

วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับ  
เซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว

SIMPLE LINEARIZATION CIRCUIT FOR SINGLE RESISTIVE SENSORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-060-059

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SIMPLE LINEARIZATION CIRCUIT FOR SINGLE RESISTIVE SENSORS



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  
2014

KMITL-2014-EN-M-060-059

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว  
Thesis Title Simple Linearization Circuit for Single Resistive Sensors  
นักศึกษา นายวัชรินทร์ นอกกระโทก  
รหัสประจำตัว 52611114  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-060-059

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พุศกิติ์	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร.ไสว	พงศ์สวัสดิ์	
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญุฒิธรรม	
รศ.ดร.อัมพวัน	จุลเสรีวงศ์	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสรีวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปทำอย่างอื่นโดยไม่ขออนุญาต  
วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2557  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรถัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว
นักศึกษา	นายวัชรินทร์ นอกกระโทก
รหัสนักศึกษา	52611114
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอวงจรถัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว การสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอใช้วงจรร้อยที่มีวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับบออปแอมป์เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ใช้เพียงวงจรสายพานกระแสซึ่งเคยถูกนำเสนอในอดีต พบว่าวงจรถัดการที่นำเสนอมีการปรับปรุงในเรื่องของความแม่นยำ ประสิทธิภาพของวงจรถัดการที่ได้นำเสนอพิสูจน์ให้เห็นได้ด้วยผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Simple Linearization Circuit for Single Resistive Sensors
Student	Mr.Watcharin Nokkrathok
Student ID.	52611114
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Asso.Prof.Prasit Julsereewong

## ABSTRACT

This paper presents a simple linearization circuit for interfacing single resistive sensors. The realization method utilizes hybrid current conveyor-opamp sub-circuits to generate the output voltage, which is linearly proportional to the sensing resistance. Compared to the previously reported technique using only current conveyors, the proposed circuit affords significant improvement in accuracy. Effectiveness of the proposed circuit is evidenced by PSPICE simulation and experimental results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการสนับสนุน ความคิดริเริ่ม คำแนะนำและคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จาก รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อัมพวัน จุลเสรีวงศ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดจนให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิชัยธรรม อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือนิวตริกและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เป็นแรงผลักดันให้ผู้เขียนได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทักษิณ แสงสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือนิวตริกและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในด้านการทดลอง ตลอดจนให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน

ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ทุกท่าน และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่รัก ห่วงใย และให้การสนับสนุนในการศึกษา ด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งญาติ พี่ น้อง และเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ แก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

วัชรินทร์ นอกกระโทก

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 เซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยว.....	4
2.2.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี.....	4
2.2.2 เซนเซอร์ความต้านทานสเตรนเกจ.....	9
2.3 เซนเซอร์ความต้านทานแบบความแตกต่าง.....	13
2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน.....	14
2.4.1 วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน.....	14
2.4.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีด้วยวงจรวีทสโตนบริดจ์.....	15
2.4.3 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานสเตรนเกจด้วยวงจรวีทสโตนบริดจ์.....	18
2.4.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยทรานสมิสเตอร์.....	20
2.4.5 การเชื่อมต่อเซนเซอร์แบบโพเทนชิโอเมเตอร์.....	21
2.5 บทสรุป.....	23
บทที่ 3 หลักการเกี่ยวกับวงจรย่อยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3.1 กล่าวนำ.....	24
3.2 วงจรย่อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรสำหรับเทคนิคที่นำเสนอ.....	24
3.2.1 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 2.....	24
3.2.2 ออปแอมป์.....	26
3.2.3 วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับออปแอมป์.....	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การวิเคราะห์งานวิจัยที่เคยเสนอในอดีตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3.3.1 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว.....	29
3.3.2 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงาน ร่วมกับบออปแอมป์.....	30
3.3.3 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส.....	33
3.4 บทสรุป.....	37
บทที่ 4 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้.....	38
4.1 กล่าวนำ.....	38
4.2 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอและการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจร.....	38
4.3 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลอง.....	42
4.3.1 การทดสอบวงจรด้วยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี Pt100.....	42
4.3.2 การทดสอบวงจรด้วยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี Pt1000.....	46
4.4 บทสรุป.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์โดยใช้วงจรสายพาน กระแส.....	55
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ.....	58
ภาคผนวก ค บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	71

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำอาร์ทีดี.....	6
4.1 ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt100.....	43
4.2 ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt100.....	45
4.3 ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt1000.....	48
4.4 ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt1000.....	50



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม.....	4
2.2 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	5
2.3 กราฟแสดงความแม่นยำของ Class A และ Class B.....	8
2.4 อาร์ทีดีแบบ Wire-wound.....	8
2.5 อาร์ทีดีแบบ Thin Film.....	9
2.6 หลักการทำงานของสเตรนเกจ.....	10
2.7 แบบอินบอนด์และแบบบอนด์.....	10
2.8 ความต้านทานรูปแบบต่าง ๆ ของสเตรนเกจ.....	11
2.9 วงจรบริดจ์สำหรับสเตรนเกจ.....	12
2.10 ภาพตัดของสเตรนเกจวัดความดันโดยใช้ไดอะแฟรมร่วมกับสเตรนเกจแบบบอนด์ 4 ตัว.....	12
2.11 โพลีเอทิลีนไอมิเตอร์.....	13
2.12 วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน.....	14
2.13 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 2 สาย.....	16
2.14 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 3 สาย.....	17
2.15 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 4 สาย.....	17
2.16 วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่มีสเตรนเกจพื้นฐาน.....	18
2.17 วงจรเชื่อมต่อสเตรนเกจประเภทต่าง ๆ.....	19
2.18 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 2 สาย.....	20
2.19 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิสเตอร์แบบ 4 สาย.....	21
2.20 การเชื่อมต่อเซนเซอร์แบบโพลีเอทิลีนไอมิเตอร์.....	22
3.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส.....	24
3.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII).....	25
3.3 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองชนิดบวก (CCII+).....	25
3.4 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองชนิดลบ (CCII-).....	26
3.5 วงจรสมมูลภายในออปแอมป์ในสภาวะทางอุดมคติ.....	26
3.6 วงจรออปแอมป์ทางอุดมคติ.....	27
3.7 วงจรย่อยที่ใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์.....	27
3.8 สัญลักษณ์ของวงจร Operational Conveyor ชนิดบวก (OC+).....	28
3.9 สัญลักษณ์ของวงจร Operational Conveyor ชนิดลบ (OC-).....	28
3.10 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [3].....	29
3.11 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [4].....	30
3.12 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส [6].....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ.....	38
4.2 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt100.....	42
4.3 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt100.....	43
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt100.....	44
4.5 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt100.....	44
4.6 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt100.....	45
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการต่อวงจรจริงและจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt100.....	46
4.8 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000.....	47
4.9 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000.....	47
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการเลียนแบบค่าด้วย โปรแกรม PSPICE และจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt1000.....	48
4.11 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000.....	49
4.12 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000.....	49
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการต่อวงจรจริงและจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt1000.....	50
ก.1 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส [6].....	55
ข.1 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ.....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดค่าในระบบการวัดคุมทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เซนเซอร์ความต้านทาน (Resistive Sensor) เพื่อตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความดัน หรือค่าความเค้น โดยประเภทของเซนเซอร์ความต้านทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักด้วยกันคือ แบบเชิงเดี่ยว (Single Type) และแบบความแตกต่าง (Differential Type) โดยเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวมีส่วนตรวจวัด (Sensing Element) เพียงแค่ตัวเดียวที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณหรือตัวแปรที่ต้องการตรวจวัดค่าตัวอย่างเช่น อาร์ทีดี (Resistive Temperature Detector: RTD) และ สเตรนเกจ (Strain Gauge) ส่วนเซนเซอร์แบบความแตกต่างมีส่วนตรวจวัดสองส่วน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของส่วนตรวจวัดที่ตรงข้ามกัน โดยส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามปริมาณหรือค่าตัวแปรที่ตรวจวัดที่มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานลดลงตัวอย่างเช่น เซนเซอร์แบบโพเทนชิโอเมตริก (Potentiometric Sensor) โดยทั่วไปวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานมีโครงสร้างเป็นวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ที่มีการทำงานในโหมดแรงดัน (Voltage-Mode) [1] หรือบริดจ์ที่มีการทำงานโหมดกระแส (Current-Mode) [2] โดยสัญญาณเอาต์พุต (Output Signal) ของวงจรบริดจ์ทั้งสองสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวและแบบความแตกต่าง เมื่อกำหนดให้  $R_0$  คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่สภาวะบริดจ์สมดุล และ  $\Delta R$  คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณหรือตัวแปรที่กำลังถูกตรวจวัด พบว่าในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยววงจรบริดจ์ทั้งสองสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้น (Linearization Circuit) ในบทความวิจัย [3] และ [4] ได้นำเสนอวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาด โดยวงจรที่นำเสนอทั้งสองมีโครงสร้างที่ง่ายและมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [3] เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายกระแสอ้างอิง 2 ตัว โดยค่ากระแสของแหล่งจ่ายทั้งสองต้องเท่ากัน และวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [4] เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง 2 ตัว โดยค่าแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสองต้องมีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม

วัตถุประสงค์ของบทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดและต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียว ทำให้สะดวกในการต่อใช้งานจริง สำหรับการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอได้ทำการทดสอบด้วยการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรบนแผ่นทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันถึงฟังก์ชันในการทำงานว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปและต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียว เพื่อลดความยุ่งยากในการต่อใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย คือ เพื่อศึกษาแนวทางและหลักการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายโดยใช้วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current Conveyor : CCII) ต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ (Operational Amplifier : Opamp) หรือที่เรียกว่าวงจร “Operational Conveyor” เพื่อลดผลกระทบจากความต้านทานของวงจรสายพานกระแสทำให้ได้ค่าสัญญาณเอาต์พุตมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

### 1.3 การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์

จากการติดตามผลงานวิจัยและสิ่งตีพิมพ์ทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานในอดีตที่ใช้เป็นวิธสโตนบริดจ์ ที่มีการทำงานในโหมดแรงดัน [1] หรือบริดจ์ที่มีการทำงานโหมดกระแส [2] พบว่าในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยว วงจรบริดจ์ทั้งสองสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้น ในบทความวิจัย [3] และ [4] แต่อย่างไรก็ตามวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [3] เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายกระแสอ้างอิง 2 ตัว โดยค่ากระแสของแหล่งจ่ายทั้งสองต้องเท่ากันและวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย [4] เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง 2 ตัว ทำให้ยุ่งยากต่อการต่อใช้งานและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้หลักการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ ซึ่งใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดและต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียว โดยมีโครงสร้างที่ง่าย และได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เทคนิคการนำเสนอวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดและต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียว ทำให้สะดวกในการต่อใช้งานจริง สำหรับการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอได้ทำการทดสอบด้วยการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรบนแผ่นทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันถึงฟังก์ชันในการทำงานว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา การนำเสนอหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ความต้านทานชนิดต่าง ๆ และการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยวงจรต่าง ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับวงจรย่อยที่ใช้ในการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ พร้อมทั้งอธิบายถึงผลงานวิจัยที่อ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรที่ได้นำเสนอและการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจร ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยโปรแกรม PSPICE เทียบกับผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้นำเสนอในงานวิจัย พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยฉบับนี้ จะเป็นภาคผนวกโดยที่

ภาคผนวก ก เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์โดยใช้วงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียว

ภาคผนวก ข เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ

ภาคผนวก ค เป็นผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

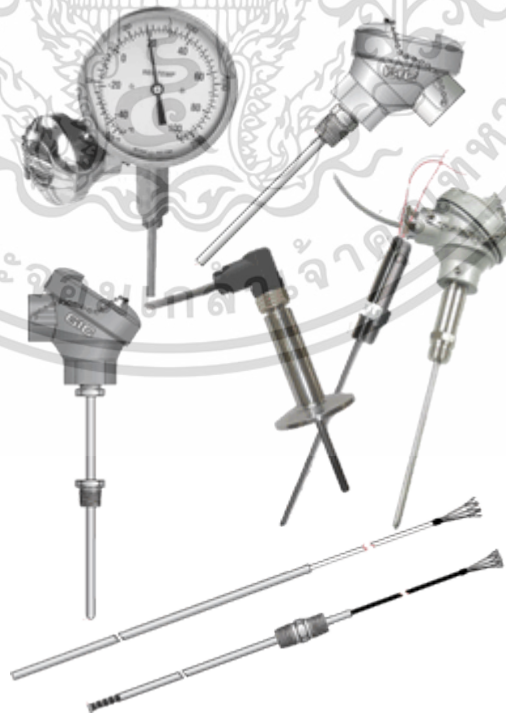
### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของความต้านทานไฟฟ้าและเซนเซอร์ความต้านทานที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี เซนเซอร์ความต้านทานสเตรนเกจ เซนเซอร์ความต้านทานแบบโพเทนซิโอเมตริก และอธิบายวงจรที่นำมาใช้เชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบต่าง ๆ ดังเช่น วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน หรือการเชื่อมเซนเซอร์ความต้านทานด้วยทรานสมิตเตอร์ เป็นต้น

### 2.2 เซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยว

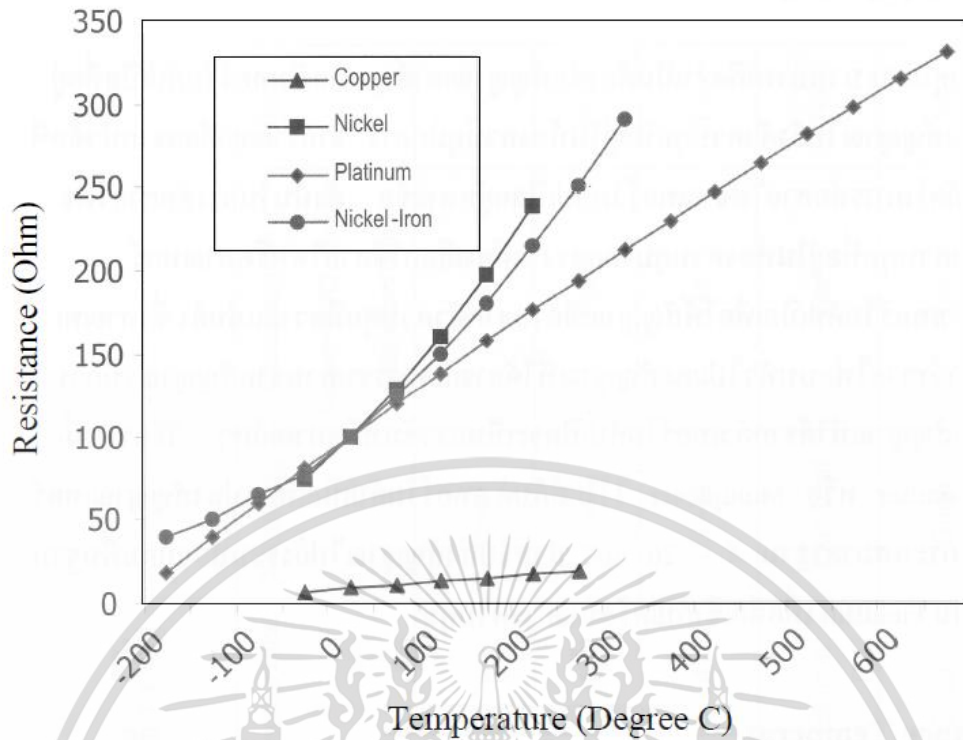
เซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวมีส่วนตรวจวัด (Sensing Element) เพียงแค่ตัวเดียวที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณหรือตัวแปรที่ต้องการตรวจวัดค่าตัวอย่างเช่น อาร์ทีดี (Resistive Temperature Detector: RTD) [9] และ สเตรนเกจ (Strain Gauge) [10] มีการนำไปใช้วัดหลาย ๆ อย่างในปัจจุบันเช่น วัดอุณหภูมิ หรือตราชั่ง ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม หรือแม้แต่ในชีวิตประจำวัน ในวิทยานิพนธ์นี้ขออธิบายถึงเซนเซอร์ความต้านทานที่นิยมใช้เท่านั้น คือ เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และเซนเซอร์จำพวกสเตรนเกจสำหรับวัดน้ำหนักหรือวัดความดัน

#### 2.2.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี [9]



รูปที่ 2.1 เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่าง ๆ

อาร์ทีดี เป็นเซนเซอร์ความต้านทานที่มีความไวในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เมื่ออุณหภูมิรอบตัวเปลี่ยนไป โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิมีค่าเป็นบวก นั่นคือค่าความต้านทานของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าความต้านทานจะถูกกำหนดด้วยความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ใช้ทำตัวอาร์ทีดี ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความยาวและจะเป็นอัตราส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ

$R$  = ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )

$\rho$  = ความต้านทานของวัสดุ ( $\Omega$ )

$L$  = ความยาว (m)

$A$  = พื้นที่หน้าตัด (m<sup>2</sup>)

นอกจากค่าความต้านทานของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำตัวอาร์ทีดี แล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับเลือกวัสดุ เป็นดังนี้

1) ต้องเปลี่ยนแปลงรูปได้ง่ายเพื่อสามารถนำไปทำเป็นเส้นเล็ก ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี เทคโนโลยี จำกัด เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ต้องมีค่าความต้านทานที่คงที่
- 3) ต้องทนต่อการกัดกร่อน
- 4) ต้องมีราคาถูก
- 5) มีค่าความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ

วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำอาร์ทีดีจะมีอยู่ 4 ชนิดดังนี้ คือ Copper, Nickel, Nickel/Iron และ Platinum ส่วนที่นำมาใช้วัดอุณหภูมิในอุตสาหกรรมจะเป็นชนิด Platinum โดยที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ IEC/DIN Grade, Reference Grade คุณสมบัติของวัสดุทั้ง 4 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำอาร์ทีดี

Material	Temperature Coefficient	Temperature Range	Description	Primary use
Platinum	0.00385 - 0.003926 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$	-269 $^{\circ}\text{C}$ to 593 $^{\circ}\text{C}$ (-452 $^{\circ}\text{F}$ to 1100 $^{\circ}\text{F}$ )	Best accuracy and stability. Resistance vs. Temperature is linear. Wide range and high resistivity	Primary choice for most industrial
Nickel	0.0067 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$	-40 $^{\circ}\text{C}$ to 300 $^{\circ}\text{C}$ (-40 $^{\circ}\text{F}$ to 570 $^{\circ}\text{F}$ )	Highest temperature coefficient. Highest output unit.	Used for some old Navy shipboard
Copper	0.0043 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$	-73 $^{\circ}\text{C}$ to 149 $^{\circ}\text{C}$ (-100 $^{\circ}\text{F}$ to 300 $^{\circ}\text{F}$ )	Most linear, but has limited temperature range. Very low resistivity	Used for electric motor and generator
Nickel/Iron (70/30)	0.0051 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$	-46 $^{\circ}\text{C}$ to 343 $^{\circ}\text{C}$ (-50 $^{\circ}\text{F}$ to 650 $^{\circ}\text{F}$ )	Like Nickel, has slight variations in temperature coefficient from one batch to next time	Used for wind shield temperature measurements

IEC/DIN Grade จะเป็นชนิดที่ใช้ Platinum บริสุทธิ์ที่มีส่วนผสมของโลหะเล็กน้อย เพื่อใช้ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ อาร์ทีดีชนิดนี้จะถูกใช้อ้างอิงเป็นมาตรฐานสำหรับผู้ผลิต สำหรับ Reference Grade เป็นชนิดที่ใช้ Platinum บริสุทธิ์ที่ 99.999%

