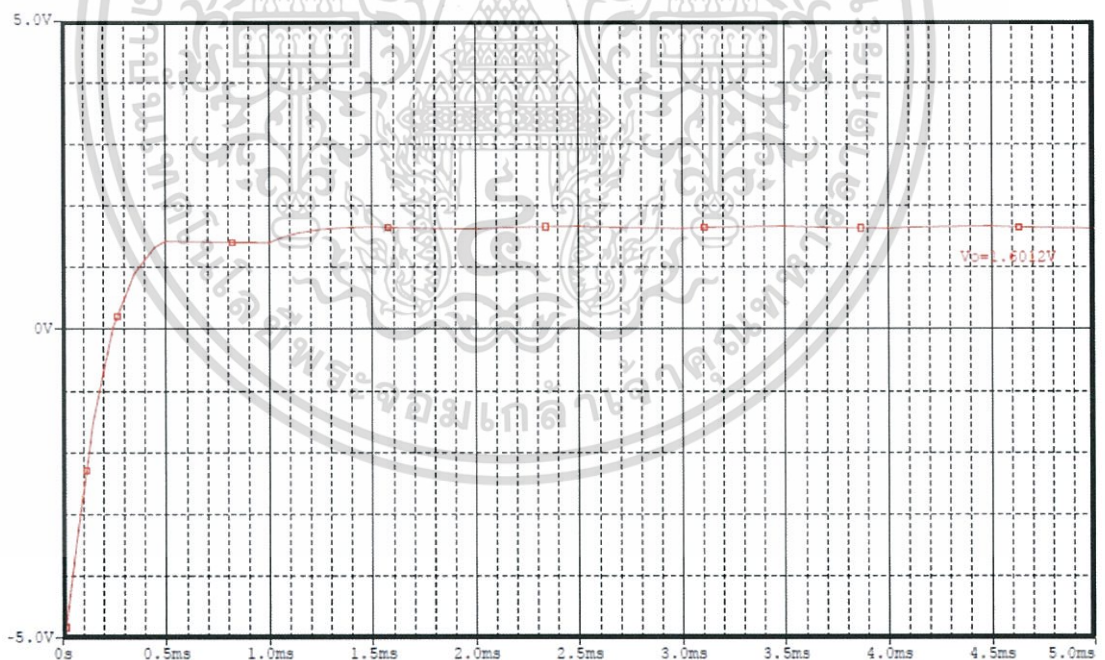


รูปที่ 4.3 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงการทำงาน เมื่อ  $R_{SENS} = 400$   $\Omega$  ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

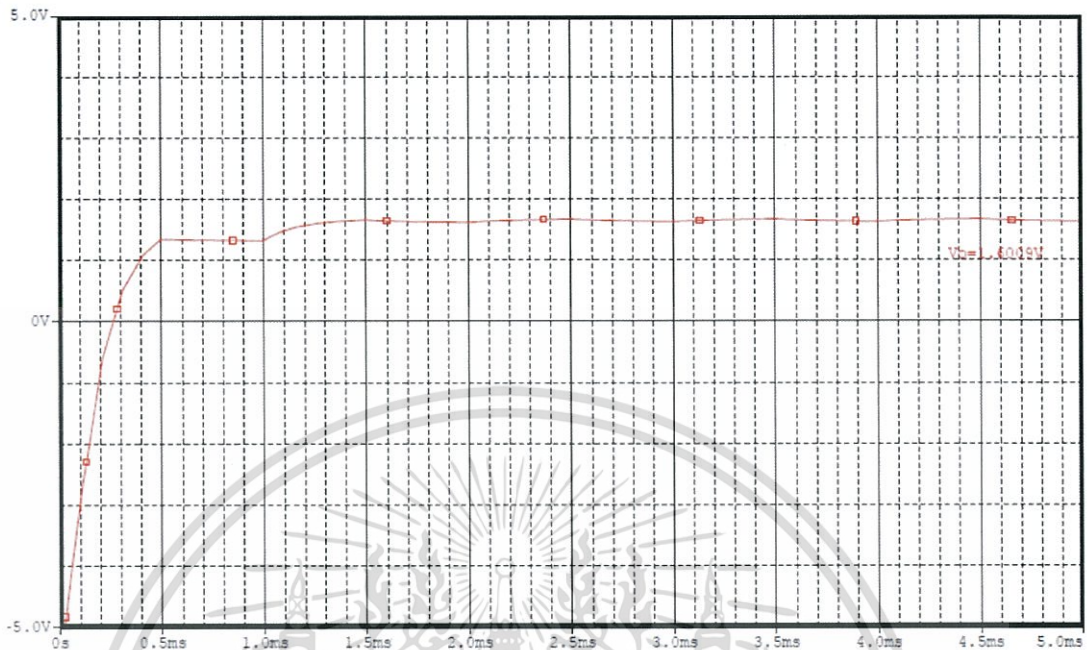


รูปที่ 4.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ  $R_{SENS} = 400 \Omega$  ในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ  $R_{SENS} = 400 \Omega$  ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการเลียนแบบการทำงาน เมื่อ  $R_{SENS} = 400 \Omega$  ในกรณีที่ 4

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการต่อวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ระยะไกลด้วยโปรแกรม PSPICE

ชุดที่	$R_{SENS} (\Omega)$	$V_o$ ที่คำนวณได้ (V)	$V_o$ ที่วัดได้ (V)				ค่า ความผิดพลาดที่แย่ที่สุด (%)
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	
1	100	0.4003	0.4005	0.4005	0.4004	0.4004	0.0500
2	200	0.8005	0.8009	0.8007	0.8008	0.8007	0.0500
3	300	1.2008	1.2012	1.2012	1.2011	1.2008	0.0333
4	400	1.6011	1.6015	1.6015	1.6012	1.6009	0.0250
5	500	2.0014	2.0017	2.0015	2.0013	2.0008	0.0300
6	600	2.4016	2.4016	2.4014	2.4012	2.4007	0.0375
7	700	2.8019	2.8015	2.8013	2.8008	2.8003	0.0571
8	800	3.2022	3.2010	3.2009	3.2005	3.1996	0.0812
9	900	3.6025	3.6008	3.6004	3.5998	3.5988	0.1027
10	1000	4.0027	3.9999	3.9999	3.9991	3.9978	0.1224

หมายเหตุ กรณีที่ 1:  $R_{w1} + R_{w2} = 11.3 \Omega$ , กรณีที่ 2:  $R_{w1} + R_{w2} = 26.5 \Omega$ ,

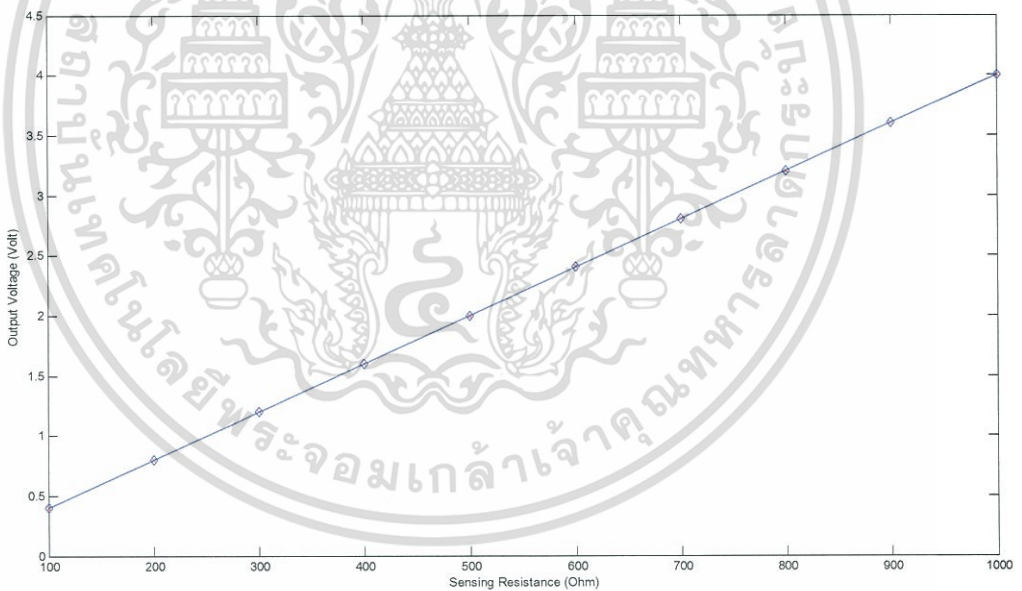
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3:  $R_{w1} + R_{w2} = 50.9 \Omega$ , กรณีที่ 4:  $R_{w1} + R_{w2} = 98.8 \Omega$

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตของผลการวิเคราะห์ที่เลียนแบบการทำงานของวงจร วงจรเกือบจะมีค่าคงที่ นั่นแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานสายในส่วนที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัวต้านทานมีผลกระทบต่อค่าเอาต์พุตที่วัดได้น้อยมาก โดยค่าแรงดันเอาต์พุตได้มีการชดเชยออฟเซต (offset) ของวงจรเรียบร้อยแล้ว โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่หาได้จากสมการ

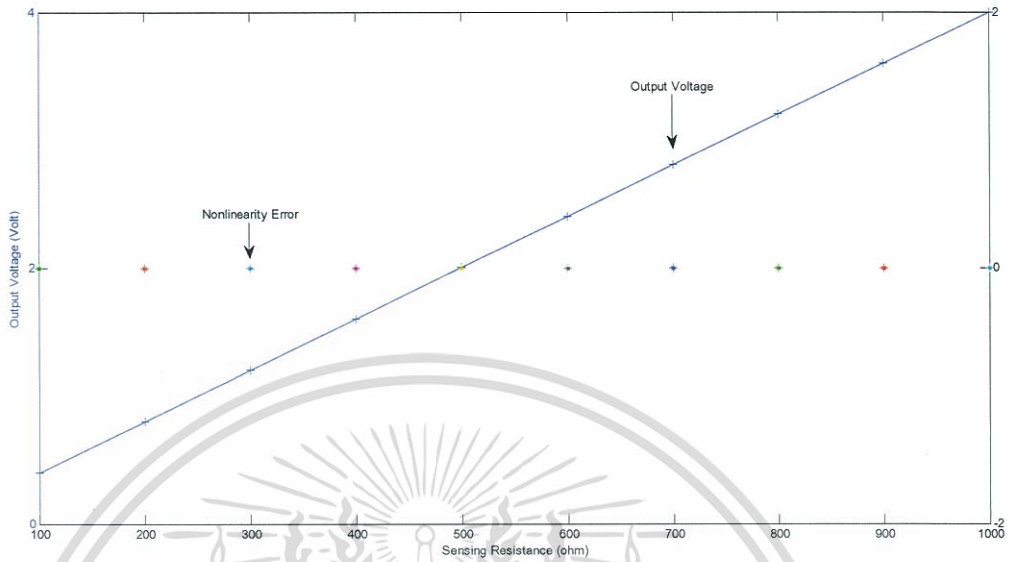
$$\text{ร้อยละความผิดพลาด} = \frac{(\text{ค่าที่วัดได้} - \text{ค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี})}{\text{ค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี}} \times 100 \quad (4.12)$$

โดยนำค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดหรือแย่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 4 กรณีมาแสดงไว้ในคอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ (4.1) เมื่อนำเอาผลการวิเคราะห์แบบวงจรมาเขียนกราฟในรูปที่ 4.7 – 4.14 ทำให้ทราบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้น กับค่าความต้านทานที่วัด  $R_{SENS}$  โดยกราฟดังรูปต่อไปนี้

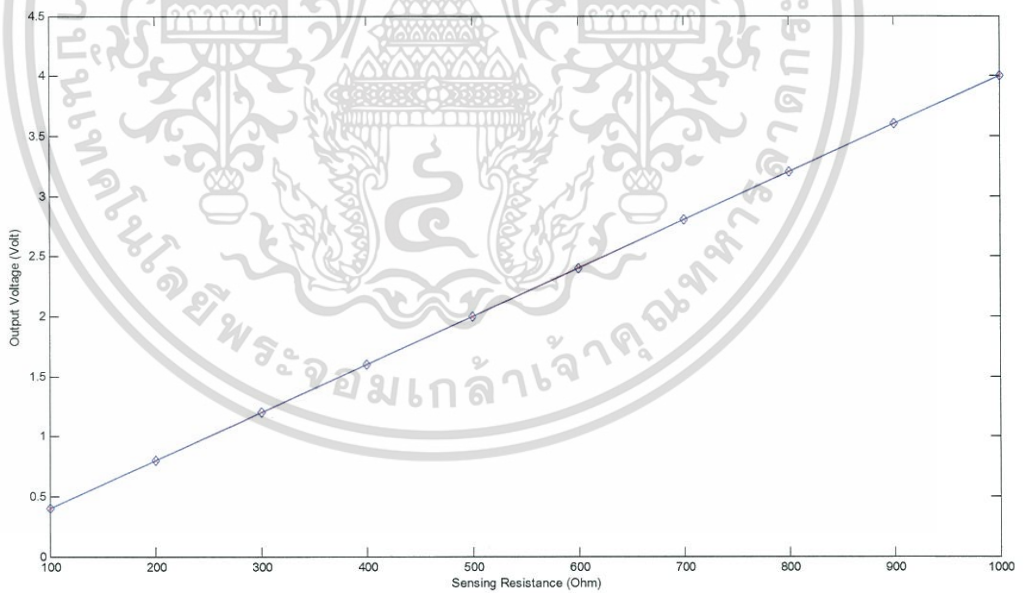


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{SENS}$  และ  $V_o$  ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

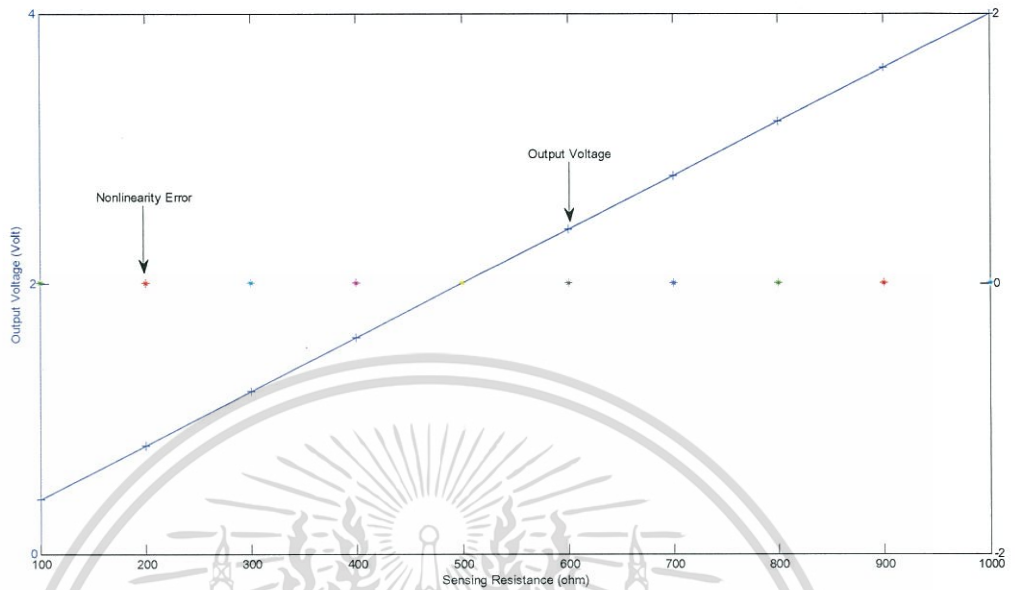


รูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 1

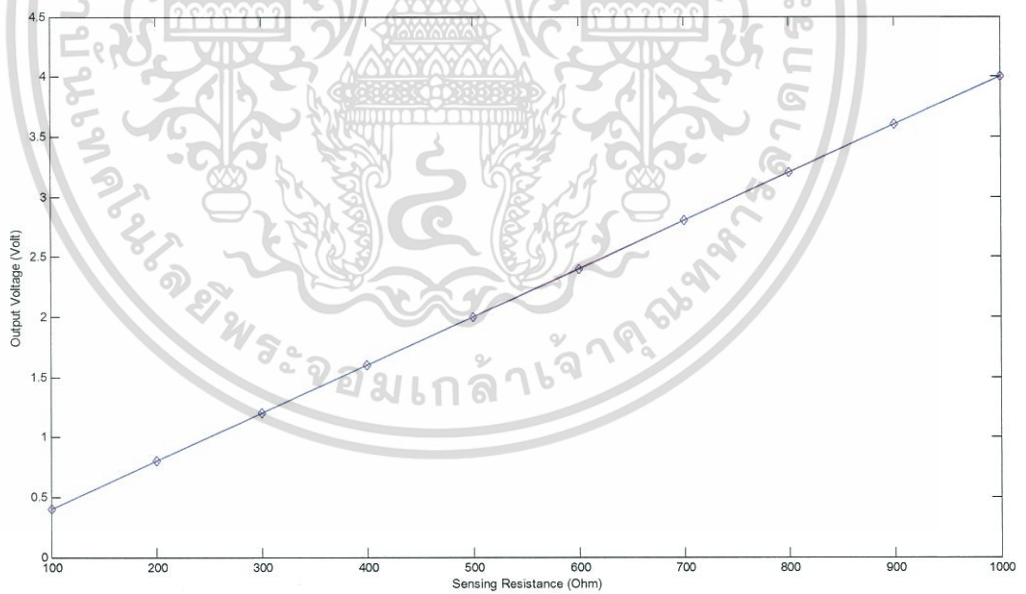


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{SENS}$  และ  $V_o$  ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