ชนิดของ Platinum จะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของอาร์ทีดี โดยค่าความชันกราฟของความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งแต่ 0  $^{\circ}\text{C}$  ถึง 100  $^{\circ}\text{C}$  จะถูกแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\alpha = \frac{(R_{100} - R_0)}{(R_0 \times t)} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของอาร์ทีดี

$R_{100}$  = ความต้านทานที่ 100 °C

$R_0$  = ความต้านทานที่ 0 °C

$t$  = ค่าอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ

Platinum อาร์ทีดี ที่ทำมาจาก IEC/DIN Grade จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 100  $\Omega$  ที่อุณหภูมิ 0 °C และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 138.5  $\Omega$  ที่อุณหภูมิ 100 °C ซึ่งจะแตกต่างกับ Platinum อาร์ทีดี ที่ทำมาจาก Reference Grade จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 100  $\Omega$  ที่อุณหภูมิ 0 °C แต่จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 139.26  $\Omega$  ที่อุณหภูมิ 100 °C จะเห็นได้ว่าจะมีค่าความต้านทานแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 100 °C ทั้งสองชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิดังนี้

IEC/DIN Grade จะมาค่า  $\alpha = 0.00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$

Reference Grade จะมาค่า  $\alpha = 0.003926 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิสามารถประมาณค่าโดยใช้สมการของ Callender Van Dusen ที่ถูกทำให้สมการง่ายขึ้นดังสมการที่ (2.3)

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (2.3)$$

สำหรับการหาค่าความต้านทานของอาร์ทีดี สำหรับอุณหภูมิที่มากกว่า 0 °C ขึ้นไป สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.4)

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (2.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ A, B และ C จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นโลหะอาร์ทีดี และความบริสุทธิ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของ Platinum อาร์ทีดี ตามมาตรฐาน IEC 751-2(ITS90) จะเป็นดังนี้

$$A = 3.90833 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.7753 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

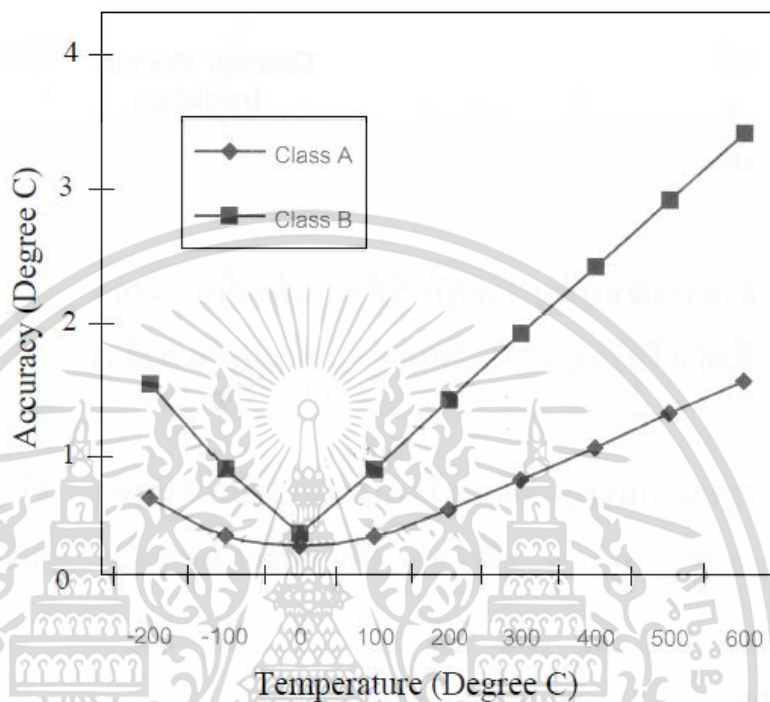
$$C = -4.1833 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$$

มาตรฐาน IEC 751 ได้แสดงความแม่นยำของ Platinum อาร์ทีดี สำหรับ DIN Grade ไว้ 2 Class คือ Class A และ Class B โดย Class A จะมีค่าความแม่นยำสูงจะมีค่าความผิดพลาดที่  $\pm 0.06 \Omega$  เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเยือกแข็ง (Ice Point) สำหรับ Class B จะมีค่ามาตรฐานความผิดพลาดที่  $\pm 0.12 \Omega$  เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเยือกแข็ง ซึ่ง Class A และ Class B จะมีการใช้งานในอุตสาหกรรม และจะครอบคลุมย่านอุณหภูมิตั้งแต่ -200 °C ถึง 850 °C สำหรับ Class A จะครอบคลุมย่าน

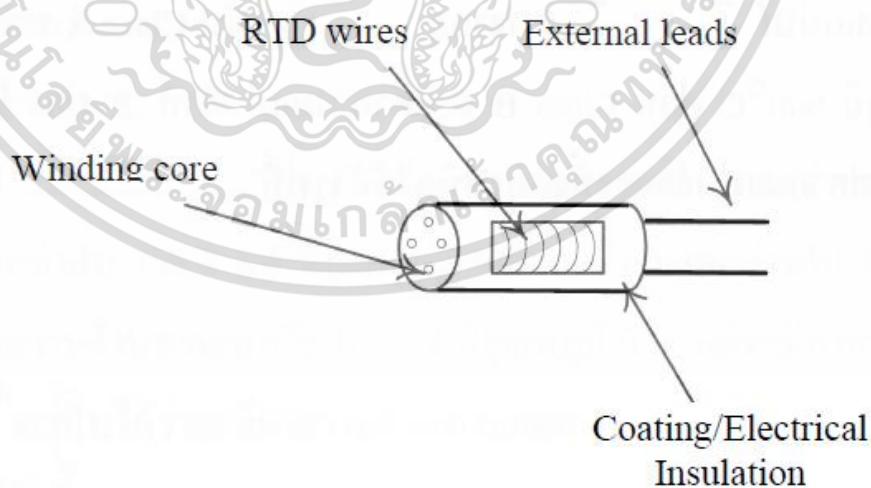
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิตั้งแต่  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจะมีเฉพาะอาร์ทีดี ที่เป็นแบบ 3 สาย (3 wires) และ 4 สาย (wires) เท่านั้น อาร์ทีดีที่มีความแม่นยำที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิ สำหรับ Class A จะมีค่าความแม่นยำที่  $\pm 0.43\ \Omega$  ( $\pm 1.45^{\circ}\text{C}$ ) ที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วน Class B จะมี ค่าความแม่นยำที่  $\pm 1.06\ \Omega$  ( $\pm 3.3^{\circ}\text{C}$ ) ที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  สามารถแสดงในกราฟความแม่นยำของทั้งสองดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความแม่นยำของ Class A และ Class B



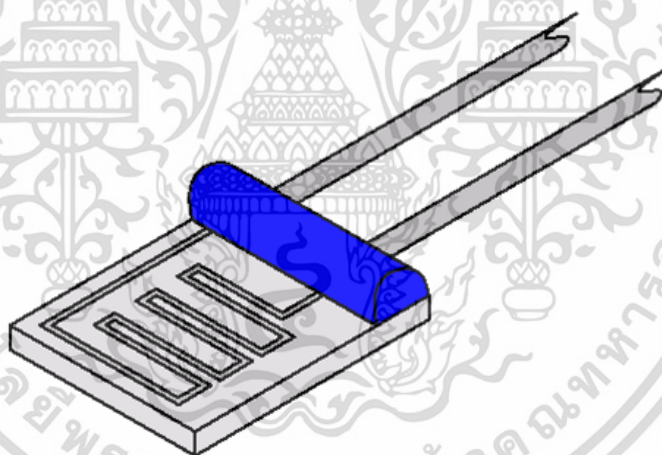
รูปที่ 2.4 อาร์ทีดีแบบ Wire-wound

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวอาร์ทีดี แบบ Platinum จะมีรูปแบบที่ถูกนำมาใช้งานด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือ Wire Wound และ Thin Film ซึ่งแต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอาร์ทีดีแบบ Wire Wound มีการออกแบบง่ายและเป็นรูปแบบที่สามารถนำมาใช้กับเส้นวัสดุที่เป็น Copper, Nickel, Nickel/Iron และ Platinum เส้นวัสดุเหล่านี้จะถูกพันรอบอยู่บนแกนที่เป็นฉนวนและจะถูกปิดทับด้วยฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำแกนต้องมีความเหมาะสมกับการขยายตัวของเส้นวัสดุอาร์ทีดี เพื่อป้องกันการดึงตัวของเส้นวัสดุอาร์ทีดี ที่พันอยู่บนแกน ความดึงตัวของเส้นวัสดุจะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด เส้นวัสดุอาร์ทีดี ที่พันอยู่บนแกนจะถูกต่อออกไปยังภายนอกด้วยสายไฟขนาดใหญ่ สายไฟที่จะนำมาต่อนี้ต้องไม่มีการกำเนิด Thermal EMF ตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการวัด

อาร์ทีดีแบบ Thin Film ถูกออกแบบขึ้นโดยวางแผ่น Platinum บาง ๆ ลงบนฐานรองที่เป็นเซรามิก แผ่น Platinum จะมีความหนาประมาณ  $10^{-8}$  เซนติเมตร จากนั้นทำการเคลือบผิวด้านหน้าด้วย Epoxy หรือกระจกเพื่อป้องกันความเสียหายของแผ่น Platinum ช่วงแรกในการนำไปใช้งานจะมีปัญหาเกี่ยวกับการกระแทกและการขาดของแผ่น Platinum ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงให้แข็งแรงขึ้นแต่ก็ยังไม่เทียบเท่ากับ Wire Wound และจะมีเฉพาะ DIN Grade เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.5

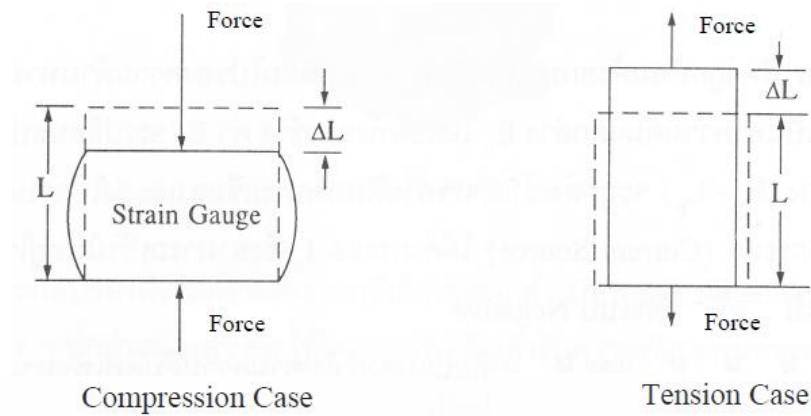


รูปที่ 2.5 อาร์ทีดีแบบ Thin Film

### 2.2.2 เซนเซอร์สเตรนเกจ [10]

สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน (Passive Transducer) ที่ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในขดลวด เพื่อการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่นการวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ (Displacement) เครื่องมือวัดความดันแบบสเตรนเกจ อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวนำ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

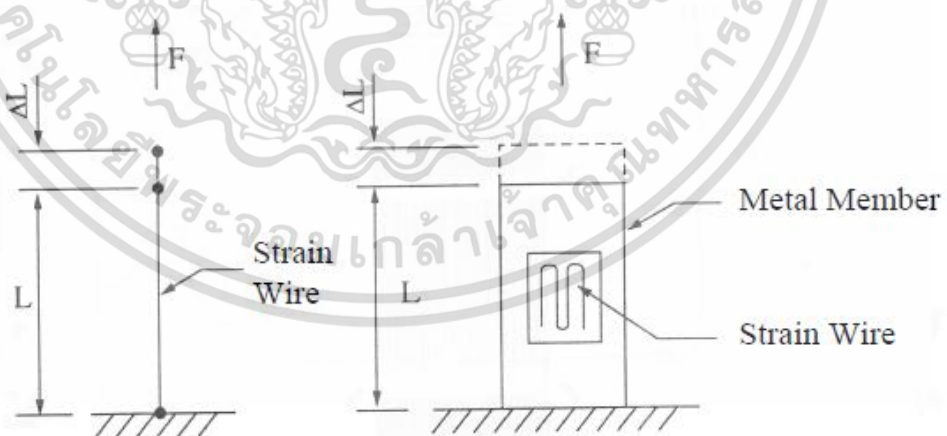


รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของสเตรนเกจ

ค่าความเครียด หรือค่าสเตรน หมายถึงความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิม

$$\text{Strain} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.5)$$

$\Delta L$  เกิดจากความดันในระบบกระทำลงบนพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ถ้าเป็นแรงกดอันเกิดจากความดัน ขนาดความยาว  $L$  จะลดลง ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตัวนำจะใหญ่ขึ้น ทำให้ความต้านทานของขดลวดต่ำลง แต่ถ้าเป็นแรงดึงอันเกิดจาก Vacuum ขนาดความยาวเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดสูงขึ้น โดยทั่วไปสเตรนเกจมี 2 แบบคือ แบบบอนด์และแบบอินบอนด์ ดังรูปที่ 2.7

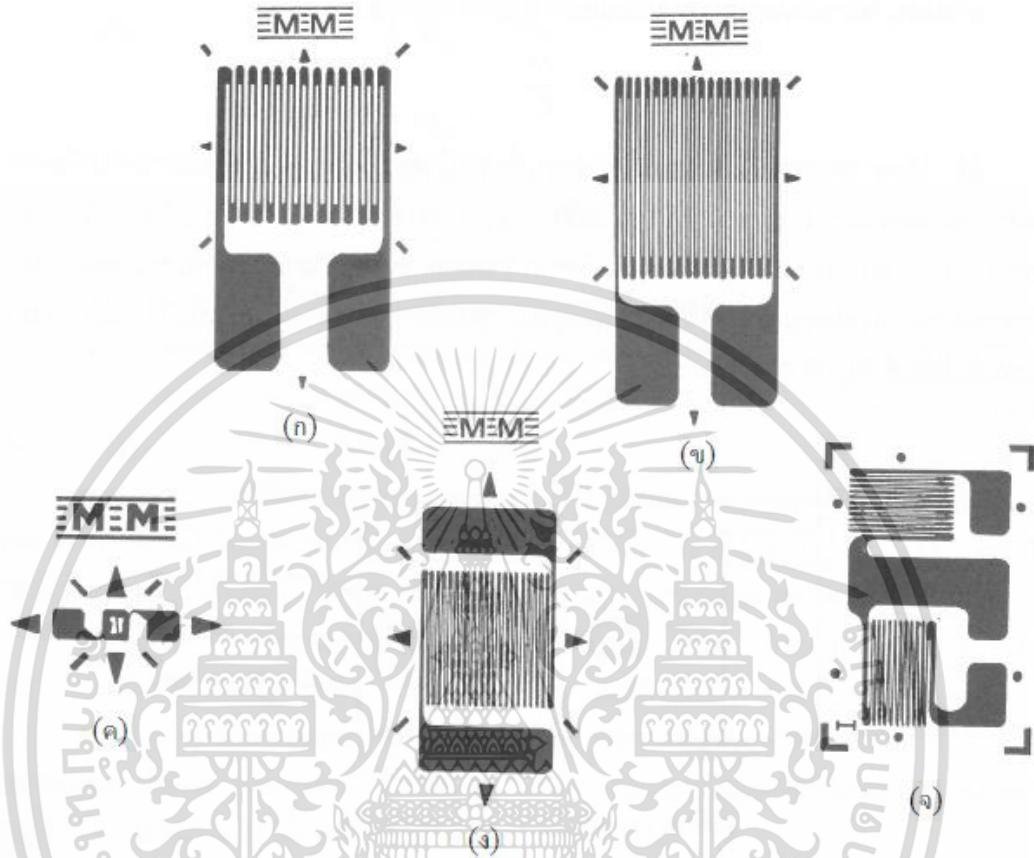


รูปที่ 2.7 แบบอินบอนด์และแบบบอนด์

แบบอินบอนด์ ด้านหนึ่งของตัวสเตรนเกจติดอยู่กับโครงสร้าง ด้านบนเป็นด้านที่รับรู้การเปลี่ยนแปลงของความดัน ซึ่งแบบอินบอนด์นี้เหมาะสมสำหรับการวัดความดันต่ำ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบบอนด์ ตัวสเตรนเกจจะถูกติดตั้งอยู่บนเมนเบอร์ การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของตัวสเตรนเกจจะเป็นไปตามเมนเบอร์ ดังนั้น แบบบอนด์จึงจะไม่เหมาะสมสำหรับวัดความดันหรือ Vacuum ค่าต่ำ ๆ รูปแบบของขดลวดสเตรนเกจมีหลายรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความต้านทานรูปแบบต่าง ๆ ของสเตรนเกจ

ความไวของการวัดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ

$$\text{เกจแฟกเตอร์ (หรือ Stain Sensitivity)} = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \tag{2.6}$$

เมื่อ

$\Delta R$  คือค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปอันเนื่องจากความยาว  $L$  เปลี่ยนไป  $\Delta L$

$R$  คือค่าความต้านทานขณะความยาว  $L$  สำหรับสเตรนเกจโดยทั่วไป

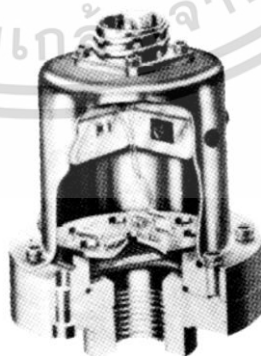
เกจแฟกเตอร์จะมีค่าประมาณ 2 ถึง 5 ค่าสูงขึ้นหมายถึง ความไวในการวัดมีค่าสูงขึ้น แต่โลหะมีความไวสูงส่วนใหญ่จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย และมีเสถียรภาพต่ำกว่าแบบที่มีค่าเกจแฟกเตอร์ต่ำ วงจรการวัดแบบวงจรบริดจ์ตามรูปที่ 2.9 ตัวต้านทานสำหรับชดเชยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Compensator) มีไว้สำหรับชดเชยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลง (โดยทั่วไปประมาณ 15 °F ถึง 115 °F) ความต้านทานของสเตรนเกจโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 100  $\Omega$  ถึง 500  $\Omega$  ไฟซ์พพลายที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์เป็นเอซีหรือดีซีก็ได้ เอาต์พุตที่ได้ประมาณ 1 mV ถึง 3 mV ต่อไฟซ์พพลาย (Power Supply) ป้อน 1 โวลต์ สเตรนเกจที่มีใช้ในปัจจุบัน วงจรบริดจ์นี้จะถูกบรรจุอยู่ในหัววัด (Head Assemblies) และจะมีทรานสมิตเตอร์ สำหรับแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4 mA ถึง 20 mA เพื่อสะดวกในการใช้งาน

โดยปกติสเตรนเกจจะมีค่าความผิดพลาดประมาณ  $\pm 1\%$  ถึง  $\pm 2\%$  ของค่าเต็มสเกล ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ในการออกแบบ ย่านการใช้งานมิให้เลือกตั้งแต่ความดันค่าต่ำ ๆ ไปจนถึง 200,000 Psig (13900 bar) ในปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์สเตรนเกจจากสารเคมีคอนดักเตอร์ซิลิคอน ซึ่งสามารถให้เกจแฟคเตอร์ได้สูงถึง 50 ถึง 150