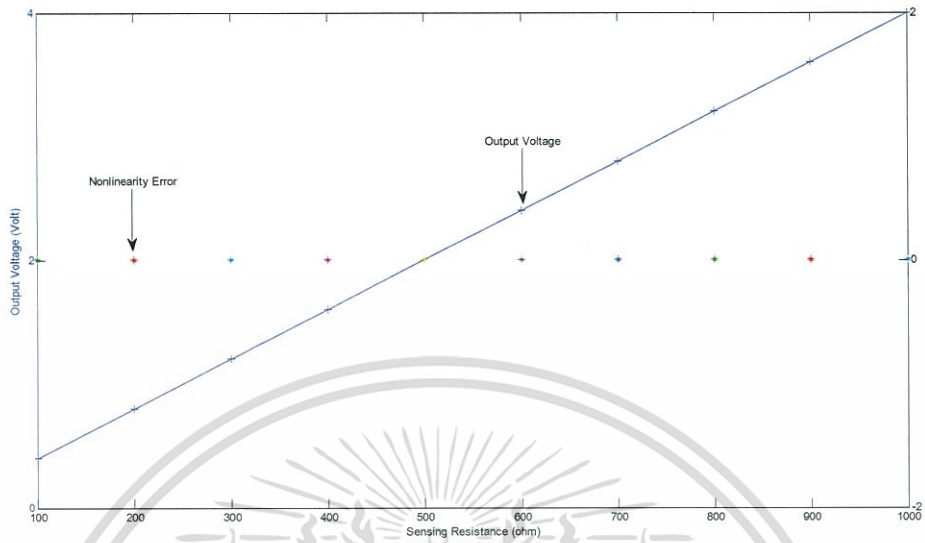


รูปที่ 4.10 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรที่ 2

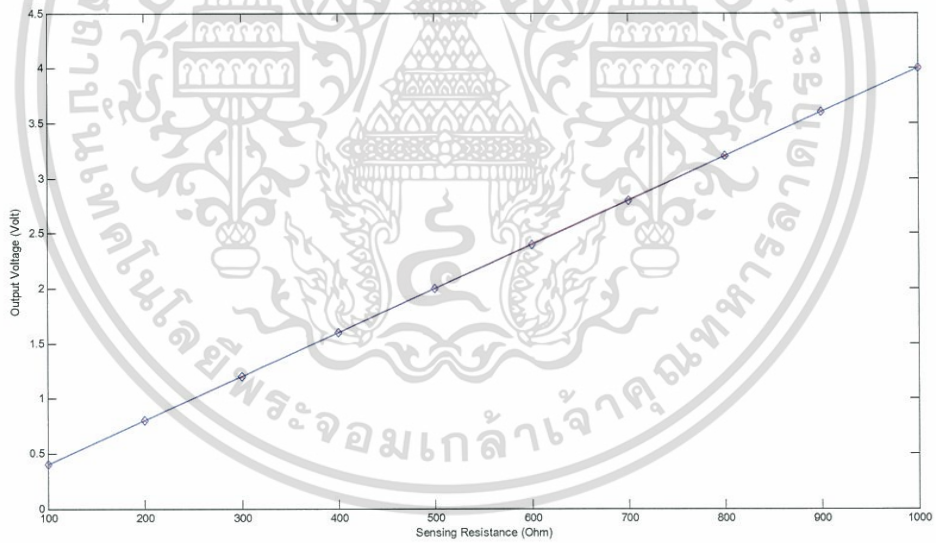


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{SENS}$  และ  $V_o$  ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

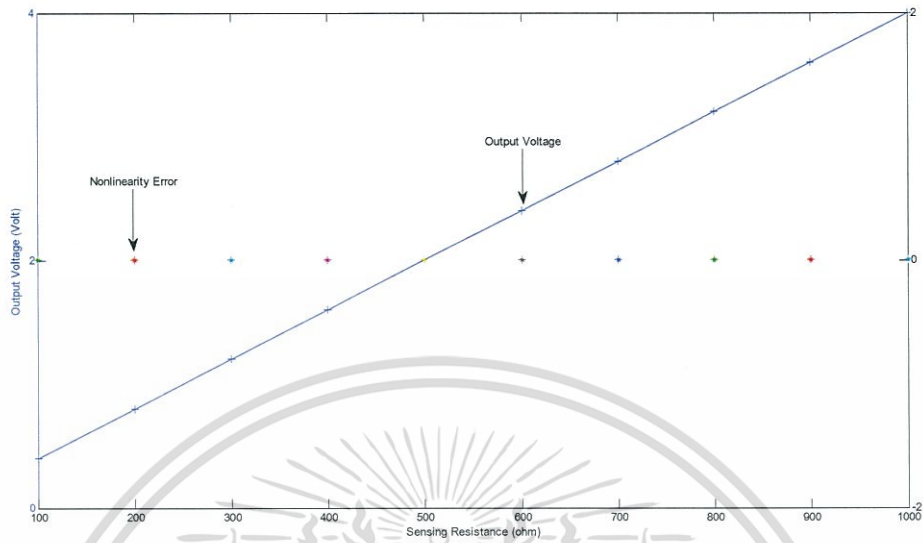


รูปที่ 4.12 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรกรณีที่ 3



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{SENS}$  และ  $V_o$  ในกรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

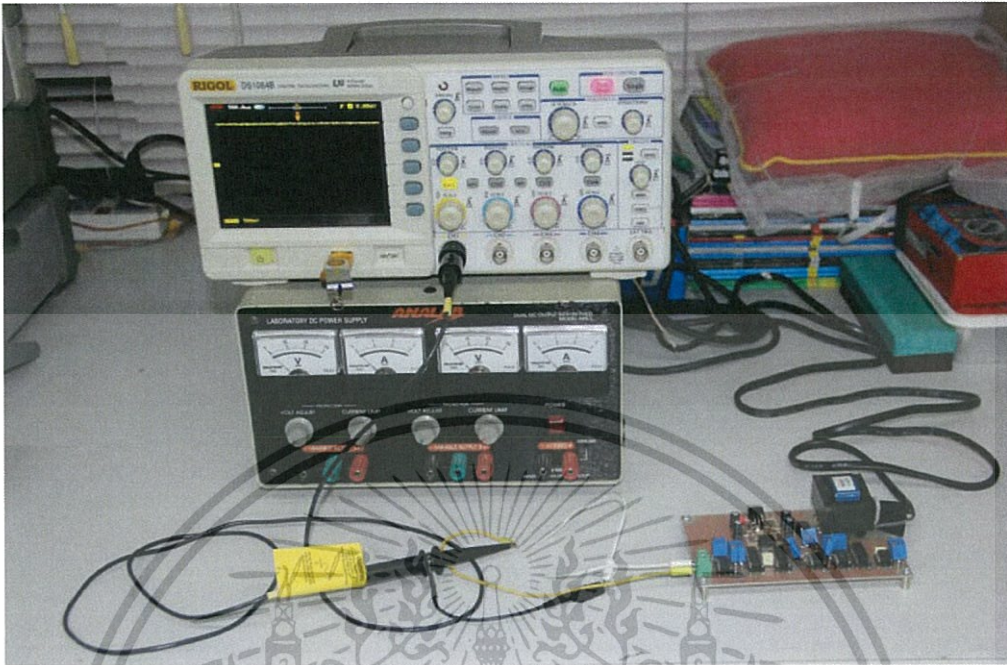


รูปที่ 4.14 ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรที่ 4

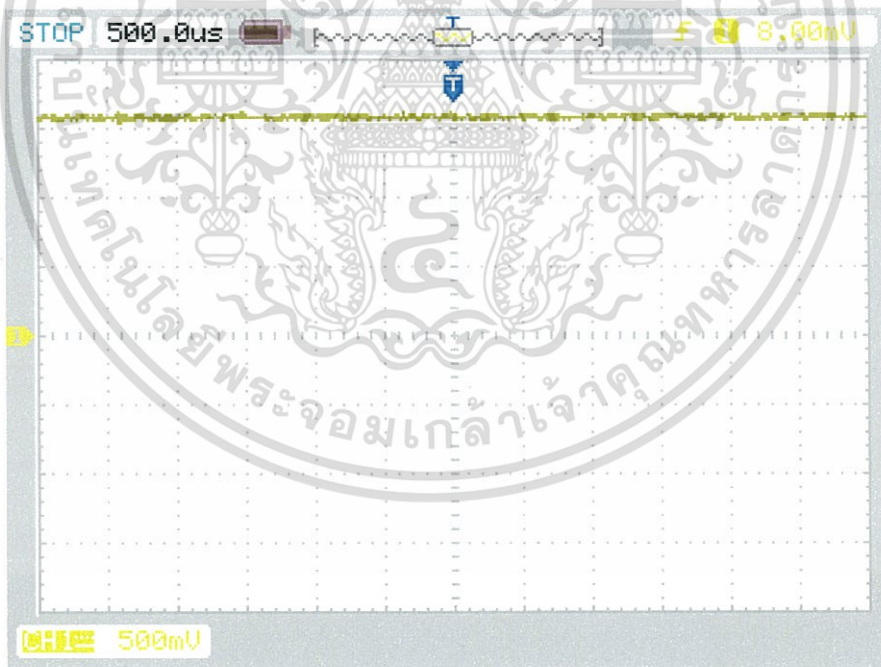
จากกราฟรูปที่ 4.7 ถึงกราฟรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ค่าความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity Error) ที่คำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (least squares regression) จนเกือบเท่ากับศูนย์ และยังแสดงให้เห็นถึงการออกแบบวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ระยะไกลมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ

#### 4.5 ผลทดสอบด้วยการต่อวงจรจริง

การทดสอบสมรรถนะของเทคนิคการวัดระยะไกลสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานที่นำเสนอ โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.2 บนแผ่นทดสอบ โดยกำหนดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหมือนกับหัวข้อที่ 4.4 ในการบันทึกผลการต่อวงจรจริงด้วยการกำหนดค่าความต้านทานสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ให้มีค่าต่าง ๆ ใกล้เคียงกับหัวข้อที่ 4.4 สามารถแสดงเอาต์พุตได้จากรูปที่ 4.15 – รูปที่ 4.19 โดยยกตัวอย่างจากค่าความต้านทานเซนเซอร์ที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  ที่ 401  $\Omega$  และค่าที่ได้จากการต่อวงจรการเชื่อมต่อระยะไกลแสดงในตารางที่ 4.2

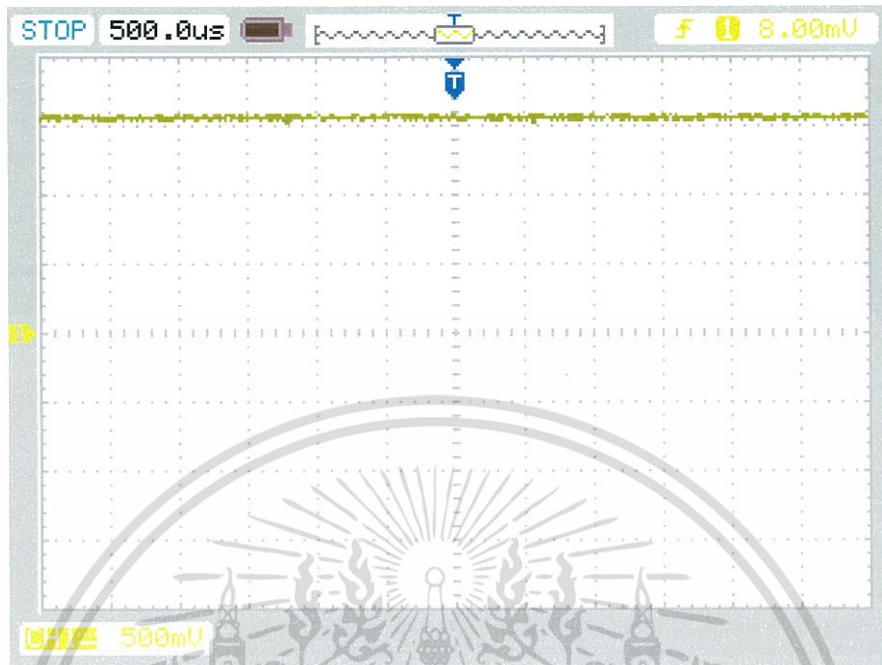


รูปที่ 4.15 การทดลองวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน



รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ  $R_{SENS} = 401\Omega$  ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

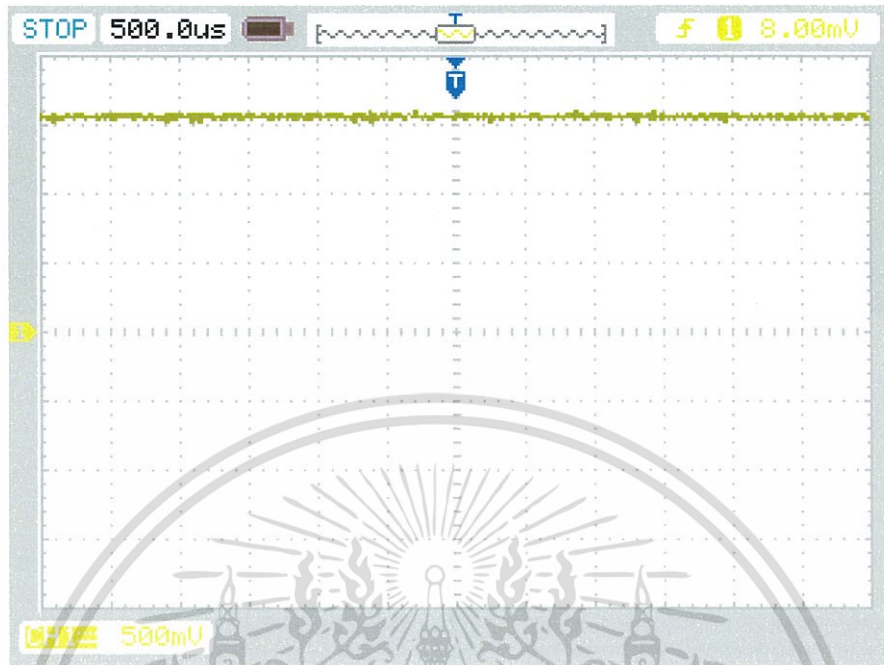


รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ  $R_{SENS} = 401\Omega$  ในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ  $R_{SENS} = 401\Omega$  ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อ  $R_{SENS} = 401\Omega$  ในกรณีที่ 4

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการต่อวงจรจริงสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ระยะไกลบนแผ่นทดสอบ

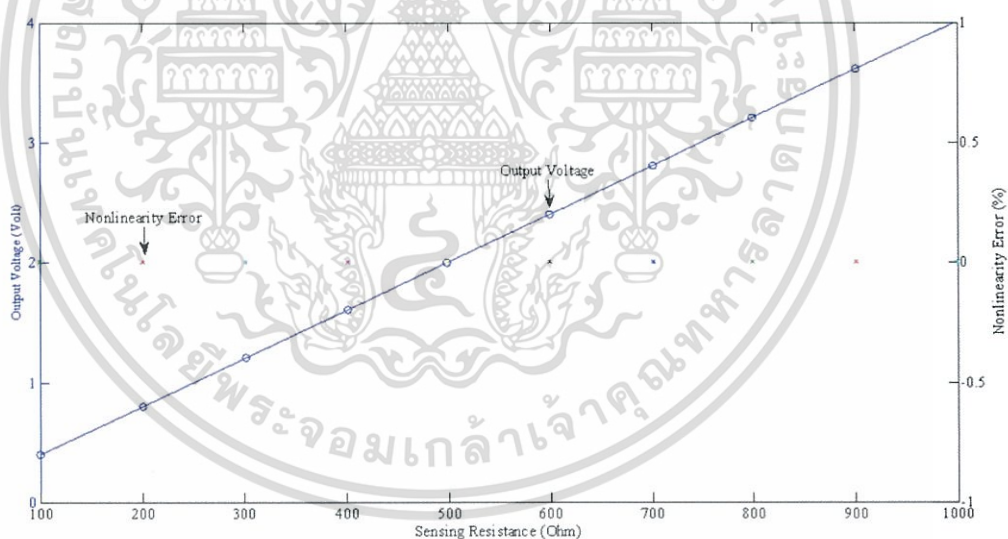
ชุดที่	$R_{SENS}$ ( $\Omega$ )	$V_o$ ที่คำนวณได้ (V)	$V_o$ ที่วัดได้ (V)				ค่าความผิดพลาดที่แย่ที่สุด (%)
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	
1	99.4	0.3976	0.3990	0.3940	0.3950	0.3990	0.9054
2	199.7	0.7988	0.7990	0.7980	0.7990	0.8050	0.7762
3	301.1	1.2044	1.2060	1.2070	1.2090	1.2110	0.5480
4	401	1.6040	1.6030	1.6040	1.6060	1.6090	0.3117
5	498.5	1.9940	1.9940	1.9950	1.9980	2.0040	0.5015
6	599	2.3960	2.4000	2.4000	2.4030	2.4060	0.4174
7	700.5	2.8020	2.8020	2.8020	2.8020	2.8050	0.1071
8	799	3.1960	3.2000	3.2000	3.2000	3.2030	0.2190
9	901	3.6040	3.6080	3.6110	3.6110	3.6180	0.3885
10	1000	4.0000	4.0100	4.0130	4.0130	4.0130	0.3250

หมายเหตุ      กรณีที่ 1:  $R_{w1} + R_{w2} = 11.3 \Omega$ , กรณีที่ 2:  $R_{w1} + R_{w2} = 26.5 \Omega$ ,  
 กรณีที่ 3:  $R_{w1} + R_{w2} = 50.9 \Omega$ , กรณีที่ 4:  $R_{w1} + R_{w2} = 98.8 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเกือบจะมีค่าคงที่ นั่นคือ ค่าความต้านทานสายในส่วนที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัวต้านทานมีผลกระทบต่อค่าเอาต์พุตที่วัดได้น้อยมาก โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในกรณีที่แย่ที่สุด (worst-case percentage error) ในการวัดมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 0.9\%$  อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดในการวัดนี้สามารถทำให้ลดลงได้ โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ดังเช่นการใช้วงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [17] และเพิ่มในส่วนการชดเชยค่าออฟเซต (offset) ของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ นอกจากนี้ การใช้ไดโอดที่สร้างจากทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ เช่น LM389 ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  มีความสมพงษ์กันมากขึ้น

จากค่าแรงดันเอาต์พุตตารางที่ 4.2 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.11 โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่วัดได้ (กรณีที่ 1) และค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความไม่เป็นเชิงเส้น (percentage of nonlinearity error) ที่คำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (least squares regression) ซึ่งมีค่าน้อยมาก ๆ ประมาณเท่ากับศูนย์ ดังนั้นวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นสูง



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $V_o$  ที่วัดได้และค่า  $R_{SENS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายที่มีการชดเชยความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ ความต้านทานที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดเด่นในด้านโครงสร้างของวงจรที่เรียบง่ายและใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดในการออกแบบ โดยวงจรที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นได้จากการประยุกต์ใช้วงจรสายพาน นำกระแสรั่วที่สอง หรือ CCII วงจรขยายสัญญาณผ่านแรงดันหรือบัฟเฟอร์ วงจรสุ่ม และคงค่า และ วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และผลจากการทดลองต่อวงจรจริงแสดงให้เห็นว่าวงจรที่สังเคราะห์ขึ้นทำงานได้อย่างถูกต้อง และยังแสดงถึงความมีประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ เพื่อทำการชดเชยค่าความต้านทานในสายของส่วนที่เชื่อมต่อเซนเซอร์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อ