รูปที่ 2.9 วงจรบริดจ์สำหรับสเตรนเกจ



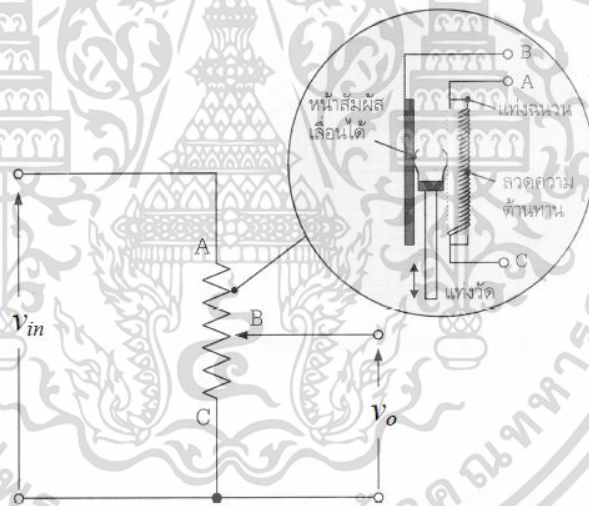
รูปที่ 2.10 ภาพตัดของสเตรนเกจวัดความดันโดยใช้ไดอะแฟรมร่วมกับสเตรนเกจแบบบอนด์ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซนเซอร์ความต้านทานแบบความแตกต่าง

เซนเซอร์แบบความแตกต่างมีส่วนตรวจวัดสองส่วน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของส่วนตรวจวัดที่ตรงข้ามกัน โดยส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามปริมาณหรือค่าตัวแปรที่ตรวจวัดที่มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานลดลง ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์แบบโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer Sensor)

โพเทนชิโอมิเตอร์ [11] เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดที่มีสามขั้วและสามารถปรับค่าได้ โดยโครงสร้างทั่วไปของโพเทนชิโอมิเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยหน้าสัมผัส (Sliding Contact) ที่สามารถเลื่อนขึ้นหรือลงตามความยาวของขดลวดความต้านทาน โดยหน้าสัมผัสบางครั้งนิยมเรียกว่า “ไวเปอร์ (Wiper)” นี้จะถูกเชื่อมต่อกับแท่งวัดซึ่งต่ออยู่กับวัตถุที่ต้องการตรวจสอบระยะขจัด ทั่วไปแล้วรูปแบบของหน้าสัมผัสของโพเทนชิโอมิเตอร์มักมีการออกแบบแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยและเงื่อนไขในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบแบบไหน วัสดุที่นำมาใช้ทำหน้าสัมผัสมักนิยมทำมาจากโลหะทองแดงผสมเสียเป็นส่วนมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าโลหะทองแดงผสมมีความยืดหยุ่นตัวสูงจึงทำให้ง่ายไปขึ้นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย รวมทั้งยังมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีอีกด้วย ส่วนลวดความต้านทานของโพเทนชิโอมิเตอร์นั้นนิยมทำมาจากลวดนิเกิลหรือลวดแพลทินัม นำมาพันรอบแกนที่เป็นฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 โพเทนชิโอมิเตอร์

กลับมาพิจารณาวงจรไฟฟ้าของโพเทนชิโอมิเตอร์ในรูปที่ 2.11 อีกครั้งจะเห็นว่าแรงดันอินพุต  $v_{in}$  ของวงจรถูกป้อนให้กับลวดตัวต้านทานทั้งหมดระหว่างขั้ว A กับขั้ว B ขณะที่แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรอยู่ระหว่างหน้าสัมผัสที่ขั้ว B กับขั้ว C จึงทำให้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงของหน้าสัมผัสนั้นจะมีค่าแปรผันตามสัดส่วนโดยตรงกับระยะขจัด B-C ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต  $v_{in}$  กับแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  และระยะขจัด B-C มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น ในการใช้งานเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่เกิดระยะขจัดเป็นผลให้แท่งวัดของโพเทนชิโอมิเตอร์ที่ต่อกับวัตถุเคลื่อนที่ตามไปด้วยเช่นกัน และส่งผลให้เลื่อนไปมีระยะมากขึ้นค่าเท่ากับ B-C ขณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

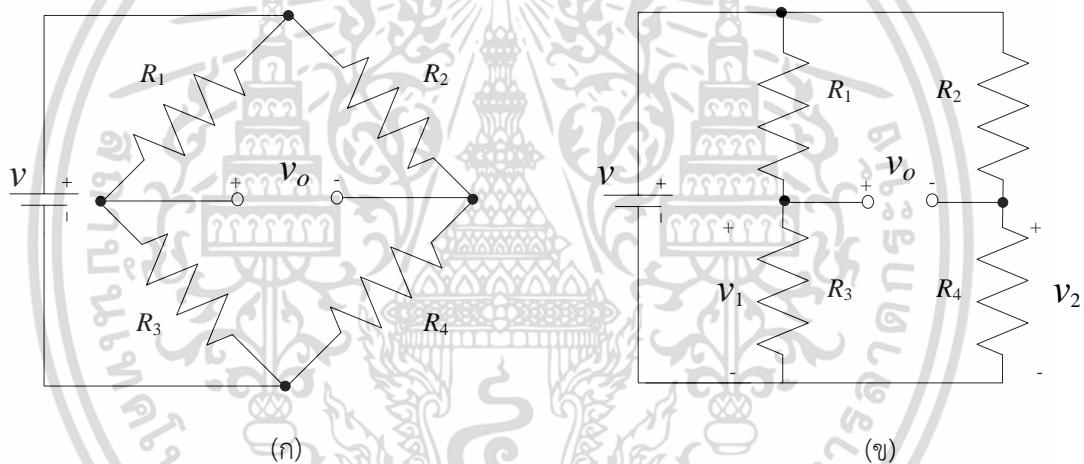
แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรจะมีค่าเป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไปตามระยะขจัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่กำลังตรวจสอบ

## 2.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทาน

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานจำพวกอาร์ทีดีและสเตรนเกจที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) และการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Commercial Transmitter)

### 2.4.1 วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน

วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน เป็นลักษณะของวงจรบริดจ์แบบหนึ่งที่นิยมมาประยุกต์ใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า ถูกคิดค้นและนำเสนอโดย ชาลส์ วีทสโตน (Charl Wheatstone) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ซึ่งในเวลาต่อมาได้รับบรรดาศักดิ์เป็น “ท่านเซอร์”



รูปที่ 2.12 วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน

(ก) วงจรบริดจ์แบบวีทสโตนพื้นฐาน (ข) วงจรบริดจ์แบบวีทสโตนพื้นฐานเมื่อนำมาเขียนให้ดูง่ายขึ้น

วงจรวีทสโตนบริดจ์มีรูปแบบวงจรไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้างและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ทำให้วงจรบริดจ์ดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ โครงสร้างของวงจรบริดจ์แบบวีทสโตนดังแสดงในรูปที่ 2.12 การพิจารณาหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรบริดจ์ในเชิงความสัมพันธ์ของตัวต้านทานทั้งสี่ในวงจร สามารถหาได้โดยอาศัยกฎแบ่งแรงดันดังนี้

$$v_o = v_1 - v_2 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $v_1$  และ  $v_2$  คือแรงดันตกคร่อม  $R_3$  และ  $R_4$  ตามลำดับเมื่อพิจารณาตัวต้านทานแบ่งแรงดัน  $R_1$  กับ  $R_3$  โดยใช้กฎแบ่งแรงดันเพื่อหาแรงดันตกคร่อม  $R_3$  หรือ  $v_1$  จะได้

$$v_1 = \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) v \quad (2.8)$$

และในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาตัวต้านทานแบ่งแรงดัน  $R_2$  กับ  $R_4$  โดยใช้กฎแบ่งแรงดันหาค่าแรงดัน  $v_2$  จะได้

$$v_2 = \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) v \quad (2.9)$$

แทนค่า  $v_1$  และ  $v_2$  ในสมการที่ (2.7) จะได้

$$v_o = \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) v - \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) v = \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) v \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.7) และ (2.10) จะเห็นว่าหาก  $v_1 = v_2$  แล้วแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวได้ว่าขณะนี้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล (Balance Bridge) และสภาวะเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของ  $R_1/R_3$  กับ  $R_2/R_4$  มีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่าหากตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่งแปรค่าไปก็จะทำให้  $v_o$  มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย จากหลักการดังกล่าวนี้จะพบว่า หากทราบค่าความต้านทานทั้งสามตัวก็จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานที่เหลืออีกตัวหนึ่งที่ไม่ทราบค่าได้ และหากค่าความต้านทานตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป เราก็จะสามารถคำนวณหาค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้เช่นกันจากสัดส่วนความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรบริดจ์ที่วัดได้

#### 2.4.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีด้วยวงจรวิทสโตนบริดจ์

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านวงจรวิทสโตนบริดจ์มีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับเซนเซอร์แต่ละชนิด ยกตัวอย่าง การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบอาร์ทีดีมีด้วยกัน 3 วิธี คือ

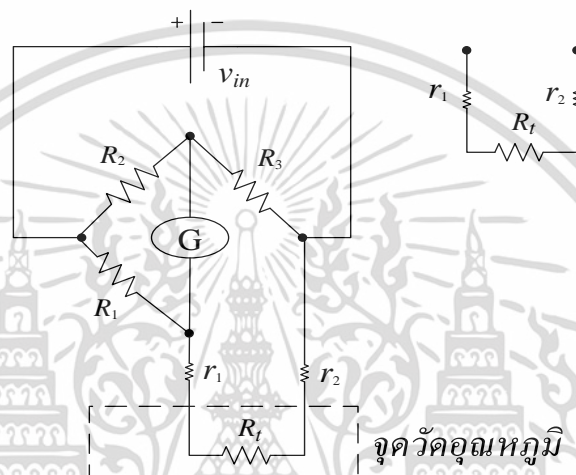
##### 2.4.2.1 การเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ 2 สาย

วงจรใช้งานพื้นฐานของอาร์ทีดี คือ Wheatstone Bridge โดย  $R_t$  คือ อาร์ทีดี ซึ่งติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ มีค่าความต้านทานอีก 3 ค่าในวงจร คือ  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ซึ่งต้องอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และเป็นความต้านทานชนิดที่มีความถูกต้องสูง จากรูปที่ 2.13 วงจรบริดจ์จะอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่ออาร์ทีดี  $R_t$  อยู่ที่  $0^\circ\text{C}$  แล้วทำให้

$$\frac{R_t}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะไม่มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิที่เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีสูงขึ้น ค่าเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีจะเพิ่มขึ้นทำให้ วงจรวีทสโตนบริดจ์ไม่สมดุลและมีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี 2 สาย เหมาะกับงานที่เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีอยู่ใกล้กับวงจรเท่านั้น ไม่เหมาะกับการที่ต้องลากสายยาว ๆ เนื่องจากจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากค่าความต้านทานสะสมของสายตัวนำ และวิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาดไป ดังนั้นการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 2 สาย จึงเหมาะกับการที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง



รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 2 สาย

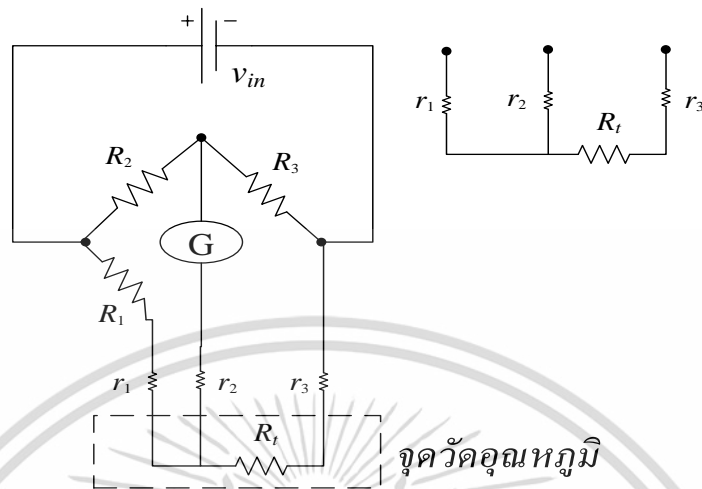
#### 2.4.2.2 การเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ 3 สาย

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 3 สาย ดังรูปที่ 2.14 เป็นที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 ที่อยู่ระหว่างจุดที่วัดกับวงจร จะต้องมีความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเพื่อให้ค่าความต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันด้วยขนาดที่เท่ากัน ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ของเซนเซอร์ความต้านทาน  $R_t$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ดังต่อไปนี้

$$\frac{R_t + r_3}{R_3} = \frac{R_1 + r_1}{R_2} \quad (2.12)$$

เนื่องจาก  $r_1$  เท่ากับ  $r_3$  เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่วัดจึงขึ้นอยู่กับเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีเพียงตัวเดียว เนื่องจากสายเส้นที่ 3 จะช่วยชดเชยความต้านทานของสายที่เกิดขึ้น ทำให้เซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี 3 สาย มีความถูกต้องสูงกว่าเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีแบบ 2 สาย ดังนั้นวิธี 3 สาย จึงเป็นการปรับปรุงจากวิธี 2 สาย ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยกระแสไฟจะไหลผ่านเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีและจะมีการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสายเส้นที่สามจะช่วยชดเชย

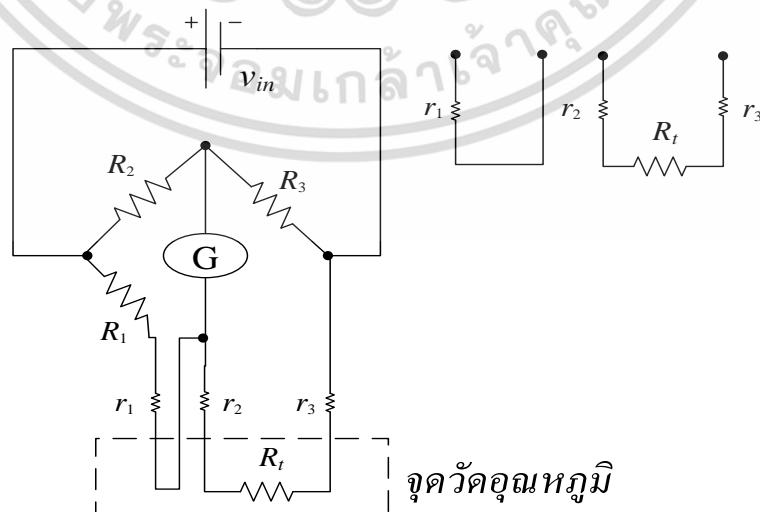
ความต้านทานของสายที่เกิดขึ้น แต่วิธีนี้ทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้น ในเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาดในการวัดดังที่กล่าวมา



รูปที่ 2.14 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 3 สาย

#### 2.4.2.3 การเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ 4 สาย

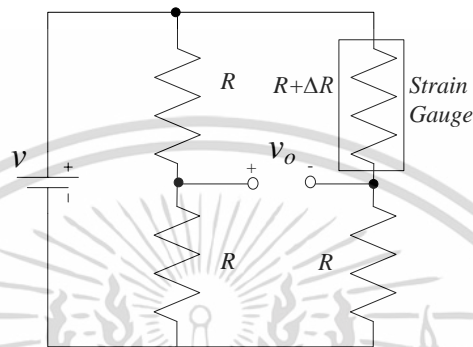
การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 4 สาย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นแบบที่มีความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องจากเลื่อนจุดต่อของวงจรวีทสโตนบริดจ์ออกไปอยู่ภายนอกทั้ง 4 จุด ดังนั้นสามารถชดเชยความต้านทานของสายตัวนำได้ทั้งหมด โดยสายทั้ง 4 ต้องมีขนาดและความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอด ดังนั้นหากนำไปวัดค่าความต้านทานของสายทั้งสองคู่ก็จะเจอสภาพแวดล้อมเหมือนกัน จึงทำให้ผลของความต้านทานของสายถูกกำจัดออกไป วิธีนี้จะช่วยกำจัดความผิดพลาดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในความต้านทานอาร์ทีดี ทำให้ค่าที่อ่านได้มีความถูกต้องสูงมากกว่าวิธี 2 สาย และ 3 สาย



รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบ 4 สาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานสเตรนเกจด้วยวงจรวีทสโตนบริดจ์

วงจรวีทสโตนบริดจ์นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดเพื่อหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า และนิยมมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุด คือนำไปตัวร่วมกับอุปกรณ์เซนเซอร์ความต้านทาน เช่น สเตรนเกจ เพื่อทำการตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ในระบบเซนเซอร์ วงจรสเตรนเกจพื้นฐาน ทำได้โดยการต่อสเตรนเกจแทนตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่งในวงจร ส่วนตัวต้านทานทั้งสามตัวให้มีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่มีสเตรนเกจพื้นฐาน

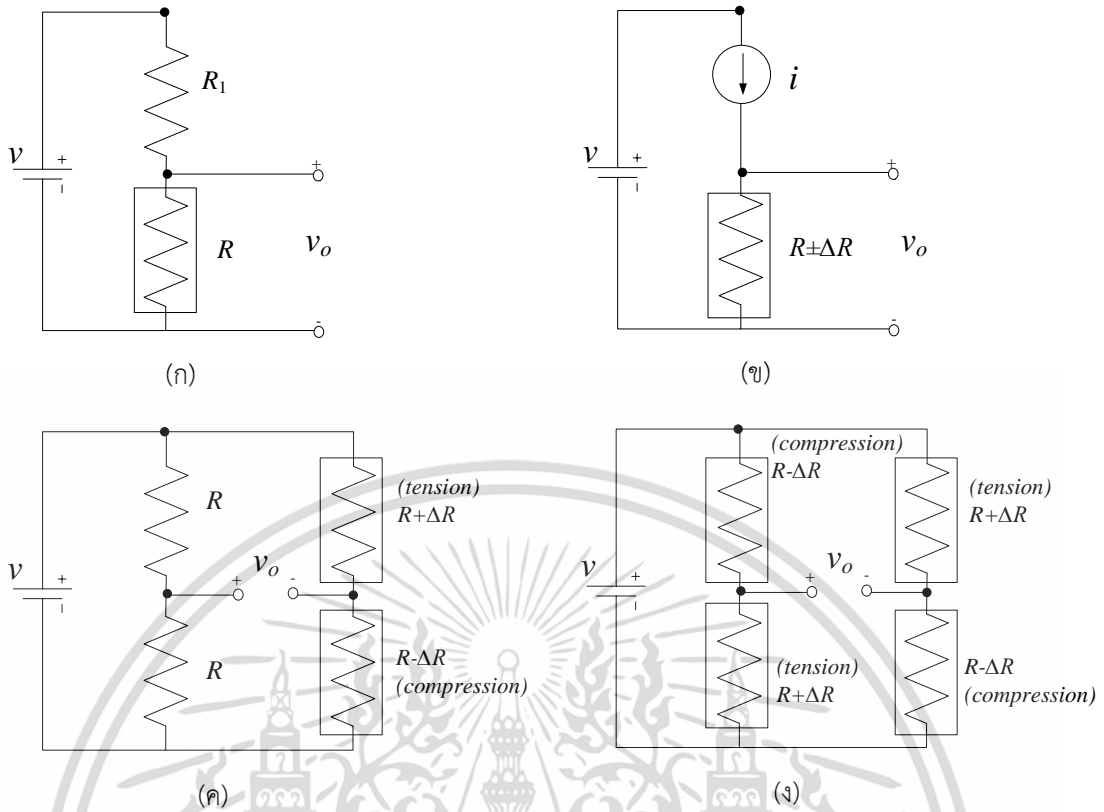
จากวงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้สเตรนเกจ ในรูปที่ 2.16 เมื่อไม่มีแรงทางกลมากระทำกับสเตรนเกจ นั่นคือ  $\Delta R = 0$  ทำให้ตัวต้านทานทั้งสี่มีค่าเท่ากัน คือเท่ากับ  $R$  และ  $v_o = 0$  แต่เมื่อมีแรงมากระทำทำให้ค่าความต้านทานในตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไปเป็น  $\Delta R$  แล้วกรณีนี้แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$v_o = \left( \frac{R}{R+R} \right) v - \left( \frac{R}{R+R+\Delta R} \right) v = \left( \frac{\Delta R}{4R+2\Delta R} \right) v \quad (2.13)$$