การออกแบบสำหรับเทคนิคที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีการสังเคราะห์วงจรให้สร้างสัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันที่มีค่าแปรผันตามความต้านทานของเซนเซอร์ ( $R_{SENS}$ ) ที่เชื่อมต่อในวงจร ดังนั้นในการใช้งานจริงจำเป็นต้องกำหนดช่วงของค่าความต้านทานเซนเซอร์ที่รองรับให้แน่นอน เพื่อจะได้กำหนดค่าอัตรขยายที่ต้องการใช้ และสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตเป็นสัญญาณมาตรฐาน เช่น 0-5 V หรือ 0-10 V หรืออีกแนวทางหนึ่งในการสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตเป็นสัญญาณมาตรฐานอาจทำได้โดยต่อวงจรขยายแรงดัน (Voltage Amplifier) เพิ่มอีกวงจรหนึ่ง โดยต่อเข้ากับภาคเอาต์พุตของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอ หรือถ้าต้องการสร้างสัญญาณเอาต์พุตให้เป็นสัญญาณกระแสมาตรฐาน 4-20 mA ก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนจากการต่อวงจรขยายแรงดันเป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณกระแส (Voltage-to-Current Converter) ได้

นอกจากนี้ยังมีอีกแนวทางในการทำวิจัยต่อคือ การสร้างสัญญาณเอาต์พุตให้อยู่ในรูปของช่วงคาบเวลา (Time Period) โดยค่าช่วงคาบเวลาเอาต์พุตสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของเซนเซอร์หรืออาจจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของเซนเซอร์ก็ได้ นอกจากนั้น การสังเคราะห์วงจรให้สร้างสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณที่มีการแกว่งตลอดเวลาด้วยค่าความถี่ที่คงที่ และค่าความถี่ของการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของเซนเซอร์หรืออาจจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของเซนเซอร์ก็เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าจะศึกษาค้นคว้าวิจัยต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์. 2553. ระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล., หน้า 2.9-2.19.
- [2] S. J. Azhari and H. Kaabi, "AZKA Cell, the Current - mode Alternative of Wheatstone Bridge," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 47, no. 9, pp.1277-1284, Sep. 2000.
- [3] Y. H. Ghallab and W. Badawy, A new topology for a current-mode Wheatstone bridge, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 53, no. 1, pp.18-22, Jan. 2006.
- [4] S. Gift and B. Maundy, New configurations for the measurement of small resistance changes, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 53, no. 3, pp. 178-182, Mar. 2006.
- [5] A. Julsereewong, P. Julsereewong, T. Rungkhum, H. Sasaki and H. Isoguchi, Interface circuit for single active element resistive sensors, *ICIC Express Letters*, vol. 4, no. 5(B), pp.1985-1990, Oct. 2010.
- [6] T. K. Maiti and A. Kar. Novel Remote Measurement Technique Using Resistive Sensor as Grounded Load in an Opamp Based V-to-I Converter. *IEEE Sensors Journal*, 9, 3: 244-245, 2009
- [7] วิศรุต ศรีรัตน์นะ "เซนเซอร์ และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม", กรุงเทพฯ ฯ ซีไอเอ็มเคชั่น, 2550
- [8] Honeywell, Platinum Resistance Temperature Detector, pp 136-137
- [9] Sedra, A., and Smith, K.C. 1968. The Current Conveyor : A New Circuit Building Block. *Proc. IEEE*, 56 : 1368-1369.
- [10] Sedra, A., and Smith, K.C. 1970. A Second Generation Current Conveyor and Its Applications. *IEEE Trans. On Circuit Theory*, CT-17: 132-154.
- [11] Fabra, A. 1995. Third-generation current conveyor: a new help active element, *Electronic letter*. Vol. 31, no.5, 338-336.
- [12] Fabra, A. 1985. Dual Translinear Voltage / Current Conveyor, *Electron. Lett.*, Vol. 9, 1030-1031.
- [13] Fabra, A. 1985. Translinear Current Conveyors Implementtation, *Int. J. Electron*. Vol. 59, 619-623.
- [14] Fabra, A, Saaid O., Wiest F. and Boucheron C. 1996. High Frequency Applications Based on a New Current Controlled Conveyor, *IEEE Trans. Circuits Syst. I* . Vol. 43 no.2, 82-91.
- [15] Sedra, A., and Smith, K.C. 1998. *Microelectronic Circuit* 4th ed. New York : Oxford University Press.
- [16] อัมพวัน จุลเสรีวงศ์. 2550. วงจรไฟฟ้า 1. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล., หน้า 2.9-2.19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Kaewpoonsuk, A., Riewruja, V., Rerkratn, A., and Kamsri, T. 2008. An Accurate CCII-based Voltage Controlled Current Source. Proceedings of the International Conference on Control, Automation and System, Seoul, Korea, Oct. 14-17, 2008: 1816-1819.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

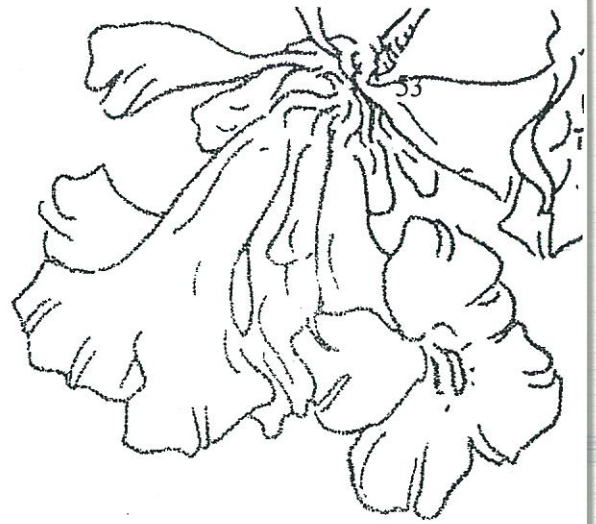
Prasit Julsereewong, Amphawan Julsereewong, Apinai Rerkratn Navarest

Suwanmongkol “Simple Remote Measurement Technique For Interfacing

Resistive Sensors” The 9<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference, May. 2-3, 2011: PCE9-111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PEC-9

Faculty of Engineering

Prince of Songkla University

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9

The 9<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference

2-3 พฤษภาคม 2554

ณ โรงแรมมอริสตัน-ซีพี รีสอร์ท (หาดไทรตึงรัง) จังหวัดภูเก็ต

<http://www.pec.eng.psu.ac.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PEC9-111

## SIMPLE REMOTE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR INTERFACING RESISTIVE SENSORS

Prasit Julserceewong\* Amphawan Julserceewong Apinai Rerkratn Navarest Suwannamongkol  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520  
E-mail: kjprasit@kmitl.ac.th\*

### Abstract

This paper presents a simple remote measurement technique for interfacing resistive sensors. The proposed circuit implementation employs commercially available devices to generate the output voltage, which is linearly proportional to the sensing resistance. Experimental results are given to confirm not only the good operation but also the effective lead-resistance compensation of the proposed method.

**Key Words:** Interface Circuit, Resistive Sensor, Remote Measurement, Lead-Resistance Compensation.



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

Prasit Julsereewong, Amphawan Julsereewong  
- Apinai Rerkrahn, Navaresi Suwannamongkol

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

Simple Remote Measurement Technique for Interfacing Resistive Sensors

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9 (PEC-9)

วันที่ 2 - 3 พฤษภาคม 2554

ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท (หาดไตรตรังค์) จังหวัดภูเก็ต

ให้ไว้ ณ วันที่ 2 พฤษภาคม 2554

(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์



## เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน Simple Remote Measurement Technique for Interfacing Resistive Sensors

ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์\* อัมพวัน จุลเสรีวงศ์ อภินัย ฤกษ์รัตน์ นวเรศ สุวรรณมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail: kjprasit@kmitl.ac.th\*

Prasit Julsereewong\* Amphawan Julsereewong Apinai Rerkratn Navarest Suwannamongkol

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520

E-mail: kjprasit@kmitl.ac.th\*

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน การสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดเพื่อสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ถึงไม่เพียงแต่การทำงานที่ดีเท่านั้น แต่ยังแสดงถึงการชดเชยค่าความต้านทานสายที่มีประสิทธิภาพของวิธีการที่ได้นำเสนออีกด้วย  
คำหลัก วงจรเชื่อมต่อ เซนเซอร์ความต้านทาน การวัดระยะไกล การชดเชยค่าความต้านทานสาย

### Abstract

This paper presents a simple remote measurement technique for interfacing resistive sensors. The proposed circuit implementation employs commercially available devices to generate the output voltage, which is linearly proportional to the sensing resistance. Experimental results are given to confirm not only the good operation but also the effective lead-resistance compensation of the proposed method.