โดยทั่วไป  $4R \gg 2\Delta R$  ทำให้สมการ (2.13) ประมาณได้เป็น

$$v_o = \left( \frac{\Delta R}{4R} \right) v \quad (2.14)$$

จะเห็นได้ว่า  $v_o$  แปรผันไปตาม  $\Delta R$  ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับขนาดของแรงกระทำทางกลที่มากระทำ ดังนั้นนับได้ว่าวงจรสเตรนเกจในรูปที่ 2.16 เป็นลักษณะของเซนเซอร์ชนิดหนึ่งซึ่งนำมาใช้ตรวจวัดแรงกระทำทางกล สำหรับวงจรเซนเซอร์ที่ใช้สเตรนเกจในรูปแบบต่าง ๆ สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรเชื่อมต่อสเตรนเกจประเภทต่าง ๆ

- (ก) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (ข) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดกระแสคงที่
- (ค) วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้สเตรนเกจสองตัว (ง) วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้สเตรนเกจสี่ตัว

ในรูปที่ 2.17 (ก) เรียกว่า “วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit)” หรือบางครั้งอาจเรียกว่า “วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge Circuit)” หากค่าความต้านทานของสเตรนเกจมีค่าเท่ากับ  $R$  แล้วแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรซึ่งหาได้จากกฎแบ่งแรงดัน จะได้เท่ากับ

$$v_o = \left( \frac{R}{R_1 + R} \right) v \tag{2.15}$$

เมื่อวัสดุมีความเครียดขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจมีค่าเปลี่ยนไปเป็น  $\Delta R$  ดังนั้น แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็น

$$v_o = \left( \frac{R \pm \Delta R}{R_1 + R \pm \Delta R} \right) v \tag{2.16}$$

ในรูปที่ 2.17 (ข) เป็นวงจรฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ (Current Source Half Bridge) เพื่อรักษารักษาระแสให้มีค่าคงที่ ไม่ให้เปลี่ยนไปตามความต้านทานของสเตรนเกจกรณีนี้จะได้แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = i(R \pm \Delta R) \quad (2.17)$$

ในรูปที่ 2.17 (ค) เป็นวงจรบริดจ์แบบวีทสโตนที่ใช้สเตรนเกจจำนวนสองตัว ทั้งนี้เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิในการใช้งานที่มีต่อสเตรนเกจ และจะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจร  $v_o$  มีค่าเท่ากับ

$$v_o = \left( \frac{\Delta R}{2R} \right) v \quad (2.18)$$

ในรูปที่ 2.17 (ง) เป็นวงจรบริดจ์แบบวีทสโตนที่ใช้สเตรนเกจจำนวนสี่ตัว แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรในกรณีนี้จะมีค่าเป็นสองเท่าของวงจรบริดจ์ที่ใช้สเตรนเกจสองตัว ดังในรูป 2.17 (ค) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

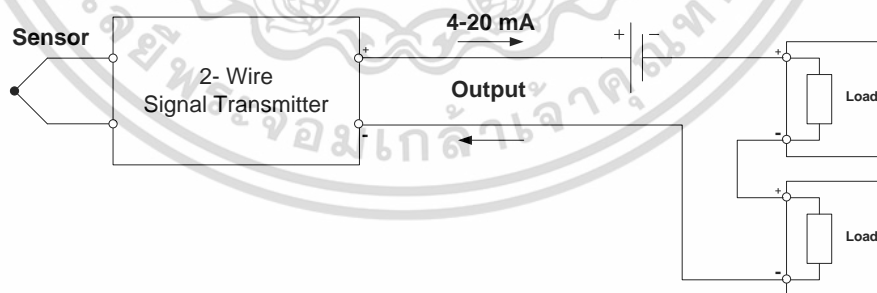
$$v_o = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) v \quad (2.19)$$

#### 2.4.4 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยทรานสมิตเตอร์

การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ คือ แบบ 2 สาย และแบบ 4 สาย ดังนี้

##### 2.4.4.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สาย

Signal Transmitter แบบนี้ดังรูปที่ 2.18 ใช้สายเพียง 2 เส้น ซึ่งสายเป็นสัญญาณ Output ของ Transmitter และเป็นสายของ Power Supply สำหรับจ่ายเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน Signal Transmitter Output Signal ของ Transmitter แบบนี้เป็นสัญญาณ 4-20 mA เท่านั้น ข้อดีของ Transmitter แบบนี้ คือประหยัดสายในการติดตั้ง

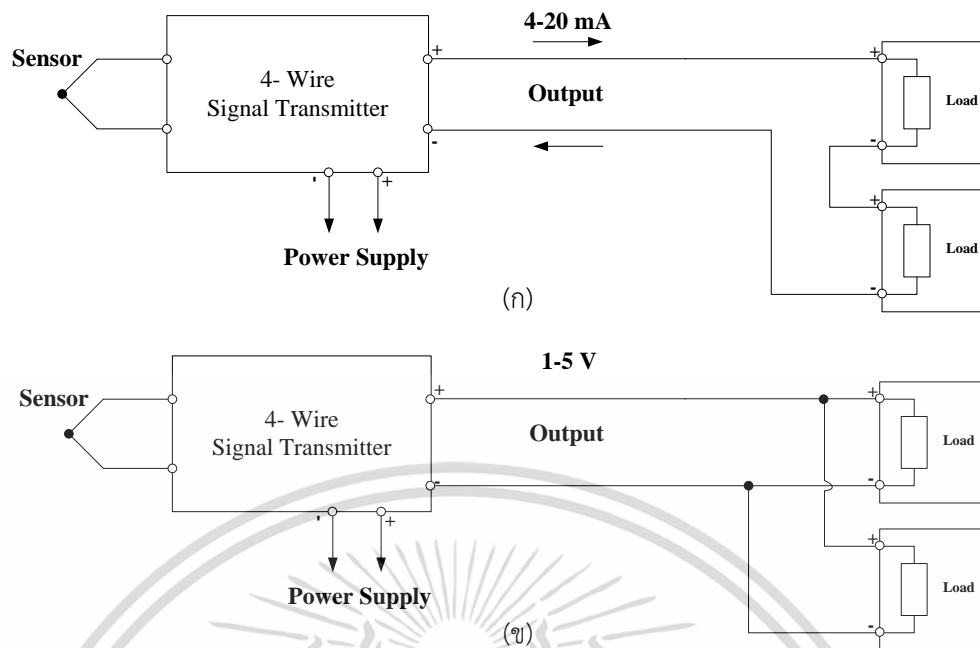


รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 2 สาย

##### 2.4.4.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานผ่านทรานสมิตเตอร์แบบ 4 สาย

Signal Transmitter แบบนี้ ใช้สายสัญญาณ 2 เส้นและสาย Power Supply อีก 2 เส้น แยกกันสัญญาณ Output ของ 4 Wire Signal Transmitter มีทั้งที่เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน และสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน สัญญาณจะแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดีผ่านทรานสมิตเตอร์ แบบ 4 สาย  
(ก) รูปสัญญาณ Output เป็นแบบกระแส (ข) รูปสัญญาณ Output เป็นแบบแรงดัน

#### 2.4.5 การเชื่อมต่อเซนเซอร์แบบโพเทนชิโอมิเตอร์ [11]

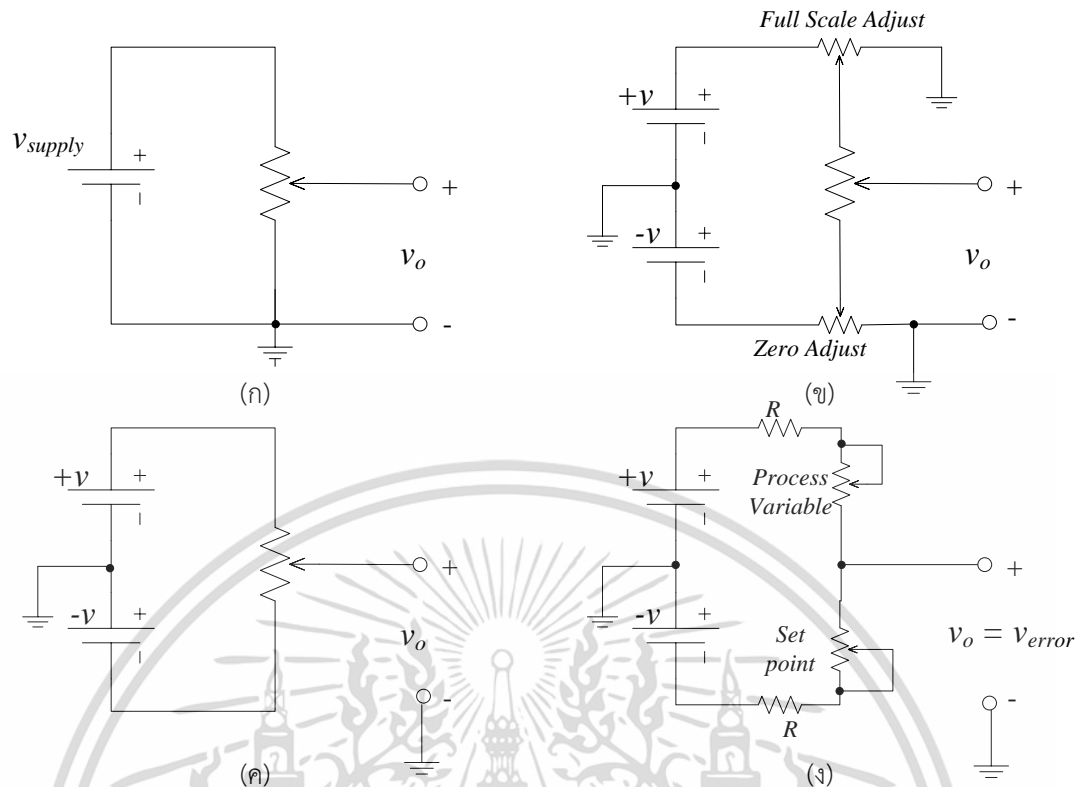
การนำโพเทนชิโอมิเตอร์ไปต่อใช้งานสามารถกระทำได้หลายลักษณะ แต่ที่นิยมใช้กันนั้นมีรูปแบบทั่วไปแสดง ดังรูปที่ 2.20 (ก) แสดงการต่อวงจรโพเทนชิโอมิเตอร์ไปใช้งานแบบพื้นฐานที่สุดสังเกตได้ว่า หากตำแหน่งหน้าสัมผัสหรือไวเปอร์ของโพเทนชิโอมิเตอร์อยู่ตำแหน่งต่ำสุด แล้วแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ 0 V และถ้าหากไวเปอร์ของโพเทนชิโอมิเตอร์เลื่อนขึ้นไปอยู่ตำแหน่งสูงสุด จะทำให้

$$v_o = v_{supply} \quad (2.20)$$

รูปที่ 2.20 (ข) แสดงการต่อวงจรโพเทนชิโอมิเตอร์ใช้งาน โดยเพิ่มส่วนการปรับตำแหน่งขนาดเต็มสเกล (Full-Scale Adjust) และตำแหน่งศูนย์ (Zero Adjust) ของขนาดแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรเข้าไปด้วย

รูปที่ 2.20 (ค) เป็นวงจรการใช้งานโพเทนชิโอมิเตอร์ที่มีแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรที่เป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 V เมื่อตำแหน่งไวเปอร์อยู่ตรงกึ่งกลางความยาวของโพเทนชิโอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การเชื่อมต่อเซนเซอร์แบบโพเทนชิโอมิเตอร์  
 (ก) วงจรพื้นฐาน (ข) แบบปรับค่าได้ (ค) แบบสองทิศทาง  
 (ง) แบบสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเอาต์พุต ( $v_o = v_{sp} - v_{pv}$ )

รูปที่ 2.20 (ง) แสดงถึงลักษณะการต่อวงจรของโพเทนชิโอมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบค่าที่ตั้งไว้ (Set Point,  $v_{sp}$ ) กับค่าสภาพของกระบวนการ (Process Variable,  $v_{pv}$ ) ที่ทำการวัด เพื่อสร้างเป็นสัญญาณความคลาดเคลื่อน (Error Signal,  $v_{error}$ ) ป้อนให้กับอุปกรณ์ควบคุม (Controller) ทำการสร้างสัญญาณควบคุมให้กับระบบควบคุมค่ากระบวนการต่อไป ซึ่งแรงดันเอาต์พุตของวงจรในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับ

$$v_o = v_{error} = v_{sp} - v_{pv} \quad (2.21)$$

ดังนั้น การนำโพเทนชิโอมิเตอร์ไปใช้งานส่วนใหญ่แล้วจึงต้องเป็นลักษณะงานที่ต้องการตรวจสอบระยะขจัดและให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรอกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทั่วไปแล้วจะสามารถพบเห็นโพเทนชิโอมิเตอร์ในการประยุกต์ใช้งานหลาย ๆ ประเภท อาทิเช่น การนำไปตรวจสอบตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ในสายการผลิต หรือการตรวจสอบขนาดของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการควบคุมคุณภาพ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงเซนเซอร์ความต้านทานชนิดต่าง ๆ ทั้งแบบเชิงเดี่ยวและแบบแตกต่าง รวมทั้งได้นำเสนอถึงวิธีการเชื่อมต่อเซนเซอร์โดยใช้วงจรวิสตโรนบริดจ์ และแบบที่เชื่อมต่อโดยใช้ทรานสมิตเตอร์ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการเชื่อมต่อเซนเซอร์แบบโพเทนซิโอมิเตอร์อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# หลักการเกี่ยวกับวงจรย่อยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

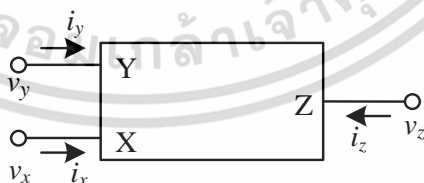
### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเกี่ยวกับวงจรย่อยที่ใช้ในการออกแบบวงจรในงานวิจัยฉบับนี้ เช่น วงจรสายพานกระแส วงจรออปแอมป์พื้นฐาน วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับวงจรออปแอมป์ (Operational Conveyor) [5] เพื่อชดเชยผลกระทบจากค่าความต้านทาน  $R_x$  ของวงจรสายพานกระแส และปรับเปลี่ยนช่วงปฏิบัติงานให้ได้ความเหมาะสมกับระดับสัญญาณอินพุตที่เข้ามา โดยสามารถหาอุปกรณ์ตามท้องตลาดทั่วไป

### 3.2 วงจรย่อยที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรสำหรับเทคนิคที่นำเสนอ

#### 3.2.1 วงจรสายพานรุ่นที่ 2

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) จัดเป็นอุปกรณ์ Active Building block ที่มี 3 พอร์ตดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เพราะวงจรมีคุณสมบัติที่สามารถใช้ในการประมวลสัญญาณได้ทั้งโหมดแรงดัน (Voltage Mode) และ โหมดกระแส (Current Mode) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบวงจรต่าง ๆ ได้อีกมากมาย เช่น วงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) วงจรฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทั่วไป วงจรรองควมถึ และวงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสในยุคต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสายพานกระแสในยุคที่หนึ่ง (The First-Generation Current Conveyor หรือ CCI) วงจรสายพานกระแสในยุคที่สอง (Second Generation Current Conveyor หรือ CCII) และวงจรสายพานกระแสในยุคที่สาม (Third Generation Current Conveyor หรือ CCIII) โดยเนื้อหาที่จะนำเสนอเพื่อทำวิทยานิพนธ์ในที่นี่จะใช้วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII) เนื่องจากได้มีการผลิตออกมาใช้งานจริงในรูปแบบของวงจรรวมแล้ว



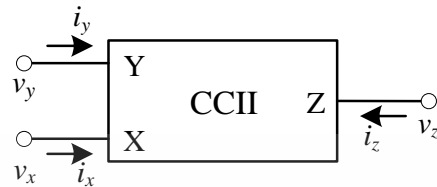
รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส

ในปี ค.ศ. 1970 A. Sedra และ K.C. Smith [12] ได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสโดยทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ทางด้านอินพุตที่พอร์ต Y ให้มีค่าสูงขึ้นจากวงจรสายพานรุ่นหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ Active Building Block แบบ 3 พอร์ตที่ถูกออกแบบให้สามารถรับอินพุตที่เป็นทั้งกระแสและแรงดันได้ โดยทั่วไปนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูปที่ 3.2 โดยที่พอร์ต Y มีค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดัน ส่วนพอร์ต X มีค่าความต้านทานอินพุตต่ำเหมาะสำหรับอินพุตที่เป็นสัญญาณกระแสและที่พอร์ต Z มีค่าความต้านทานเอาต์พุตสูงมากซึ่งให้อาต์พุตที่เป็นสัญญาณกระแสคุณสมบัติทางอุดมคติของ CCII ที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่งสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII)

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

จากสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$i_y = 0 \quad (3.2)$$

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

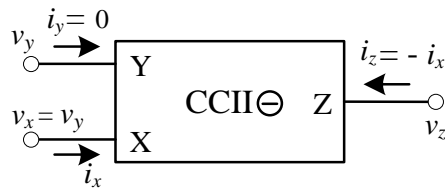
$$i_z = \pm i_x \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.2) จะเห็นว่าค่ากระแส  $i_y$  ที่ไหลเข้าพอร์ต Y มีค่าเป็น 0 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ต Y นั้นจะต้องมีค่าสูงมาก ๆ จากสมการที่ (3.3) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน  $v_z$  ที่พอร์ต X กับแรงดัน  $v_y$  ที่พอร์ต Y มีค่าเท่ากัน และสมการที่ (3.4) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  ที่พอร์ต X เป็น  $i_z = \pm i_x$  กรณี  $i_z = i_x$  กระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  ที่พอร์ต X มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCII+)” กรณี  $i_z = -i_x$  กระแส  $i_z$  ที่พอร์ต Z และกระแส  $i_x$  ที่พอร์ต X มีทิศทางการไหลตรงกันข้ามเรียกว่า “วงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCII-)”



รูปที่ 3.3 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองชนิดบวก (CCII+)

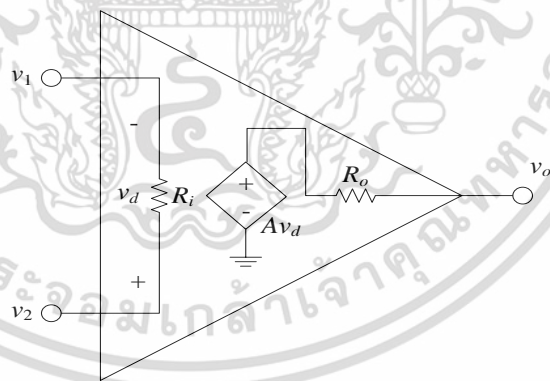
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 สัญลักษณ์ของวงจรรายพานกระแสรุ่นที่สองชนิดลบ (CCII-)

### 3.2.2 ออปแอมป์ [13]

ออปแอมป์ (Opamp) ซึ่งเรียกย่อ ๆ มาจากคำว่า “Operational Amplifier” เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดวางอุปกรณ์ภายในอย่างซับซ้อนอันประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ และไดโอด เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงออปแอมป์ในลักษณะของบล็อกของวงจรและการต่อขั้วภายนอกเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้น ในการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์และใช้งานในทางปฏิบัติเท่านั้น ออปแอมป์อาจพิจารณาได้ว่าเป็นวงจรรขยายแรงดันที่มีอัตราขยายสูงมาก ๆ หรือมองว่าเป็นหน่วยทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพฤติกรรมเหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบใช้แรงดันควบคุม (Voltage Controlled Voltage Source) และนอกจากสามารถใช้ทำเป็นแหล่งจ่ายแบบแรงดันควบคุมหรือกระแสควบคุมได้แล้ว ยังใช้รวมสัญญาณขยายสัญญาณอินทิเกรต หรือหาค่าอนุพันธ์ของสัญญาณได้ด้วยความสามารถในการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจึงทำให้ถูกเรียกว่าออปแอมป์ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับสัญญาณได้หลากหลาย และเมื่อพิจารณาถึงวงจรภายในออปแอมป์ ในสภาวะทางอุดมคติ (Ideal) จะประกอบไปด้วยวงจรมุมูล ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลภายในออปแอมป์ในสภาวะทางอุดมคติ