**Keywords:** interface circuit, resistive sensor, remote measurement, lead-resistance compensation.

### 1. บทนำ

ในระบบการวัดอุณหภูมิทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เซนเซอร์ความต้านทาน (resistive sensor) จำพวกอาร์ทีดี (resistive temperature detector: RTD) สำหรับการวัดค่าอุณหภูมิที่มีพิสัยระบุ (range) ต่ำกว่าประมาณ 550 °C [1] เนื่องจากราคาติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิถูกกว่าการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) และใช้สเตรนเกจ (strain gauge) เพื่อตรวจวัดค่าความเค้น ค่าความดัน หรือค่าตัวแปรกระบวนการ

อื่น ๆ โดยมีการต่อสายนำสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ความต้านทานไปใช้งานโดยใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge circuit) เป็นวงจรเชื่อมต่อ แต่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรวีทสโตนบริดจ์เป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเอาต์พุตของเซนเซอร์เฉพาะในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าของตัวต้านทานที่ต่อเป็นแขนของวงจรบริดจ์ (all-element varying) เท่านั้น ในบทความวิจัย [2] ได้นำเสนอวงจรเชื่อมต่อที่มีความเป็นเชิงเส้นสำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์ตัวเดียว (single-element varying) แต่อย่างไรก็ตาม หลักการที่นำเสนอดังกล่าวไม่ได้มุ่งเน้นการออกแบบวงจรที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการวัดระยะไกล

วัตถุประสงค์ของบทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการวัดระยะไกลที่มีการชดเชยค่าความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน โดยใช้วงจรรวมหรือไอซีสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งมีหลักการคล้ายกับเทคนิคที่นำเสนอในบทความวิจัย [3] โดยใช้เซนเซอร์ความต้านทานเป็นโหลดที่ถูกลดลงกราวด์ของตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส (voltage-to-current converter) แต่ในบทความวิจัยนี้ได้พัฒนาหลักการออกแบบวงจรในส่วนการจัดการสัญญาณ เพื่อให้มีโครงสร้างที่ง่ายและได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเทคนิคที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบด้วยการต่อวงจรบนแผ่นทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันถึงฟังก์ชันในการทำงานว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

### 2. เทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอ

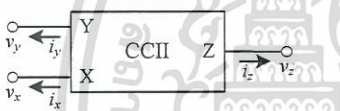
#### 2.1 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current Conveyor) หรือ CCII [4] เป็นอุปกรณ์แบบสามพอร์ตที่ถูกรออกแบบให้สามารถรับอินพุตที่เป็นทั้งกระแสและแรงดันได้ โดยทั่วไปนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูปที่ 1 โดยที่พอร์ต Y มีค่าความ

ต้านทานอินพุตสูงมาก เหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดัน ส่วนพอร์ต X มีค่าความต้านทานอินพุตต่ำ เหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณกระแส และที่พอร์ต Z มีค่าความต้านทานเอาต์พุตสูงมากซึ่งให้อาต์พุตที่เป็นสัญญาณกระแส คุณสมบัติทางอุดมคติของ CCII ที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบของเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) เครื่องหมายบวกและลบ ( $\pm$ ) แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสที่เข้าหรือออกจากพอร์ต Z และพอร์ต X ว่ามีทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม ตามลำดับ สำหรับวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X มีทิศทางเดียวกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X และกระแส  $i_z$  ไหลเข้าที่พอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCII $\oplus$ )” และวงจรสายพานกระแสที่มีทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z และพอร์ต X ทิศทางตรงข้ามกัน เช่น ถ้ากระแส  $i_x$  ไหลเข้าที่พอร์ต X แต่กระแส  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต Z จะเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCII $\ominus$ )”

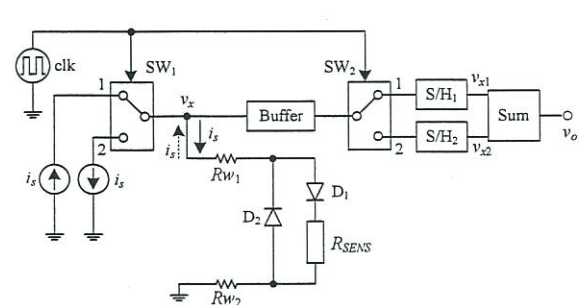


รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสชนิดสอง

## 2.2 หลักการพื้นฐาน

ในรูปที่ 2 แสดงหลักการพื้นฐานของเทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ โดยใช้สวิตช์  $SW_1$  ควบคุมทิศทางการไหลของกระแส  $i_s$  ผ่านเซนเซอร์ความต้านทาน ( $R_{SENS}$ ) และสวิตช์  $SW_2$  ควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า (sample and hold circuit) S/H $_1$  และ S/H $_2$  วิธีการชดเชยค่าความต้านทานสายในส่วนที่ใช้ต่อกับเซนเซอร์ ( $R_{w1}$ ,  $R_{w2}$ ) สามารถอธิบายได้ดังนี้

การทำงานของสวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา clk ในกรณีที่สวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  อยู่ในตำแหน่งที่ 1 ไดโอด  $D_1$  อยู่ในสภาวะนำกระแส จากการทำงานของบัฟเฟอร์ (Buffer) และวงจร S/H $_1$  จะได้ค่าแรงดัน  $v_{x1}$  คือ



รูปที่ 2 หลักการพื้นฐานของเทคนิคที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{x1} = v_{D1} + i_s (R_{w1} + R_{SENS} + R_{w2}) \quad (2)$$

เมื่อ  $v_{D1}$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด  $D_1$  ในทางตรงกันข้าม ถ้าสวิตช์  $SW_1$  และ  $SW_2$  อยู่ในตำแหน่งที่ 2 กระแส  $i_s$  จะไหลกลับทิศ (ตั้งเส้นประ) ทำให้ไดโอด  $D_2$  อยู่ในสภาวะนำกระแส จากการทำงานของวงจรของบัฟเฟอร์และวงจร S/H $_2$  จะได้ค่าแรงดัน  $v_{x2}$  คือ

$$v_{x2} = -v_{D2} - i_s (R_{w1} + R_{w2}) \quad (3)$$

โดยที่  $v_{D2}$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด  $D_2$  เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของวงจร S/H $_1$  และ S/H $_2$  มารวมกันโดยใช้วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier) ที่มีอัตราขยาย  $A_G$  จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  คือ

$$v_o = A_G (v_{x1} + v_{x2}) \quad (4)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (2) และ (3) ลงใน (4) พร้อมทั้งกำหนดให้  $v_{D1} = v_{D2}$  จะได้

$$v_o = A_G (i_s R_{SENS}) \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะเห็นว่า ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  เป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  โดยค่าความต้านทานในสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ถูกชดเชยไป ดังนั้นหลักการพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดระยะไกลได้ โดยไม่จำเป็นต้องต่อสายเพิ่มสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเพื่อชดเชยค่าความต้านทานสายดังเช่นเทคนิคการชดเชยแบบ 3 สาย หรือ 4 สาย (3-wire or 4-wire compensation)

## 2.3 การสังเคราะห์วงจร

จากหลักการพื้นฐานในรูปที่ 2 สามารถนำมาสังเคราะห์วงจรอย่างง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาดได้ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยวงจร CCII $\oplus$  ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสเพื่อสร้างสัญญาณกระแส  $i_s$  ที่ควบคุมทิศทางการไหลได้ด้วยสวิตช์  $SW_1$  เมื่อค่าแรงดันบวก  $v_s$  ถูกป้อนเข้าที่พอร์ต Y จะได้กระแส  $i_x$  และ  $i_z$  ไหลออกจากพอร์ต X และ Z ตามลำดับ ถ้าค่าแรงดันลบ  $v_s$  ถูกป้อนเข้าที่พอร์ต Y แทน กระแส  $i_x$  และ  $i_z$  จะไหลเข้าพอร์ต X และ Z ตามลำดับ จากสมการที่ (1) จะได้

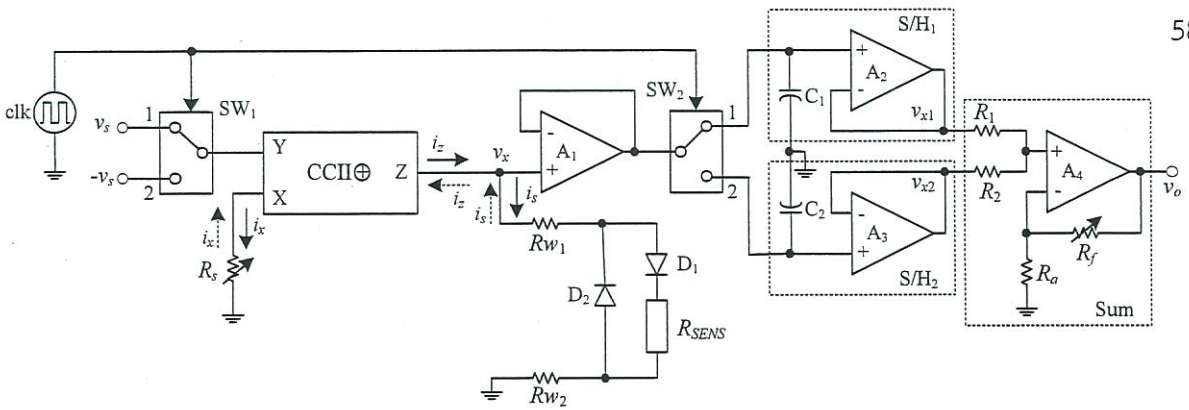
$$i_z = \pm i_x = \pm \frac{v_s}{R_s} \quad (6)$$

ออปแอมป์  $A_1$  ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ดังนั้นกระแส  $i_s$  มีค่าเท่ากับ  $i_z$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$i_s = \begin{cases} \frac{v_s}{R_s} & ; SW_1 = 1 \\ -\frac{v_s}{R_s} & ; SW_1 = 2 \end{cases} \quad (7)$$

วงจรสุ่มและคงค่า S/H $_1$  และ S/H $_2$  สังเคราะห์โดยใช้ออปแอมป์ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ  $A_2$ ,  $C_1$  และ  $A_3$ ,  $C_2$  ตามลำดับ ในส่วนของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณใช้ออปแอมป์  $A_4$  ต่อร่วมกับตัวต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_f$  และ  $R_a$  [5] โดยที่

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) \left(\frac{R_f}{R_1} v_{x1} + \frac{R_f}{R_2} v_{x2}\right) = A_G \left(\frac{R_f}{R_1} v_{x1} + \frac{R_f}{R_2} v_{x2}\right) \quad (8)$$



รูปที่ 3 การสังเคราะห์วงจรอย่างง่ายสำหรับเทคนิคการวัดระยะไกลที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการทดลอง

ชุดที่	$R_{SENS} (\Omega)$	$v_o$ ที่คำนวณได้ (V)	$v_o$ ที่วัดได้ (V)				ค่าความผิดพลาดที่ แย่ที่สุด (%)
			กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	
1	99.4	0.3976	0.399	0.394	0.395	0.399	-0.800
2	199.7	0.7988	0.799	0.798	0.799	0.805	0.729
3	301.1	1.2044	1.206	1.207	1.209	1.211	0.510
4	401	1.604	1.603	1.604	1.606	1.609	0.289
5	498.5	1.994	1.994	1.995	1.998	2.004	0.515
6	599	2.396	2.400	2.400	2.403	2.406	0.420
7	700.5	2.802	2.802	2.802	2.802	2.805	0.099
8	799	3.196	3.200	3.200	3.200	3.203	0.234
9	901	3.604	3.608	3.611	3.611	3.618	0.375
10	1000	4.000	4.010	4.013	4.013	4.013	0.329

หมายเหตุ กรณีที่ 1:  $R_{w1} + R_{w2} = 11.3 \Omega$ , กรณีที่ 2:  $R_{w1} + R_{w2} = 26.5 \Omega$

กรณีที่ 3:  $R_{w1} + R_{w2} = 50.9 \Omega$ , กรณีที่ 4:  $R_{w1} + R_{w2} = 98.8 \Omega$

เมื่อ 
$$A_G = \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) \quad (9)$$

และ 
$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

จากสมการที่ (8) และ (10) ถ้าออกแบบ  $R_1 = R_2$  จะได้

$$v_o = \frac{A_G}{2} (v_{x1} + v_{x2}) \quad (11)$$

จากหลักการพื้นฐานดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2 จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรในรูปแบบที่ 3 ดังนี้

$$v_o = \frac{A_G}{2} (i_s R_{SENS}) \quad (12)$$

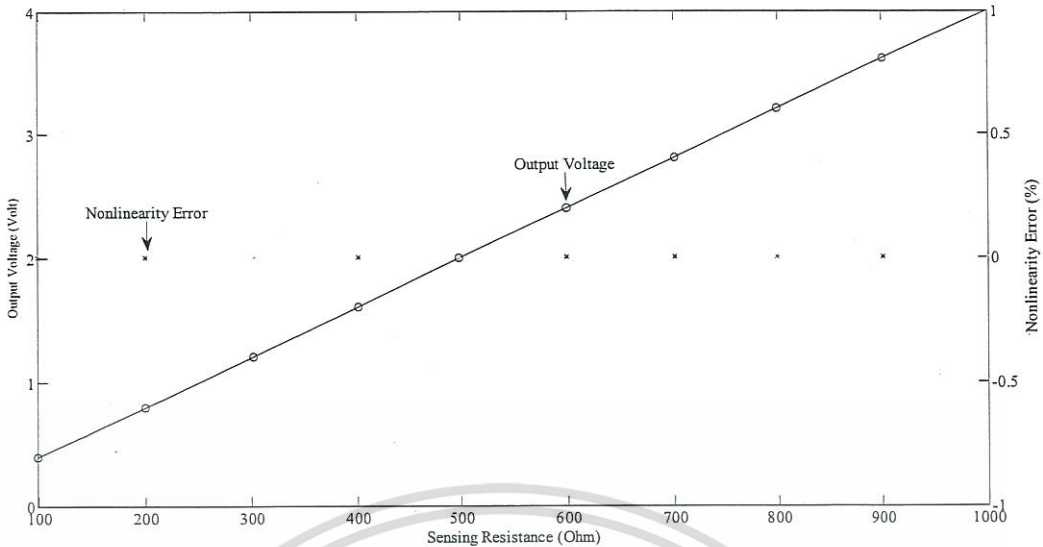
จากสมการที่ (12) แสดงให้เห็นว่า ความต้านทานสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  นอกจากนี้ค่าอัตราขยาย  $A_G$  ยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสมกับช่วงแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการได้ โดยปรับค่าอัตราส่วนระหว่างตัวต้านทาน  $R_f$  และ  $R_a$

### 3. ผลการทดลอง

เพื่อทดสอบสมรรถนะของเทคนิคการวัดระยะไกลสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานที่นำเสนอ ได้ทำการทดสอบโดยต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 3 บนแผ่นทดลองด้วยการใช้ไอซีสำเร็จรูป AD844, LF351, MUX CD4053 และ 1N4148 สำหรับวงจรสายพานกระแส ออปแอมป์ อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ และไดโอด ตามลำดับ พร้อมทั้งได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรดังนี้  $v_s = \pm 5 \text{ V}$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $i_s = \pm 1 \text{ mA}$ ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $A_G = 8$ ,  $C_1 = C_2 = 15 \text{ nF}$  สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงและสัญญาณนาฬิกาได้กำหนดค่าให้เท่ากับ  $\pm 5 \text{ V}$  และ  $1 \text{ kHz}$  ตามลำดับ

ในการบันทึกผลการทดลองได้เขียนแบบการวัดระยะไกลด้วยการกำหนดค่าความต้านทานสาย  $R_{w1}$  และ  $R_{w2}$  ให้มีค่าต่าง ๆ จำนวน 4 กรณีด้วยกัน เพื่อยืนยันผลการชดเชยค่าความต้านทานสายของเทคนิคที่ได้นำเสนอ พร้อมทั้งเขียนแบบค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SENS}$  ด้วยการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ โดยแปรค่าในช่วง  $100 \Omega - 1 \text{ k}\Omega$  ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $v_o$  ที่วัดได้และค่า  $R_{SEMS}$

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเกือบจะมีค่าคงที่ นั่นคือค่าความต้านทานสายในส่วนที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัวต้านทานมีผลกระทบต่อค่าเอาต์พุตที่วัดได้น้อยมาก โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในกรณีที่แย่ที่สุด (worst-case percentage error) ในการวัดมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 0.8\%$  อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดในการวัดนี้สามารถทำให้ลดลงได้ โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ดังเช่นการใช้วงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [6] และเพิ่มในส่วนการชดเชยค่าออฟเซต (offset) ของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ นอกจากนี้ การใช้ไดโอดที่สร้างจากทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ เช่น LM389 ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  มีความสมพงษ์กันมากขึ้น

ในรูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ที่วัดได้ (กรณีที่ 1) และค่าความต้านทานที่ตรวจวัด  $R_{SEMS}$  และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดความไม่เป็นเส้นตรง (percentage of nonlinearity error) ที่คำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (least squares regression) ซึ่งมีค่าน้อยมาก ๆ ประมาณเท่ากับศูนย์ ดังนั้น วงจรดังแสดงในรูปที่ 3 เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นสูง

#### 4. สรุป

เทคนิคการวัดระยะไกลอย่างง่ายที่มีการชดเชยความต้านทานสายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ มีจุดเด่นในด้านโครงสร้างของวงจรที่เรียบง่ายและใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดในการออกแบบ ผลการทดลองจากการต่อวงจรบนแผ่นทดลองสามารถยืนยันได้ถึงความสำเร็จของประสิทธิภาพของวงจรที่สังเคราะห์ว่าตรงตามหลักการที่ได้นำเสนอ