จากรูปที่ 3.5 วงจรสมมูลภายในออปแอมป์ ในสภาวะทางอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.5)

$$v_o = Av_d = A(v_2 - v_1) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

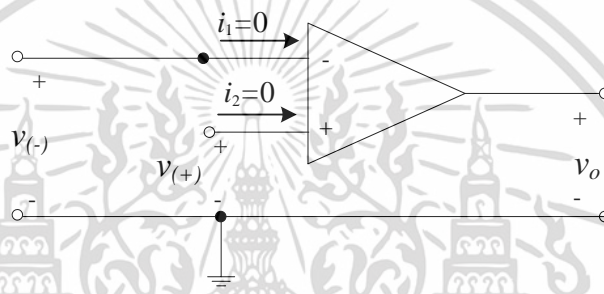
ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดัน จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีแรงดันตกคร่อมที่  $R_i$  ซึ่งจะเกิดขึ้นจากแรงดันอินพุต  $v_1$  และ  $v_2$  นั้นเอง โดยปกติและง่ายในการวิเคราะห์วงจรออปแอมป์ จะให้คุณลักษณะทางอุดมคติในการวิเคราะห์ห้อปแอมป์ทางอุดมคติ คือจะกำหนดให้อัตราขยายลูปเปิด  $A$  มีค่าอนันต์ ความต้านทานอินพุตมีค่าเป็นอนันต์ และความต้านทานเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ คือ

$$A \cong \infty \tag{3.6}$$

$$R_i \cong \infty \tag{3.7}$$

$$R_o \cong 0 \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (3.6) – (3.8) สามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรออปแอมป์ทางอุดมคติ

ดังนั้นจากรูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางด้านอินพุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i_1 = 0 \tag{3.9}$$

$$i_2 = 0 \tag{3.10}$$

$$i_1 = i_2 \tag{3.11}$$

และแรงดันที่ขาบวกและขาลบจะมีค่าเท่ากัน

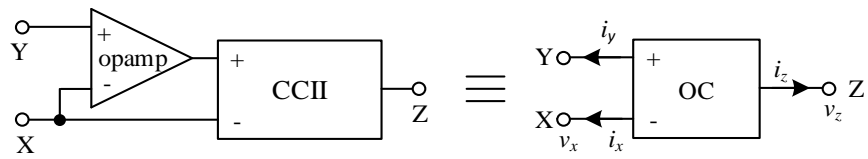
$$v_{(+)} = v_{(-)} \tag{3.12}$$

จากรูปที่ 3.6 และสมการที่ (3.9) – (3.12) ทำให้เริ่มคำนวณง่ายขึ้นจากวงจรสมมูลออปแอมป์ทางอุดมคติ และเราสามารถหาสมการของแรงดันอินพุต และเอาต์พุตได้จากทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Laws : KCL) มาช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของแต่ละวงจร

### 3.2.3 วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับออปแอมป์

วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์หรือที่เรียกว่า “Operational Conveyor” (OC) [5] โดยขาอินพุตทั้งสองของวงจรสายพานกระแสต่อในส่วนป้อนกลับแบบลบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์แก้ไขเนื้อหาบทความนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์ เพื่อชดเชยผลกระทบจากค่าความต้านทาน  $R_x$  ของวงจรสายพานกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรย่อยที่ใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์

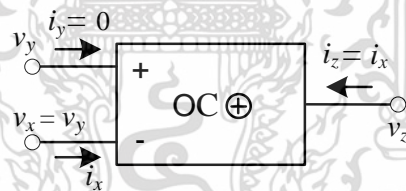
คุณสมบัติของวงจรย่อย OC คือ

$$i_y = 0 \tag{3.13}$$

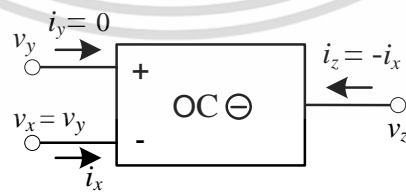
$$v_x = v_y \tag{3.14}$$

$$i_z = \pm \alpha_c i_x \tag{3.15}$$

เมื่อ  $\alpha_c = (1 - \epsilon_c)$  คือ อัตราการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z โดยที่  $\epsilon_c$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z และ  $\pm$  เป็นเครื่องหมายที่แสดงถึงชนิดของวงจรย่อย OC แบบบวก (OC+) และวงจรย่อย OC แบบลบ (OC-) ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์ของวงจร Operational Conveyor ชนิดบวก (OC+)



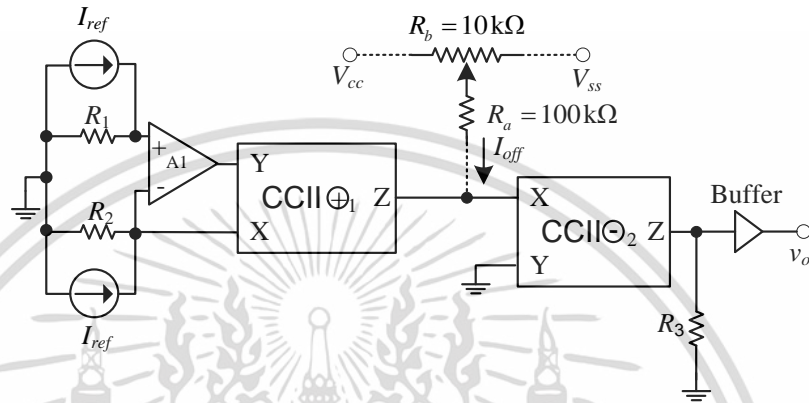
รูปที่ 3.9 สัญลักษณ์ของวงจร Operational Conveyor ชนิดลบ (OC-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์งานวิจัยที่เคยเสนอในอดีตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.3.1 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [3]

ในปี 2010 ได้มีการนำเสนอวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [3] โดยใช้วงจรสายพานกระแสร่นที่สองชนิดลบและสายพานกระแสร่นที่สองชนิดบวกต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความต้านทาน  $R_x$  โดยได้มีการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้  $R_a$  และ  $R_b$  เพื่อปรับแต่งวงจรให้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [3]

จากวงจรเมื่อพิจารณากระแสด้านเอาต์พุตจะได้

$$i_o = (1 - \varepsilon_{ip})(1 - \varepsilon_{in}) \left( \frac{(R_1 - R_2)I_{ref} - v_{off,opamp}}{R_2} \right) \quad (3.16)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{ip}$  และ  $\varepsilon_{in}$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสของวงจรสายพานกระแสตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ,  $v_{off,opamp}$  คือแรงดันออฟเซตของออปแอมป์,  $I_{off}$  คือ ค่าชดเชยกระแสด้านอินพุตของวงจรสายพานกระแสตัวที่ 2 และเมื่อค่า  $R_x$  มีค่าความต้านทานสูงมาก ๆ และทำการปรับค่าแรงดันชดเชยให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ทำให้  $v_{off,opamp}$  มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ได้สมการใหม่คือ

$$i_o = (1 - \varepsilon_{ip})(1 - \varepsilon_{in}) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_2} \right) I_{ref} \quad (3.17)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตของวงจร คือ

$$v_o = R_3 i_o \quad (3.18)$$

นำเอาสมการที่ (3.17) และ สมการที่ (3.18) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = (1 - \varepsilon_{ip})(1 - \varepsilon_{in}) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_2} \right) R_3 I_{ref} \quad (3.19)$$

$\varepsilon_{ip}$  และ  $\varepsilon_{in}$  สามารถทำการปรับชดเชยด้วยตัวต้านทานด้านเอาต์พุต  $R_3$  จะทำให้ได้สมการใหม่หลังจากการปรับชดเชยคือ

$$v_o = \left( \frac{R_1 - R_2}{R_2} \right) R_3 I_{ref} \quad (3.20)$$

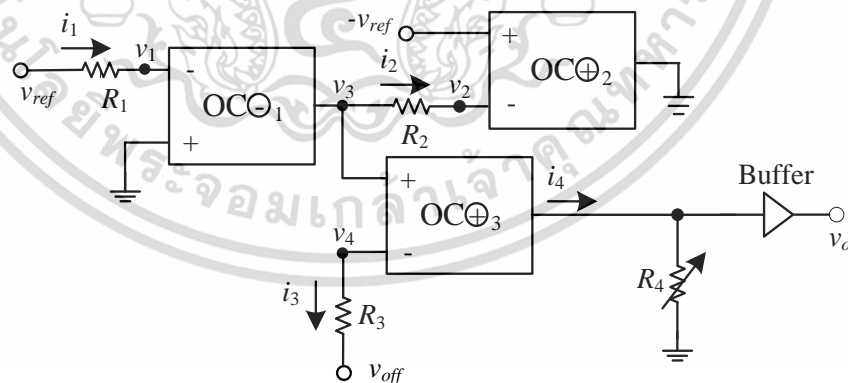
เมื่อ  $I_{ref}$  คือ ค่ากระแสอ้างอิง ถ้า  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$ ,  $R_2 = R_0$  จะได้ค่าเอาต์พุต  $v_o$  ของวงจรคือ

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) R_3 I_{ref} \quad (3.21)$$

จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R/R_0$  (Resistance Variation Ratio) โดยวงจรดังกล่าวมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำแต่น่าเสียดายวงจรดังกล่าวจะต้องใช้แรงจ่ายกระแสอ้างอิงถึง 2 ตัว ไม่สะดวกในการนำไปต่อใช้งานจริง

### 3.3.2 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์

เมื่อเร็ว ๆ นี้ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ [4] ทั้งหมด 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [4]

พิจารณาแบบไม่เป็นอุดมคติ จะได้ว่า

เมื่อ  $v_1 = v_{off, opamp}$  จะได้ความสัมพันธ์ของสมการ  $i_1$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_1 = \frac{k(v_{ref} - v_{off,opamp})}{(1+k)R_1 + R_x} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $v_2 = -v_{ref} + v_{off,opamp}$  จะได้ความสัมพันธ์ของสมการ  $i_2$  คือ

$$i_2 = \frac{k(v_3 - v_2)}{(1+k)R_2 + R_x} \quad (3.23)$$

นำเอา  $v_2$  แทนในสมการที่ (3.23)

$$i_2 = \frac{k(v_3 + v_{ref} - v_{off,opamp})}{(1+k)R_2 + R_x} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $i_2 = (1 - \varepsilon_{cn})i_1$  นำ  $i_1$  เข้าไปแทนในสมการจะได้

$$\frac{k(v_3 + v_{ref} - v_{off,opamp})}{(1+k)R_2 + R_x} = (1 - \varepsilon_{cn}) \frac{k(v_{ref} - v_{off,opamp})}{(1+k)R_1 + R_x} \quad (3.25)$$

$$v_3 = (1 - \varepsilon_{cn}) \frac{(1+k)R_2 + R_x}{(1+k)R_1 + R_x} v_{ref} - v_{ref} - (1 - \varepsilon_{cn}) \frac{(1+k)R_2 + R_x}{(1+k)R_1 + R_x} v_{off,opamp} + v_{off,opamp} \quad (3.26)$$

จัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย จะได้  $v_3$  ดังนี้

$$v_3 = \left[ \frac{(1 - \varepsilon_{cn})[(1+k)R_2 + R_x] - [(1+k)R_1 + R_x]}{(1+k)R_1 + R_x} \right] (v_{ref} - v_{off,opamp}) \quad (3.27)$$

เมื่อ  $v_4 = v_3$  จะได้  $i_3$  เท่ากับ

$$i_3 = \frac{k(v_4 - v_{off})}{(1+k)R_3 + R_x} = \frac{kv_4}{(1+k)R_3 + R_x} - \frac{kv_{off}}{(1+k)R_3 + R_x} \quad (3.28)$$

พิจารณาที่  $i_4$  เมื่อ  $i_4 = (1 - \varepsilon_{cp})i_3$  นำ  $i_3$  เข้าไปแทนในสมการจะได้

$$i_4 = \frac{(1 - \varepsilon_{cp})kv_4}{(1+k)R_3 + R_x} - \frac{(1 - \varepsilon_{cp})kv_{off}}{(1+k)R_3 + R_x} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเอา  $v_3$  ไปแทน  $v_4$  ในสมการที่ (3.29)

$$i_4 = \frac{(1-\varepsilon_{cp})k}{(1+k)R_3 + R_x} \left[ \frac{(1-\varepsilon_{cn})[(1+k)R_2 + R_x] - [(1+k)R_1 + R_x]}{(1+k)R_1 + R_x} \right] (v_{ref} - v_{off,opamp}) - \frac{(1-\varepsilon_{cp})kv_{off}}{(1+k)R_3 + R_x} \quad (3.30)$$

จัดรูปแบบสมการ จะได้  $i_4$  ดังนี้

$$i_4 = \frac{(1-\varepsilon_{cp})k}{(1+k)R_3 + R_x} \left[ \frac{(1-\varepsilon_{cn})[(1+k)R_2 + R_x]}{(1+k)R_1 + R_x} - 1 \right] v_{ref} - \frac{(1-\varepsilon_{cp})k}{(1+k)R_3 + R_x} \left[ \frac{(1-\varepsilon_{cn})[(1+k)R_2 + R_x]}{(1+k)R_1 + R_x} - 1 \right] v_{off,opamp} - \frac{(1-\varepsilon_{cp})kv_{off}}{(1+k)R_3 + R_x} \quad (3.31)$$

พิจารณาด้านเอาต์พุตของวงจรเมื่อ

$$v_o = R_4 i_4 \quad (3.32)$$

นำ  $i_4$  แทนในสมการที่ (3.32) จะได้

$$v_o = \frac{(1-\varepsilon_{cp})kR_4}{(1+k)R_3 + R_x} \left( (1-\varepsilon_{cn}) \frac{(1+k)R_2 + R_x}{(1+k)R_1 + R_x} - 1 \right) v_{ref} - \frac{(1-\varepsilon_{cp})kR_4}{(1+k)R_3 + R_x} \left( (1-\varepsilon_{cn}) \frac{(1+k)R_2 + R_x}{(1+k)R_1 + R_x} v_{off,opamp} + v_{off} \right) \quad (3.33)$$

เมื่อ  $k$  และ  $v_{off,opamp}$  คืออัตราขยายสำหรับสัญญาณความถี่ต่ำ และแรงดันชดเชยของออปแอมป์ตามลำดับ และ  $\varepsilon_{cp}, \varepsilon_{cn}$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสของวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ ชนิดบวกและชนิดลบตามลำดับ ถ้าให้  $R_x = 50 \text{ k}\Omega$  และ  $k = 10^5$  สมการดังนี้

$$v_o = (1-\varepsilon_{cp}) \frac{R_4}{R_3} \left( (1-\varepsilon_{cn}) \frac{R_2}{R_1} - 1 \right) v_{ref} - \left( (1-\varepsilon_{cn}) \frac{R_2}{R_1} v_{off}^{op} + v_{off} \right) \quad (3.34)$$

เมื่อค่า  $R_x$  มีค่าความต้านทานสูงมาก ๆ และทำการปรับค่าแรงดันชดเชยให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จะทำให้ได้สมการเอาต์พุต ดังนี้

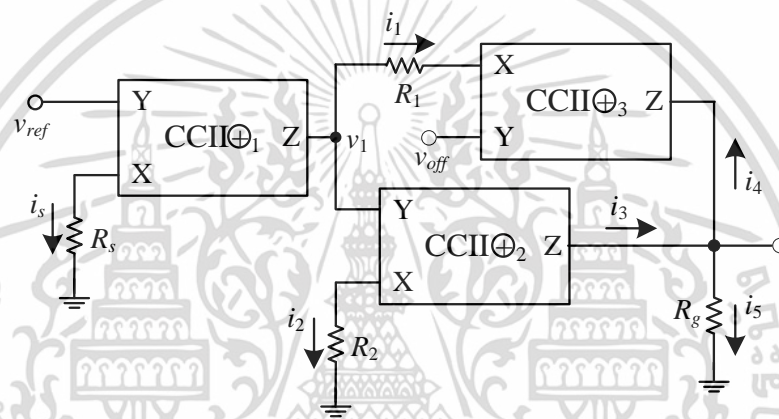
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = (1 - \varepsilon_{cp}) \frac{R_4}{R_3} \left( (1 - \varepsilon_{cn}) \frac{R_2}{R_1} - 1 \right) v_{ref} \quad (3.35)$$

จากรูปที่ 3.11 จากผลงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นว่าวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์จะต้องใช้แรงดันอ้างอิงถึงสองตัวและต้องมีค่าแรงดันที่เท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้ามกันทำให้ยากต่อการนำไปใช้งาน ถึงแม้่วงจรดังกล่าวจะมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ

### 3.3.3 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส

วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส [6] รุ่นที่สอง ทั้งหมด 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส [6]

เมื่อ  $v_{ref}$  คือ ค่าแรงดันอ้างอิง และ  $R_1$  คือ เซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว ถ้า  $v_{off} = 0$  V,  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$ ,  $R_2 = R_0$  และ  $x = \Delta R/R_0$  (Resistance Variation Ratio) เมื่อพิจารณาทางอุดมคติ

พิจารณาที่ CCII ตัวที่ 1

$$i_s = \frac{v_{ref}}{R_s} = i_1 = i_4 \quad (3.36)$$

จะได้แรงดันที่ Node  $v_1$  เท่ากับ

$$v_1 = R_1 i_1 \quad (3.37)$$

นำ  $i_1$  ในสมการที่ (3.36) ไปแทนในสมการที่ (3.37) จะได้

$$v_1 = \frac{R_1}{R_s} v_{ref} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ CCII ตัวที่ 2

$$i_3 = i_2 = \frac{v_1}{R_2} \quad (3.39)$$

พิจารณากระแสด้านเอาต์พุต จะได้

$$i_5 = i_3 - i_4 \quad (3.40)$$

นำเอา  $i_3$  และ  $i_4$  ไปแทนสมการที่ (3.40)

$$i_5 = \frac{v_{ref}}{R_s} \left( \frac{R_1 - R_2}{R_2} \right) \quad (3.41)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันด้านเอาต์พุต จะได้

$$v_o = R_g i_5 \quad (3.42)$$

นำ  $i_5$  ในสมการที่ (3.41) ไปแทนในสมการที่ (3.42) จะได้เอาต์พุตในทางอุดมคติคือ

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} = (\pm x) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} \quad (3.43)$$

พิจารณาแบบไม่เป็นตามอุดมคติ จะมี  $R_x$ ,  $\varepsilon_i$  และ  $v_{off,cc}$  เข้ามาพิจารณาด้วย