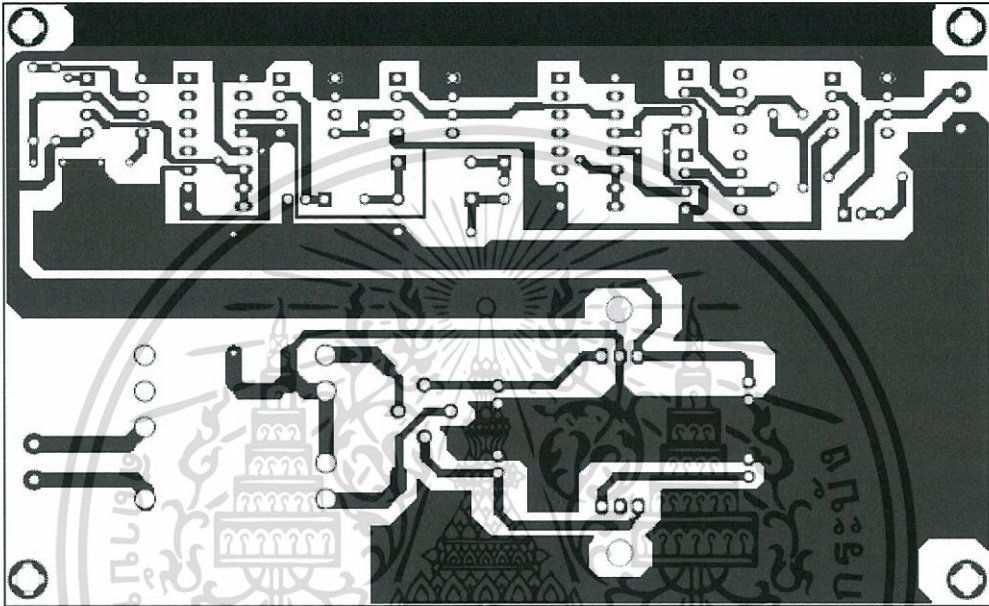
#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์. 2553. ระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล., หน้า 2.9-2.19.
- [2] Julsereewong, A., Julsereewong, P., Rungkhum T., Sasaki H., and Isoguchi H. 2010. Interface Circuit for Single Active Element Resistive Sensors. ICIC Express Letters, 4, 5(E): 1985-1990.
- [3] Maiti, T.K. and Kar, A. 2009. Novel Remote Measurement Technique Using Resistive Sensor as Grounded Load in an Opamp Based V-to-I Converter. IEEE Sensors Journal, 9, 3: 244-245.
- [4] Sedra, A., and Smith, K.C. 1970. A Second Generation Current Conveyor and Its Applications. IEEE Trans. On Circuit Theory, CT-17: 132-154.
- [5] อัมพวัน จุลเสรีวงศ์. 2550. วงจรไฟฟ้า 1. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล., หน้า 2.9-2.19.
- [6] Kaewpoonsuk, A., Riewruja, V., Rerkratn, A., and Kamsri, T. 2008. An Accurate CCII-based Voltage Controlled Current Source. Proceedings of the International Conference on Control, Automation and System, Seoul, Korea, Oct. 14-17, 2008: 1816-1819.

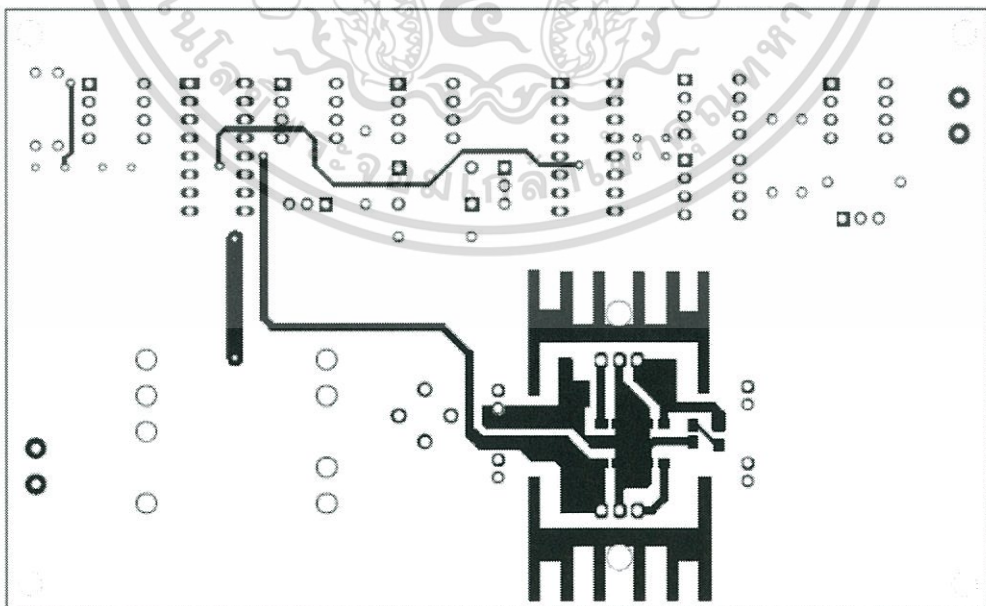
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## แบบลายวงจรการเชื่อมต่อความต้านทานบนแผ่นวงจร

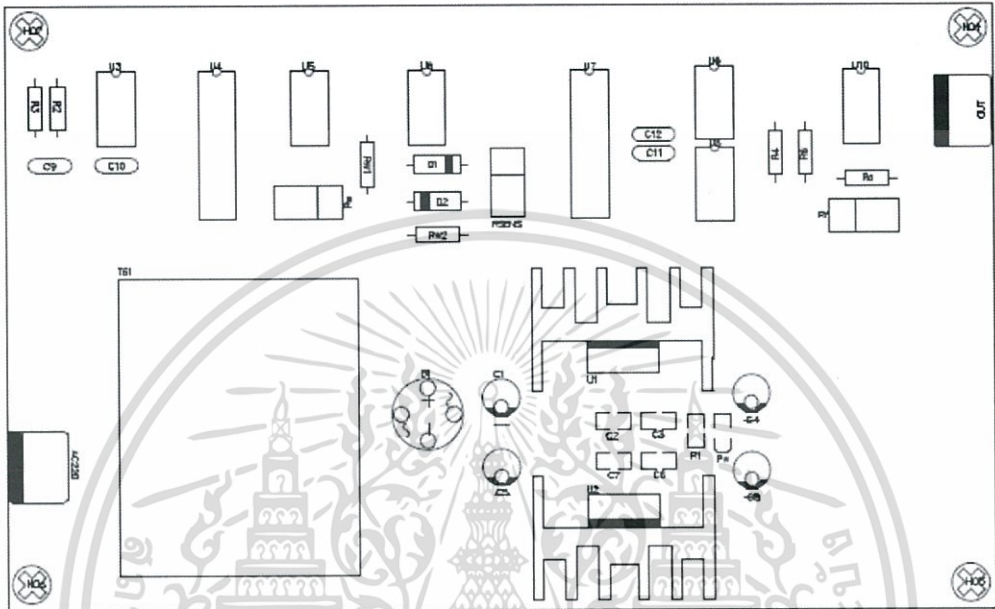


รูปที่ ข.1 ลายวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้านล่าง

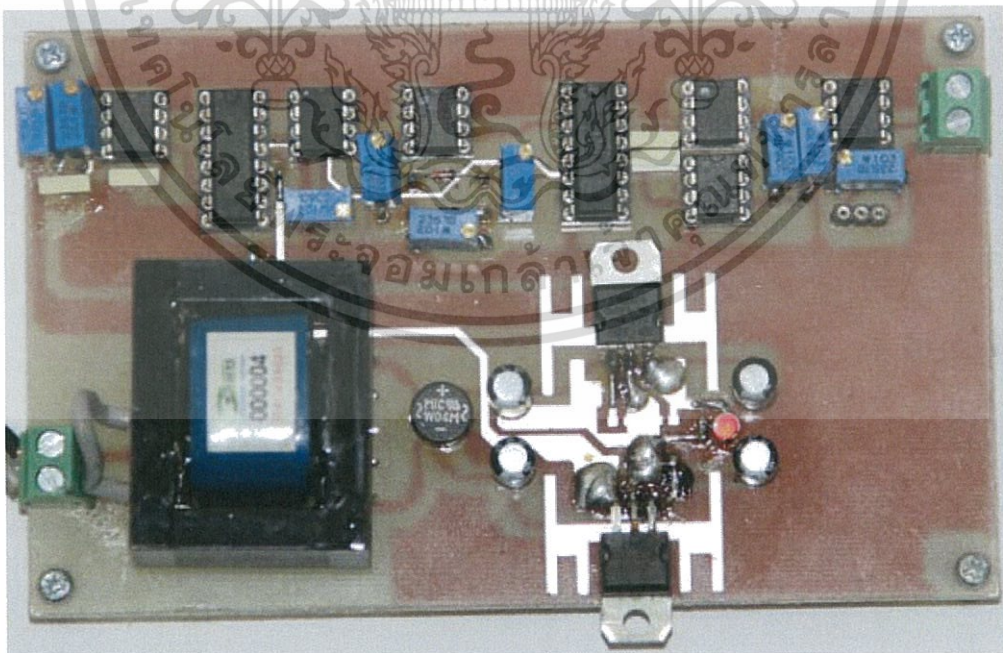


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.2 ลายวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้านบน



รูปที่ ข.3 ตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน



รูปที่ ข.4 รูปวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานบนแผ่นวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายนวเรศ สุวรรณมงคล  
 วัน เดือน ปีเกิด 6 มิถุนายน 2523 ที่จังหวัดพะเยา  
 ที่อยู่ 9 หมู่ 1 ต.เมืองพาน อ.พาน จ.เชียงราย 57120 โทร.0-5372-1769  
 ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) การออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน
- 2) การเลือกอุปกรณ์เครื่องมือวัดในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน
- 3) การออกแบบ และเลือกอุปกรณ์วิเคราะห์สารเคมี และระบบติดตามตรวจสอบการระบายมลพิษอย่างต่อเนื่อง (CEMS : Continuous Emission Monitoring System)

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2546-2547

ตำแหน่งวิศวกรบริษัท ทาคาตะ ทีโอเอ จำกัด

ที่ปรึกษา และออกแบบโปรแกรมพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

พ.ศ.2547-2549

ตำแหน่งวิศวกรบริษัท โตโย-ไทย คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

- ออกแบบ ระบบเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรม
- ที่ปรึกษา และควบคุมการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ปัจจุบัน

ตำแหน่งวิศวกรอาวุโส บริษัท ฟอสเตอร์ วิลเลอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

- ออกแบบ ระบบเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรม
- ที่ปรึกษา การเลือกควาล์วอัตโนมัติ และเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรม
- ที่ปรึกษา และควบคุมการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้