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 1

$$i_s = \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \quad (3.44)$$

$$i_1 = (1 - \varepsilon_i) i_s \quad (3.45)$$

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 3

$$i_4 = (1 - \varepsilon_i) i_1 \quad (3.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ  $i_1$  ในสมการ (3.45) แทนในสมการ (3.46) จะได้

$$i_4 = (1 - \varepsilon_i)^2 i_s \quad (3.47)$$

พิจารณาที่ Node  $v_1$

$$v_1 = i_1(R_1 + R_x) + v_{off} + v_{off,cc} \quad (3.48)$$

นำ  $i_1$  ในสมการ (3.45) แทนในสมการ (3.48) จะได้

$$v_1 = (1 - \varepsilon_i)(R_1 + R_x)i_s + v_{off} + v_{off,cc} \quad (3.49)$$

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 2

$$i_2 = \frac{v_1}{R_2 + R_x} \quad (3.50)$$

$$i_3 = (1 - \varepsilon_i)i_2 \quad (3.51)$$

นำ  $i_2$  ในสมการ (3.50) แทนในสมการ (3.51) จะได้

$$i_3 = \frac{v_1}{R_2 + R_x} (1 - \varepsilon_i) \quad (3.52)$$

พิจารณาด้านเอาต์พุตที่ Node  $v_o$

$$i_5 = i_3 - i_4 \quad (3.53)$$

$$v_o = R_g i_5 \quad (3.54)$$

และเมื่อนำ  $i_3$  กับ  $i_4$  ในสมการที่ (3.52) และ (3.47) แทนในสมการที่ (3.53) จะได้

$$\begin{aligned} i_5 &= (1 - \varepsilon_i) \frac{v_1}{R_2 + R_x} - (1 - \varepsilon_i)^2 \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \\ &= \frac{(1 - \varepsilon_i)^2 v_{ref}}{R_s + R_x} \left[ \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right] + \frac{(1 - \varepsilon_i)(v_{off} + v_{off,cc})}{R_2 + R_x} \end{aligned} \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรรายพานกระแส จะได้ว่า

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right) \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)^2}{R_s + R_x} v_{ref} + \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)}{R_0 + R_x} (v_{off} + v_{off,cc}) \quad (3.56)$$

เมื่อ  $R_x$  และ  $v_{off,cc}$  คือ ค่าความต้านทานแฝงที่พอร์ต X และค่าแรงดันออฟเซต (Offset Voltage) ที่พอร์ต X ในกรณีที่  $v_y = 0$  ของวงจรรายพานกระแส ตามลำดับ จากสมการที่ (3.56) พบว่า ค่าแรงดันออฟเซต  $v_{off,cc}$  สามารถชดเชยได้ด้วยการป้อนค่าแรงดันจากภายนอก  $v_{off}$  ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ที่ได้ภายหลังการชดเชยค่าออฟเซต คือ

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right) \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)^2}{R_s + R_x} v_{ref} \quad (3.57)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.39) ในกรณีที่ใช้อิซิปสำเร็จรูป AD844 ซึ่งมีค่า  $R_x$  ประมาณ 50  $\Omega$  มาสร้างเป็นวงจรรายพานกระแส ถ้ากำหนดให้  $v_{ref} = 5$  V,  $R_s = 5$  k $\Omega$ ,  $R_g = 10$  k $\Omega$ ,  $R_0 = 100$   $\Omega$ ,  $\Delta R = 5$   $\Omega$ ,  $R_x = 50$   $\Omega$ , และ  $\varepsilon_i = 0.01$  จะได้

$$\begin{aligned} v_o &= \left( \frac{5\Omega}{100\Omega + 50\Omega} \right) \left( \frac{10k\Omega (1 - 0.01)^2 (5)}{5k\Omega + 50\Omega} \right) \\ &= 0.32346 \text{ V} \end{aligned}$$

หาค่าแรงดันเอาต์พุตในอุดมคติจากสมการที่ (3.43) โดยการกำหนดค่า  $v_{ref}$  โดยใช้เงื่อนไข

$$\frac{v_{ref}}{R_s} = 1\text{mA}$$

$$\begin{aligned} v_o &= \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} \\ &= \left( \frac{5\Omega}{100} \right) (10k\Omega)(1\text{mA}) \\ &= 0.5\text{V} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ

$$Error = \left( \frac{v_o - Ideal}{Ideal} \right) * 100\% \quad (3.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left( \frac{0.32346 - 0.5}{0.5} \right) * 100\%$$

$$= \pm 35.308 \%$$

### 3.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอหลักการดำเนินงานของและผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวงจรสายพานกระแส วงจรออปแอมป์ วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับวงจรออปแอมป์ ซึ่งวงจรเหล่านี้เป็นกลุ่มวงจรย่อยของวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ โดยแนวทางการออกแบบและหลักการการออกแบบจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

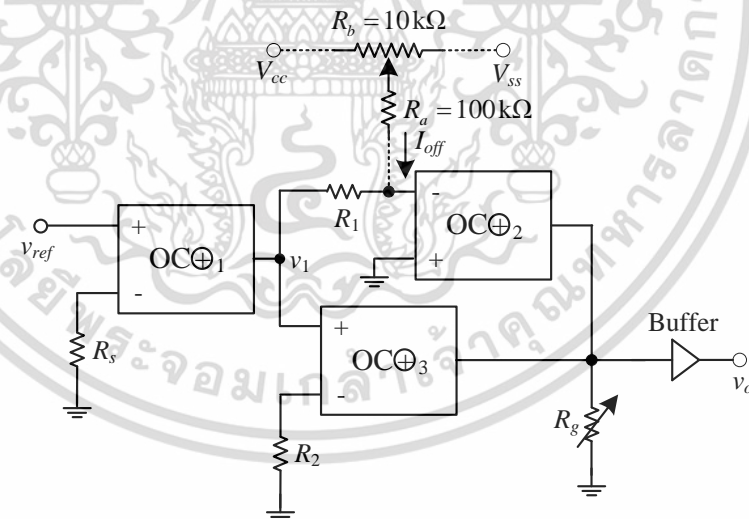
## เทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

### 4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว โดยใช้กลุ่มของวงจรย่อยที่นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจะใช้วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับวงจรออปแอมป์ หรือ Operational Conveyor ชนิดบวกทั้งหมดสามชุด เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของวงจรให้ดีขึ้น โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปที่ทำซื้อได้ในท้องตลาดมาใช้สังเคราะห์วงจรสำหรับเทคนิคที่นำเสนอ และเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และการทดลองจากการต่อวงจรจริง เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงาน

### 4.2 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอและการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจร

เพื่อลดข้อจำกัดอันเนื่องมาจากค่าความต้านทาน  $R_x$  ของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานดังรูปที่ 3.12 ที่ใช้วงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียว ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเอาวงจรย่อย Operational Conveyor มาใช้แทนวงจรสายพานกระแสทั้งสามชุด เพื่อพัฒนาเป็นวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นสำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ได้มีการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้  $R_a$  และ  $R_b$  เพื่อปรับแต่งวงจรให้อยู่ในสภาวะสมดุล



รูปที่ 4.1 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ

และใช้ประโยชน์จากไอซีสำเร็จรูป AD844 ที่มีส่วนบัฟเฟอร์แรงดันเอาต์พุตอยู่ภายใน จึงไม่จำเป็นต้องต่อวงจรบัฟเฟอร์เพิ่มที่ภาคเอาต์พุต เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติของวงจร เมื่อ  $R_x$  ค่าความต้านทานแฝง  $\epsilon_c$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z  $k$  คืออัตราขยายสัญญาณของออปแอมป์  $v_{off,op}$  คือค่าแรงดันออฟเซตของออปแอมป์ ในรูปที่ 4.1 จะ

ได้ว่า  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ OC ตัวที่ 1

$$i_s = \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \quad (4.1)$$

$$i_1 = (1 - \varepsilon_c) i_s \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาที่ OC ตัวที่ 2

$$i_{x3} = i_1 + I_{off} \quad (4.3)$$

$$i_4 = (1 - \varepsilon_c) i_{x3} \quad (4.4)$$

นำสมการ (4.2) แทนในสมการ (4.3) จะได้

$$i_{x3} = (1 - \varepsilon_c) i_s + I_{off} \quad (4.5)$$

นำสมการ (4.5) แทนในสมการ (4.4) จะได้

$$i_4 = (1 - \varepsilon_c)^2 i_s + (1 - \varepsilon_c) I_{off} \quad (4.6)$$

เมื่อพิจารณาที่ Node  $v_1$  จะได้ว่า

$$v_1 = i_1 R_1 + v_{x3} \quad (4.7)$$

นำ  $i_1$  ในสมการ (4.2) แทนในสมการ (4.7) และเมื่อ  $v_{x3} = v_{off,op}$  จะได้สมการ

$$v_1 = (1 - \varepsilon_c) R_1 i_s + v_{off,op} \quad (4.8)$$

เมื่อพิจารณาที่ OC ตัวที่ 3

$$i_2 = \frac{k(v_1 + v_{off,op})}{(1 + k)(R_2 + R_x)} \quad (4.9)$$

$$i_3 = (1 - \varepsilon_c) i_2 \quad (4.10)$$

นำ  $v_1$  ในสมการ (4.8) แทนในสมการ (4.9) จะได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_2 = \frac{k((1-\varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \quad (4.11)$$

นำ  $i_2$  ในสมการ (4.11) แทนในสมการ (4.10) จะได้  $i_3$  ดังในสมการ

$$i_3 = (1-\varepsilon_c) \frac{k((1-\varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \quad (4.12)$$

พิจารณาที่ Node  $v_o$  จะได้ว่า

$$i_5 = i_3 - i_4 \quad (4.13)$$

$$v_o = R_g i_5 \quad (4.14)$$

และเมื่อนำ  $i_3$  กับ  $i_4$  ในสมการที่ (4.6) และ (4.12) แทนในสมการที่ (4.13) จะได้

$$i_5 = \left[ \frac{k((1-\varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1-\varepsilon_c)(1+k)(R_2 + R_x)} \right] - \left[ (1-\varepsilon_c)^2 i_s + (1-\varepsilon_c)I_{off} \right] \\ = \frac{(1-\varepsilon_c)^2 v_{ref}}{(R_s + R_x)} \left[ \frac{kR_1}{(1+k)(R_2 + R_x)} - 1 \right] + \frac{2k(1-\varepsilon_c)v_{off,op}}{(1-k)(R_2 + R_x)} - (1-\varepsilon_c)I_{off} \quad (4.15)$$

นำ  $i_5$  ในสมการ (4.15) แทนในสมการ (4.14) จะได้  $v_o$

$$v_o = (1-\varepsilon_c)R_g \left[ \frac{(1-\varepsilon_c)v_{ref}}{(R_s + R_x)} \left( \frac{kR_1}{(1+k)(R_2 + R_x)} - 1 \right) + \frac{2kv_{off,op}}{(1-k)(R_2 + R_x)} - I_{off} \right] \quad (4.16)$$

กำหนดให้  $k \gg 1$ ,  $R_s \gg R_x$ ,  $R_2 = R_0$ ,  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$  แทนในสมการที่ (4.16) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$v_o = (1-\varepsilon_c)R_g \left[ \frac{(1-\varepsilon_c)v_{ref}}{R_s} \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} - 1 \right) + \frac{2v_{off,op}}{R_0} - I_{off} \right] \quad (4.17)$$

เมื่อ  $v_{off,op}$  และ  $I_{off}$  มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ (4.18)

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} (1-\varepsilon_c)^2 \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.17) พบว่า ค่าแรงดันออฟเซต  $v_{off,op}$  และความคลาดเคลื่อนของค่าเอาต์พุต  $v_o$  สามารถชดเชยได้ด้วยการป้อนค่ากระแสจากภายนอก  $I_{off}$  และการปรับแต่งค่าความต้านทาน  $R_g$  ตามลำดับ ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ที่ได้ภายหลังการชดเชย คือ

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_o} \right) \left( \frac{R_g}{R_s} \right) v_{ref} \quad (4.19)$$

จากสมการที่ (4.19) แสดงให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอตั้งรูปที่ 4.1 สร้างสัญญาณเอาต์พุต  $v_o$  ที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R$  เมื่อนำไปใช้ในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว

การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจรจัดการเชิงเส้นสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาความต้านทานแฝงที่พอร์ต X และค่าความผิดพลาดจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 2 โดยกำหนดให้  $v_{ref} = 5 \text{ v}$ ,  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $\Delta R = 5 \Omega$ ,  $R_o = 100 \Omega$  และ  $\epsilon_c = 0.00015$

หาค่าแรงดันเอาต์พุตในอุดมคติจากสมการที่ (4.19) โดยการกำหนดค่า  $v_{ref}$  โดยใช้เงื่อนไข

$$\frac{v_{ref}}{R_s} = 1\text{mA}$$

$$\begin{aligned} v_o &= \left( \frac{\pm \Delta R}{R_o} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} \\ &= \left( \frac{5\Omega}{100} \right) (10\text{k}\Omega)(1\text{mA}) \\ &= 0.5\text{V} \end{aligned}$$

จากสมการ  $v_o$  ที่ (4.18) จะค่าแรงดันเอาต์พุต คือ

$$\begin{aligned} v_o &= \left( \frac{\pm \Delta R}{R_o} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} (1 - \epsilon_c)^2 \\ &= \left( \frac{5\Omega}{100\Omega} \right) \left( \frac{10\text{k}\Omega}{5\text{k}\Omega} \right) (5)(1 - 0.00015)^2 \\ &= 0.49985\text{V} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ

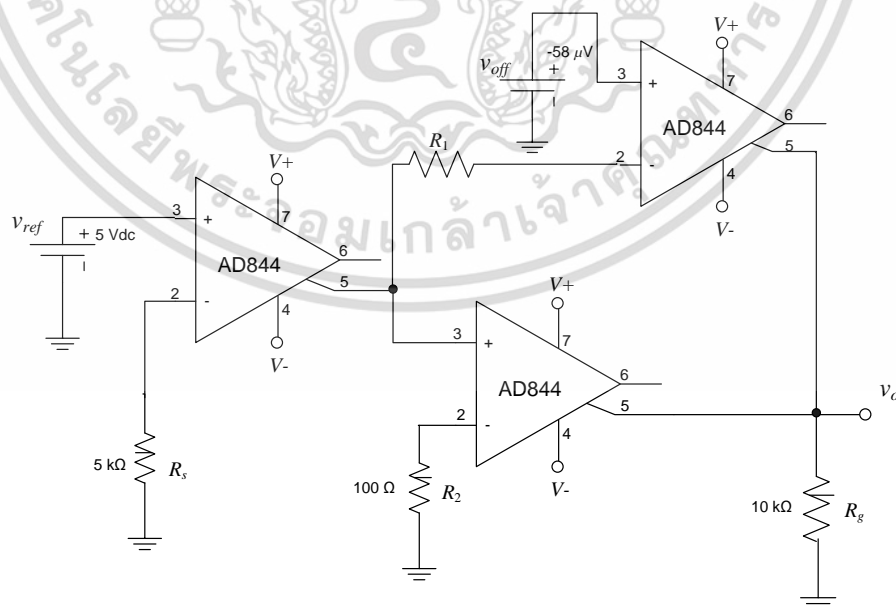
$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left( \frac{v_o - \text{Ideal}}{\text{Ideal}} \right) * 100\% \\ &= \left( \frac{0.49985 - 0.5}{0.5} \right) * 100\% \\ &= \pm 0.0299 \% \end{aligned}$$

### 4.3 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลอง

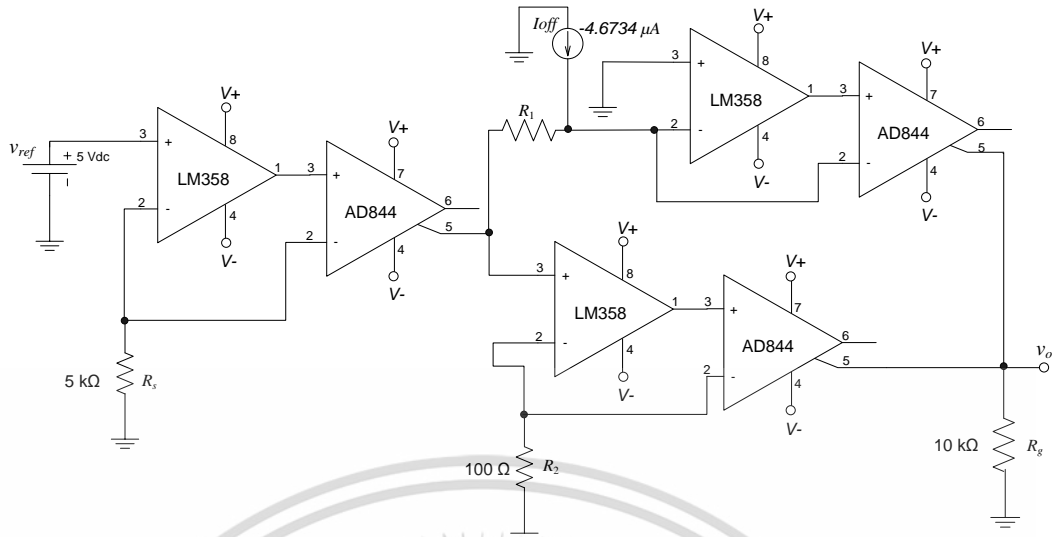
เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรที่ได้นำเสนอในรูปที่ 4.1 เทียบกับวงจรในรูปที่ 3.12 โดยได้ทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรจริงด้วยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี Pt100 และ Pt1000 โดยการกำหนดให้ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ 100  $\Omega$  และ 1000  $\Omega$  ตามลำดับ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ แหล่งจ่ายแรงดันแบบปรับค่าได้ 0-30 Vdc, Yokogawa Multimeter รุ่น 4300, Beamex Multifunction Calibrator รุ่น MC5

#### 4.3.1 การทดสอบวงจรด้วยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี Pt100

ทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ด้วยการใช้ไอซีสำเร็จรูป AD844AN และ LM358 สำหรับวงจรสายพานกระแสและออปแอมป์ตามลำดับ โดยจำลองการเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ Pt100 ด้วยการกำหนดค่า  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $V_{ref} = 5 \text{ V}$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$  และต่อวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt100 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

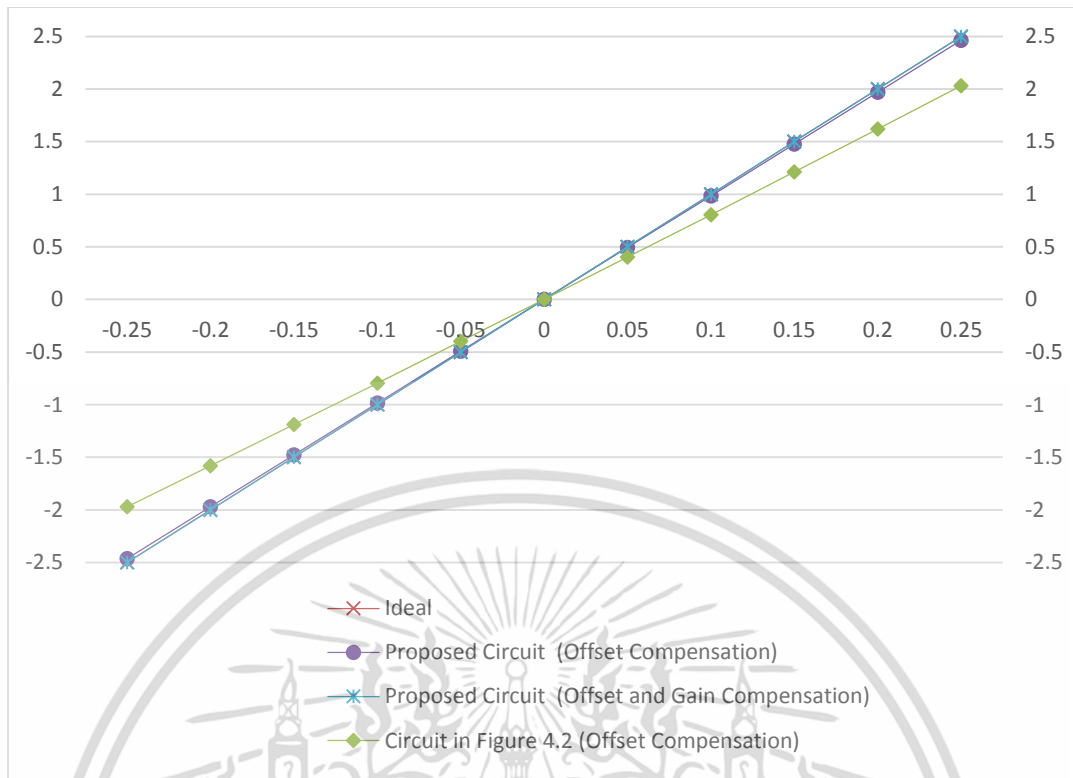


รูปที่ 4.3 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt100

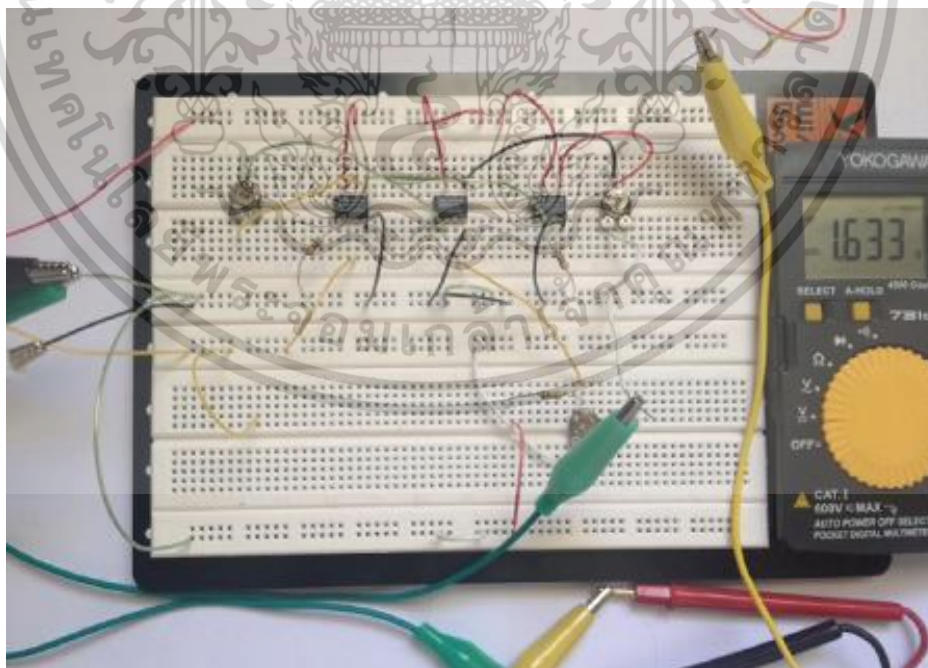
เพื่อให้ผลการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด จากรูปที่ 4.2 เมื่อคำนวณหาค่าแรงดันชดเชย  $v_{off}$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ  $-58 \mu\text{V}$  สำหรับวงจรที่นำเสนอจะทำการทดลองโดยใช้ค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  เท่ากับ  $-4.6734 \mu\text{A}$  และค่าความต้านทานเอาต์พุต  $R_g$  เท่ากับ  $10.07 \text{ k}\Omega$  โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองแบบ คือ ปรับค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  เพียงอย่างเดียว และปรับค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  กับค่าความต้านทานเอาต์พุต  $R_g$  ผลการทดลองด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt100

X	Ideal	จากรูปที่ 4.2 (ปรับแต่ง $v_{off} = -58 \mu\text{V}$ )		จากรูปที่ 4.3 (ปรับแต่ง $I_{off} = -4.6734 \mu\text{A}$ )		จากรูปที่ 4.3 (ปรับแต่ง $I_{off} = -4.6734 \mu\text{A}$ และ $R_g = 10.07 \text{ k}\Omega$ )	
		$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)
-0.25	-2.5	-1.9693	-21.228	-2.4630	-1.480	-2.5000	-0.000
-0.20	-2.0	-1.5808	-20.960	-1.9704	-1.480	-2.0000	-0.000
-0.15	-1.5	-1.1895	-20.700	-1.4778	-1.480	-1.5000	-0.000
-0.10	-1.0	-0.7955	-20.450	-0.9851	-1.490	-1.0000	-0.000
-0.05	-0.5	-0.3990	-20.200	-0.4927	-1.483	-0.5000	-0.000
0.00	0.0	-0.000005	-0.0005	0.000002	0.0002	0.00000	0.0002
0.05	0.5	0.4015	-19.700	0.4926	-1.482	0.49998	-0.004
0.10	1.0	0.8052	-19.480	0.9852	-1.482	1.0000	-0.000
0.15	1.5	1.212	-19.200	1.4778	-1.480	1.5000	-0.000
0.20	2.0	1.6194	-19.030	1.9704	-1.480	2.0000	-0.000
0.25	2.5	2.0295	-18.820	2.4629	-1.484	2.5000	-0.000

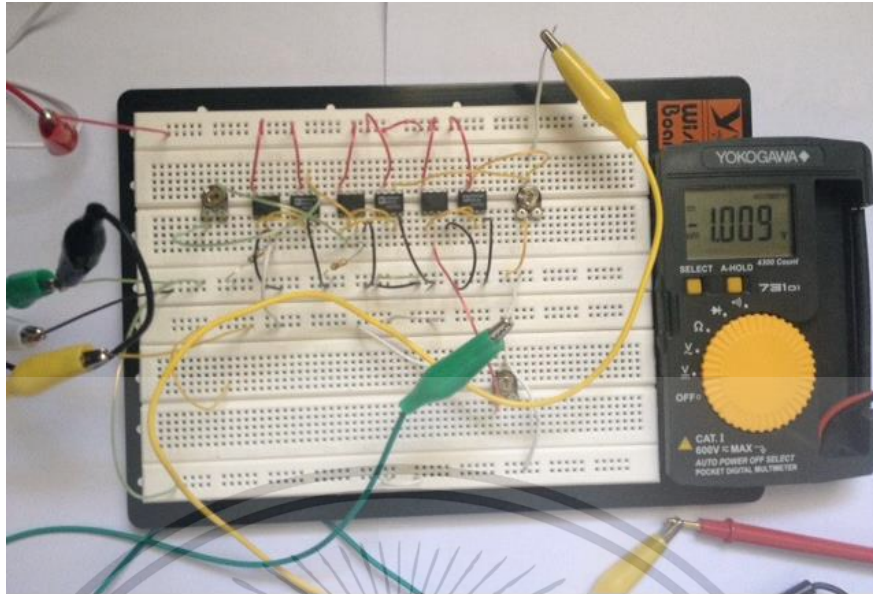


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt100



รูปที่ 4.5 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



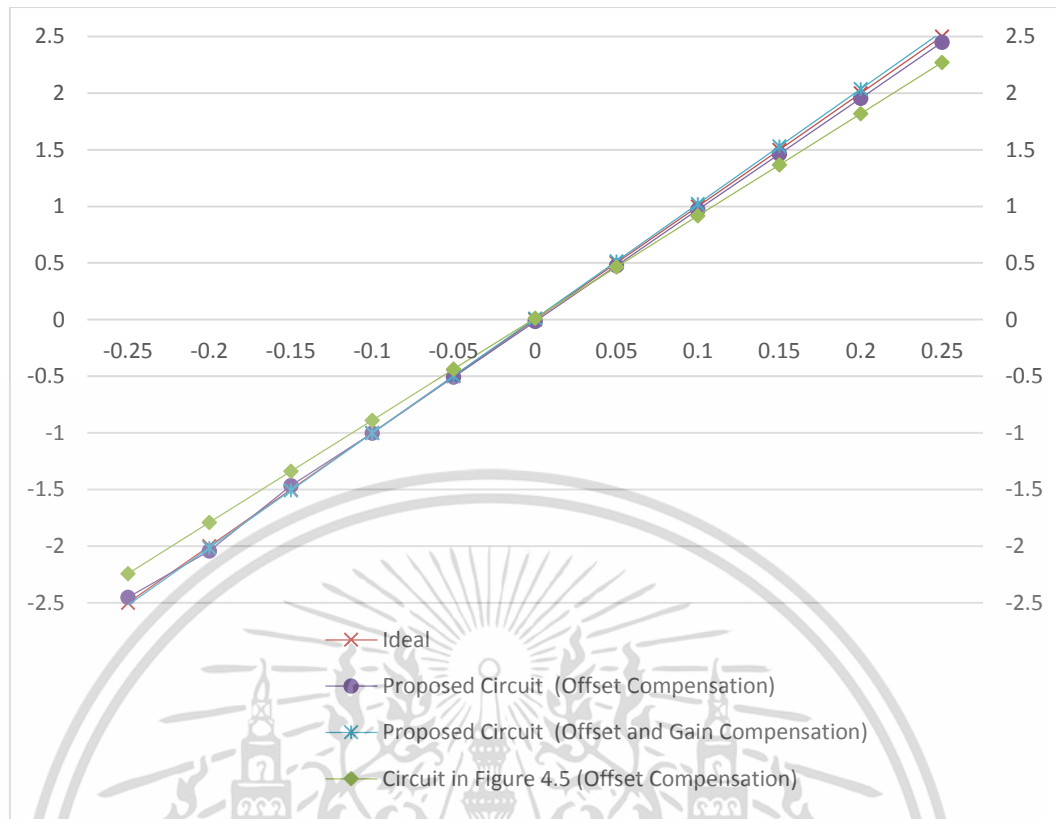
รูปที่ 4.6 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt100

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวงจรที่ได้ทำการเลียนแบบไปนั้นมีผลการทำงานที่ถูกต้องด้วยการต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป สำเร็จรูป AD844AN และ LM358 สำหรับวงจรสายพานกระแสและออปแอมป์ ตามลำดับ โดยจำลองการเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ Pt100 ด้วยการกำหนดค่า  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $V_{ref} = 5 \text{ V}$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$  และต่อวงจรจริงดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ผลการทดลองด้วยการต่อวงจรจริงสามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt100

X	Ideal	จากรูปที่ 4.5 (ปรับแต่ง $V_{off} = -58 \mu\text{V}$ )		จากรูปที่ 4.6 (ปรับแต่ง $I_{off} = -4.6734 \mu\text{A}$ )		จากรูปที่ 4.6 (ปรับแต่ง $I_{off} = -4.6734 \mu\text{A}$ และ $R_g = 10.07 \text{ k}\Omega$ )	
		$V_o$ (V)	Error (%)	$V_o$ (V)	Error (%)	$V_o$ (V)	Error (%)
-0.25	-2.5	-2.241	-10.360	-2.450	-2.000	-2.520	0.800
-0.20	-2.0	-1.790	-10.500	-2.042	2.100	-2.012	0.600
-0.15	-1.5	-1.339	-10.733	-1.465	-2.333	-1.508	0.533
-0.10	-1.0	-0.888	-11.200	-1.001	0.067	-1.001	0.133
-0.05	-0.5	-0.437	-12.600	-0.508	1.633	-0.495	-0.933
0.00	0.0	0.014	1.400	-0.016	1.600	0.011	1.100
0.05	0.5	0.465	-7.000	0.477	-4.633	0.517	3.333
0.10	1.0	0.916	-8.400	0.969	-3.067	1.023	2.267
0.15	1.5	1.367	-8.867	1.462	-2.544	1.529	1.911
0.20	2.0	1.818	-9.100	1.954	-2.283	2.035	1.733
0.25	2.5	2.269	-9.240	2.447	-2.127	2.541	1.627

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการต่อวงจรจริงและจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt100

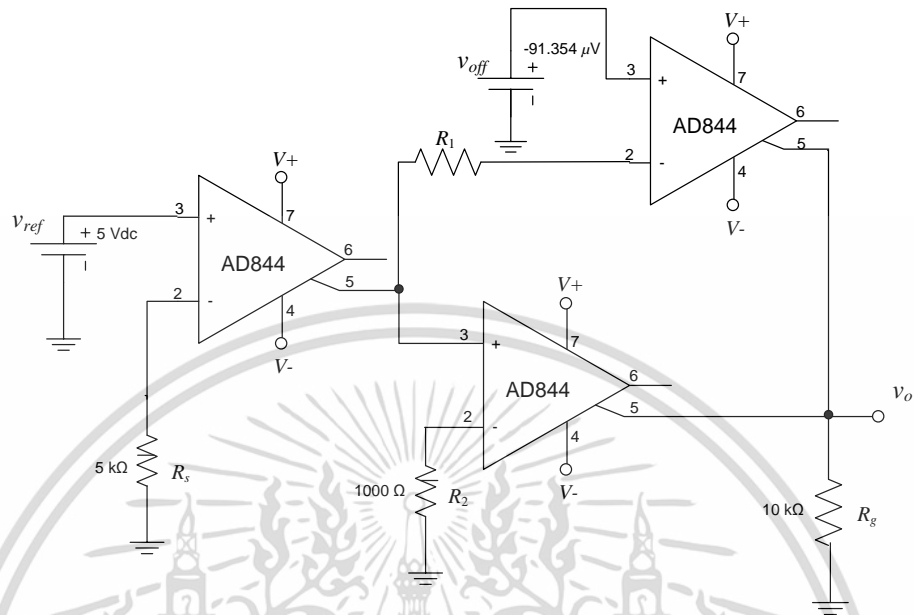
ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรและการประกอบวงจรจริงที่ใช้เพียงวงจรสายพานกระแสในรูปที่ 3.12 และวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 4.1 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ใช้เพียงวงจรสายพานกระแสมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 20% ในขณะที่วงจรจัดการสัญญาณที่นำเสนอมีค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตต่ำกว่า 1.5% และเมื่อทำการปรับค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  และค่าต้านทานเอาต์พุต  $R_g$  จะทำให้วงจรมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง

#### 4.3.2 การทดสอบวงจรด้วยเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีดี Pt1000

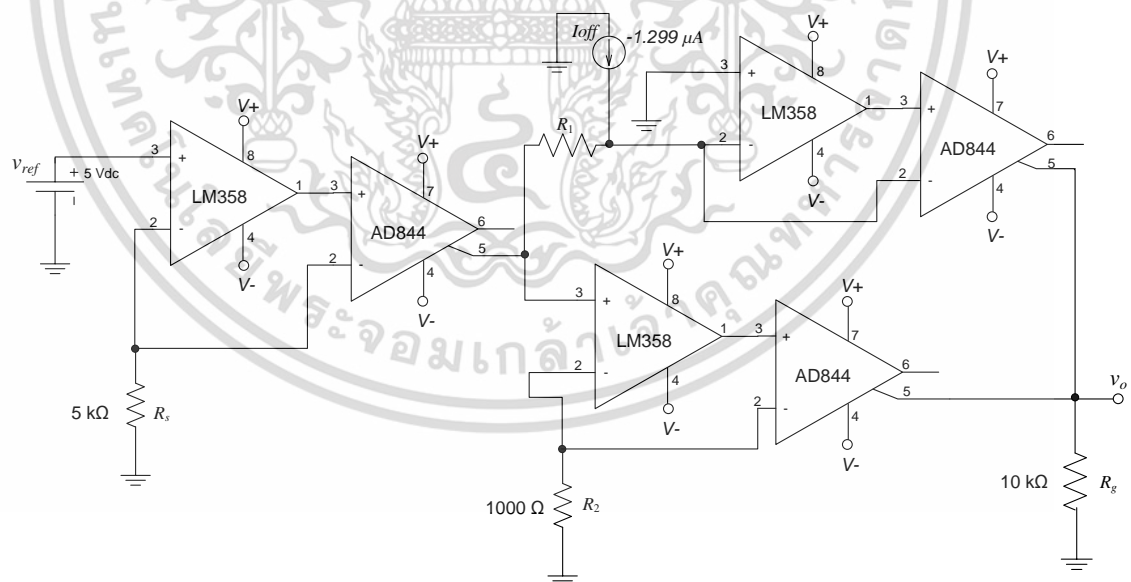
ทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ด้วยการใช้ไอซีสำเร็จรูป AD844AN และ LM358 สำหรับวงจรสายพานกระแสและออปแอมป์ตามลำดับ โดยจำลองการเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ Pt1000 ด้วยการกำหนดค่า  $R_0 = 1000 \Omega$ ,  $v_{ref} = 5 \text{ V}$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1000 \Omega$  และต่อวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

กำหนดให้ ค่าแรงดันชดเชย  $v_{off}$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ  $-91.354 \mu\text{V}$  สำหรับวงจรที่นำเสนอ นั้นจะทำการทดลองโดยใช้ค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  เท่ากับ  $-1.299 \mu\text{A}$  และค่าความต้านทานเอาต์พุต  $R_g$  เท่ากับ  $10.0847 \text{ k}\Omega$  โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองแบบ คือ ปรับค่ากระแสชดเชย

$I_{off}$  เพียงอย่างเดียว และปรับค่ากระแสชดเชย  $I_{off}$  กับค่าความต้านทานเอาต์พุต  $R_g$  ตามลำดับ ผลการทดลองด้วยการต่อวงจรจริง สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.8 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000

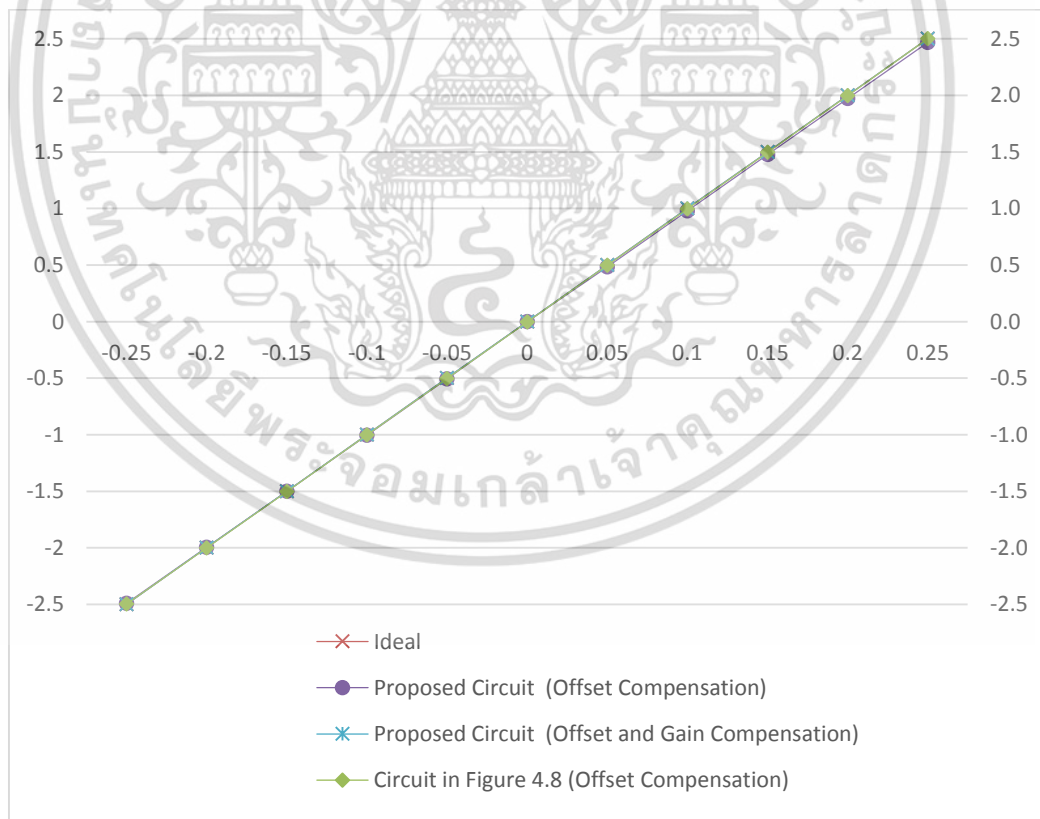


รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt1000

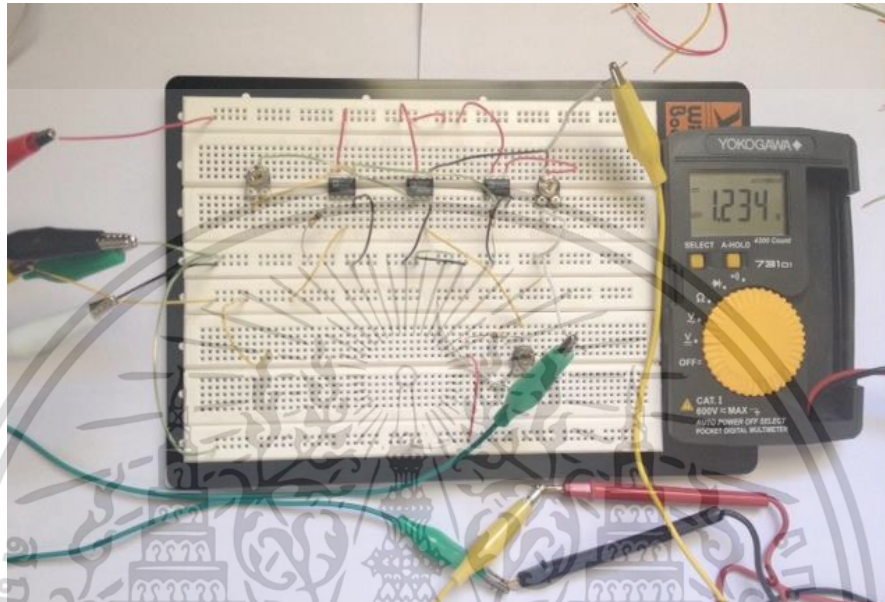
X	Ideal	จากรูปที่ 4.8 (ปรับแต่ง $V_{off} = -91.354 \mu V$ )		จากรูปที่ 4.9 (ปรับแต่ง $I_{off} = -1.299 \mu A$ )		จากรูปที่ 4.9 (ปรับแต่ง $I_{off} = -1.299 \mu A$ และ $R_g = 10.0847 k\Omega$ )	
		$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)
-0.25	-2.5	-2.4990	-0.0400	-2.4920	0.3200	-2.5000	0.0000
-0.20	-2.0	-2.0010	0.0500	-1.9960	0.2000	-2.0000	0.0000
-0.15	-1.5	-1.5030	0.2000	-1.5000	0.0000	-1.5000	0.0000
-0.10	-1.0	-1.0040	0.4000	-1.0050	-0.5000	-1.0000	0.0000
-0.05	-0.5	-0.5046	0.9200	-0.5087	-1.7400	-0.4999	0.0200
0.00	0.0	-0.0049	0.4900	-0.0013	-0.1300	0.0000	0.0000
0.05	0.5	0.4953	-0.9400	0.4830	3.4000	0.5000	0.0000
0.10	1.0	0.9960	-0.4000	0.9787	2.1300	1.0000	0.0000
0.15	1.5	1.4970	-0.2000	1.4750	1.6667	1.5000	0.0000
0.20	2.0	1.9980	-0.1000	1.9700	1.5000	2.0000	0.0000
0.25	2.5	2.5000	0.0000	2.4660	1.3600	2.5000	0.0000



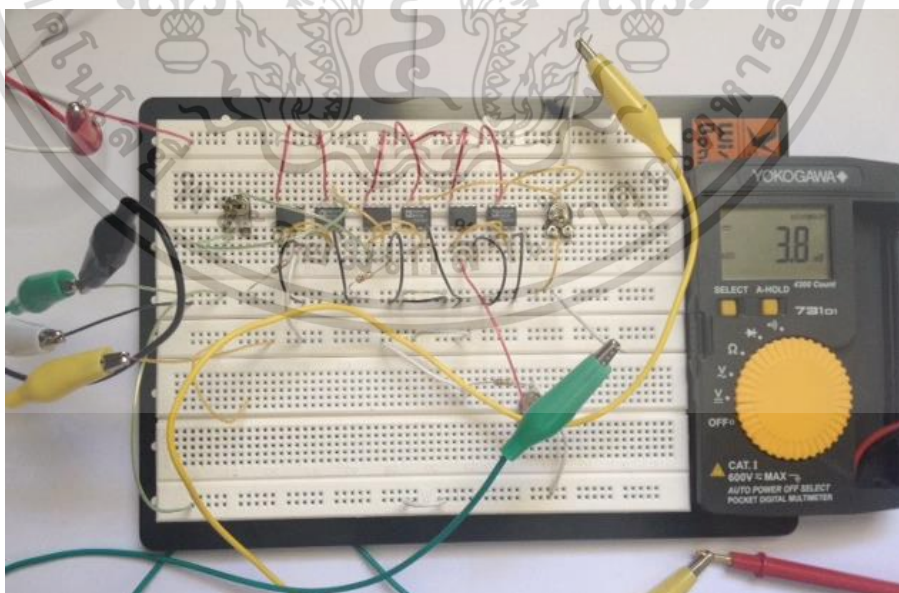
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการเลียนแบบค่าการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวงจรที่ได้ทำการเลียนแบบไปนั้นมีผลการทำงานที่ถูกต้องด้วยการต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป สำเร็จรูป AD844AN และ LM358 สำหรับวงจรสายพานกระแสและออปแอมป์ตามลำดับ โดยจำลองการเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ Pt1000 ด้วยการกำหนดค่า  $R_0 = 1000 \Omega$ ,  $v_{ref} = 5 \text{ V}$ ,  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1000 \Omega$  และต่อวงจรจริงดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียวเมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000

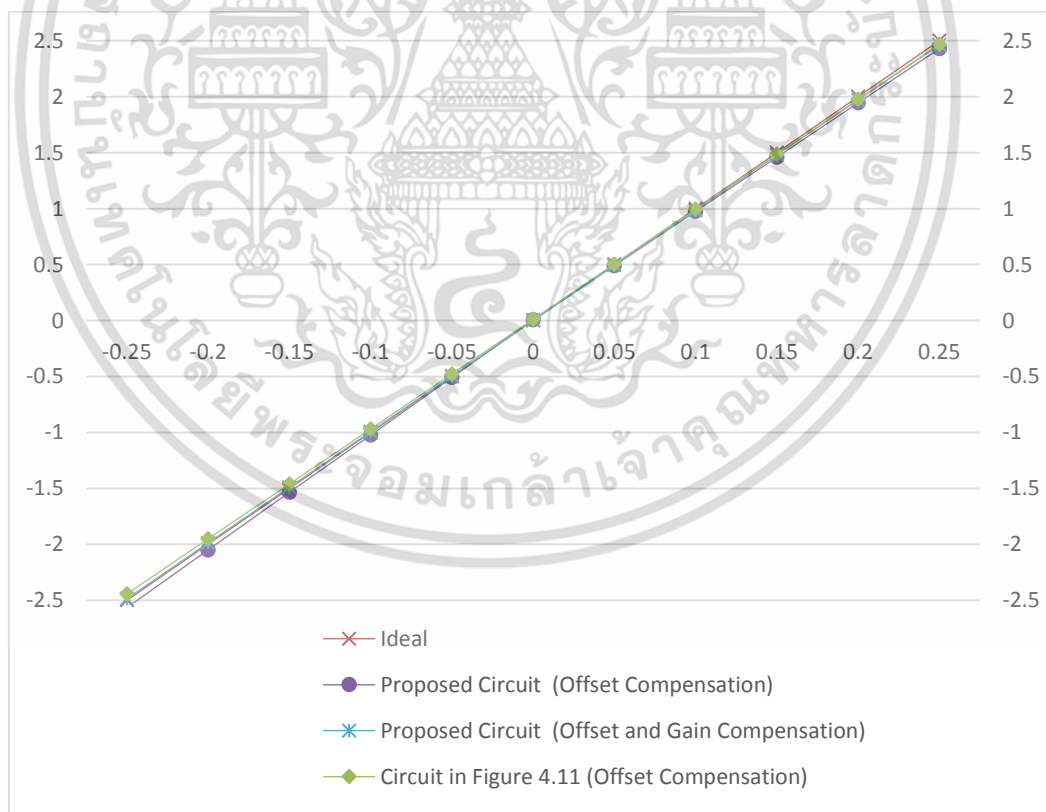


รูปที่ 4.12 การต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปของวงจรสายพานกระแสเพียงต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เมื่อต่อใช้งานกับ Pt1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง สำหรับการเชื่อมต่ออาร์ทีดี Pt1000

X	Ideal	จากรูปที่ 4.11 (ปรับแต่ง $V_{off} = -91.354 \mu\text{V}$ )		จากรูปที่ 4.12 (ปรับแต่ง $I_{off} = -1.299 \mu\text{A}$ )		จากรูปที่ 4.12 (ปรับแต่ง $I_{off} = -1.299 \mu\text{A}$ และ $R_g = 10.0847 \text{ k}\Omega$ )	
		$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)
-0.25	-2.5	-2.442	-2.3200	-2.565	2.6000	-2.486	-0.5600
-0.20	-2.0	-1.951	-2.4500	-2.051	2.5500	-1.988	-0.6000
-0.15	-1.5	-1.460	-2.6667	-1.537	2.4667	-1.490	-0.6667
-0.10	-1.0	-0.969	-3.1000	-1.023	2.3000	-0.992	-0.8000
-0.05	-0.5	-0.478	-4.4000	-0.509	1.8000	-0.494	-1.2000
0.00	0.0	0.013	1.3000	0.005	0.5000	0.004	0.3800
0.05	0.5	0.504	0.8000	0.490	-2.0000	0.492	-1.6000
0.10	1.0	0.995	-0.5000	0.975	-2.5000	0.985	-1.5000
0.15	1.5	1.486	-0.9333	1.460	-2.6667	1.478	-1.4667
0.20	2.0	1.977	-1.1500	1.945	-2.7500	1.971	-1.4500
0.25	2.5	2.468	-1.2800	2.430	-2.8000	2.464	-1.4400



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตกับค่า Resistance Variable Ratio เมื่อทำการต่อวงจรจริงและจำลองการเชื่อมต่อด้วย Pt1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรและการทดลองต่อวงจรจริง ที่ใช้เพียงวงจรสายพาน กระแสเพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.12 และวงจรที่นำเสนอโดยใช้วงจรสายพานกระแสเพียงต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ ในรูปที่ 4.1 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ใช้เพียงวงจรสายพานกระแสมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ลดลงเมื่อต่อด้วยเซนเซอร์ความต้านทาน Pt1000 แต่เมื่อเทียบกับวงจรที่นำเสนอ นั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่ต่ำกว่า

#### 4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว โดยวงจรที่นำเสนอจะประกอบด้วยวงจรย่อยโดยนำเอาวงจรสายพานกระแสมาต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติและผลเปลี่ยนแปลงการทำงานสำหรับวงจรที่นำเสนอ แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันการทำงานสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีวงจรการทำงานที่เรียบง่ายโครงสร้างไม่ซับซ้อน



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยและพัฒนาวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยว หลักการที่นำเสนอมุ่งเน้นการออกแบบวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นโดยการนำเอากลุ่มวงจรย่อยโดยใช้วงจรสายพานกระแสมาต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์ เพื่อเอามาสังเคราะห์และสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัดให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับวงจรที่ใช้วงจรสายพานกระแสเพียงอย่างเดียว อีกทั้งวงจรที่ได้นำเสนอยังใช้แรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียวทำให้สะดวกต่อการใช้งานจริง โดยสมรรถนะการทำงานของวงจรสามารถยืนยันด้วยผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางทฤษฎี จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลองจากการประกอบวงจรจริง แสดงให้เห็นว่าค่าเอาต์พุตของวงจรมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ลดลงและยังแสดงถึงควมมีประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวที่ได้นำเสนอ จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันที่เป็นสัดส่วนอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัด สำหรับการตรวจวัดระยะไกล ซึ่งเป็นกรณีที่เชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานด้วยสายสัญญาณที่ยาวมาก ๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความต้านทานสะสมภายในสายสัญญาณ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ควรปรับปรุงการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานที่สามารถชดเชยค่าความต้านทานในสายหรือสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความต้านทานในสายได้

## เอกสารอ้างอิง

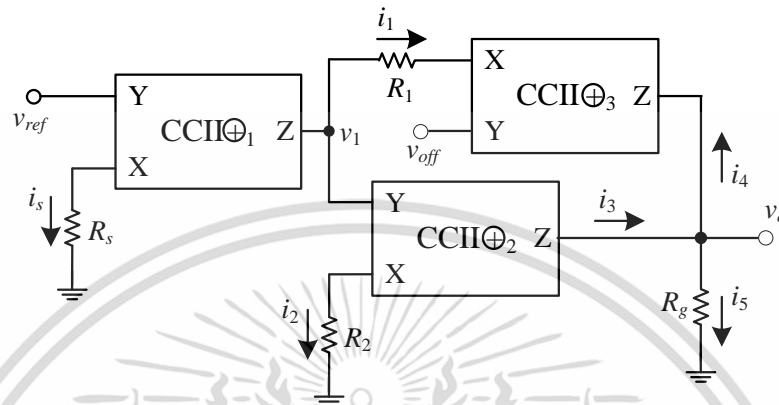
- [1] T. L. Floyd, **Electric Circuits Fundamentals**, Pearson Education International, 2004.
- [2] S. J. Azhari and H. Kaabi, “AZKA Cell, The Current-mode Alternative of Wheatstone Bridge”, IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl., Vol. 47, No. 9, 2000, pp. 1277-1284.
- [3] A. Julsereewong, 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), 2010, pp. 1985-1990.
- [4] P. Julsereewong, A. Julsereewong, and J. Waeophet, “Operational Conveyor-based Interface Circuit for Single Resistive Sensors”, ECTI-CON 2011, pp. 102-105.
- [5] S. J. Gift, “Hybrid Current Conveyor-Operational Amplifier Circuit”, Int. J. of Electron., Vol. 88, No. 12, 2001, pp. 1225-1235.
- [6] J. Samitier, M. P. Vidal, S. A. Bota, C. Rubio, S. K. Siskos, and T. Laopoulos, “A Current-mode Interface Circuit for A Piezoresistive Pressure Sensor”, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 47, No. 3, 1998, pp. 708-710.
- [7] K. C. Smith and A. Sedra, “The Current Conveyor – A New Circuit Building Block”, Proc. IEEE (Letters). Vol.56, 1968, pp. 1368-1369.
- [8] A. Fabre, O. Saaid, F. Wiest, and C. Boucheron, “Current Controlled Bandpass Filter Base on Translinear Conveyors” Electronics Letters, Volume 31. 20, 1995, pp. 1727-1728.
- [9] ทวีช ชูเมือง, **Industrial Instrumentation Engineering and Design Part II**, กรุงเทพฯ : เอช เอ็น กรุ๊ป, 2549, หน้า 171-177.
- [10] สมศักดิ์ กริทธิวุฒิศเรษฐ, **เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2555, หน้า 18-12 ถึง 18-15.
- [11] ผศ.ดร. วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์**, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2548, หน้า 52-55.
- [12] K. C. Smith and A. Sedra, “The Second Generation Current Conveyor and Its Application” IEEE Trans., Vol.CT-17, 1970, pp. 132-154.
- [13] ผศ.ดร. วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, **ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก**, กรุงเทพฯ : ว.เพ็ชรสกุล, 2545, หน้า 18-26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์โดยใช้วงจร  
สายพานกระแส



รูปที่ ก.1 วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส [6]

พิจารณาแบบไม่เป็นตามอุดมคติ จะมี  $R_x$ ,  $\varepsilon_i$  และ  $v_{off,cc}$  เข้ามาพิจารณาด้วย

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 1

$$i_s = \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \quad (ก.1)$$

$$i_1 = (1 - \varepsilon_i) i_s \quad (ก.2)$$

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 3

$$i_4 = (1 - \varepsilon_i) i_1 \quad (ก.3)$$

นำ  $i_1$  ในสมการ (ก.2) แทนในสมการ (ก.3) จะได้

$$i_4 = (1 - \varepsilon_i)^2 i_s \quad (ก.4)$$

พิจารณาที่ Node  $v_1$

$$v_1 = i_1(R_1 + R_x) + v_{off} + v_{off,cc} \quad (ก.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ  $i_1$  ในสมการ (ก.2) แทนในสมการ (ก.4) จะได้

$$v_1 = (1 - \varepsilon_i)(R_1 + R_x)i_s + v_{off} + v_{off,cc} \quad (ก.6)$$

เมื่อพิจารณาที่ CCII ตัวที่ 2

$$i_2 = \frac{v_1}{R_2 + R_x} \quad (ก.7)$$

$$i_3 = (1 - \varepsilon_i)i_2 \quad (ก.8)$$

นำ  $i_2$  ในสมการ (ก.7) แทนในสมการ (ก.8) จะได้

$$i_3 = \frac{v_1}{R_2 + R_x} (1 - \varepsilon_i) \quad (ก.9)$$

พิจารณาด้านเอาต์พุตที่ Node  $v_o$

$$i_5 = i_3 - i_4 \quad (ก.10)$$

$$v_o = R_g i_5 \quad (ก.11)$$

และเมื่อนำ  $i_3$  กับ  $i_4$  ในสมการที่ (ก.9) และ (ก.4) แทนในสมการที่ (ก.10) จะได้

$$\begin{aligned} i_5 &= (1 - \varepsilon_i) \frac{v_1}{R_2 + R_x} - (1 - \varepsilon_i)^2 \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \\ &= \frac{(1 - \varepsilon_i)^2 v_{ref}}{R_s + R_x} \left[ \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right] + \frac{(1 - \varepsilon_i)(v_{off} + v_{off,cc})}{R_2 + R_x} \end{aligned} \quad (ก.12)$$

นำ  $i_5$  ในสมการ (ก.12) แทนในสมการ (ก.11) จะได้  $v_o$

$$v_o = \frac{(1 - \varepsilon_i)^2 R_g v_{ref}}{R_s + R_x} \left[ \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right] + \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)(v_{off} + v_{off,cc})}{R_2 + R_x} \quad (ก.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

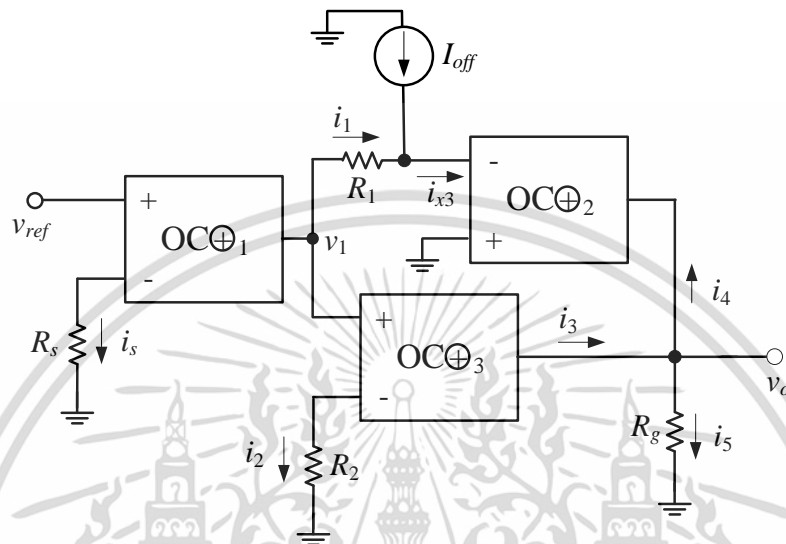
หลังจากปรับค่า Offset จะทำให้มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ (ก.14)

$$v_o = \frac{(1 - \varepsilon_i)^2 R_g v_{ref}}{R_y + R_x} \left[ \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right] \quad (\text{ก.14})$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่  
นำเสนอ



รูปที่ ข.1 วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ

พิจารณาแบบไม่เป็นตามอุดมคติ จะมี  $R_x$ ,  $\varepsilon_c$  และ  $v_{off,op}$  เข้ามาพิจารณาด้วย

เมื่อพิจารณาที่ OC ตัวที่ 1

$$i_s = \frac{v_{ref}}{R_s + R_x} \quad (\text{ข.1})$$

$$i_1 = (1 - \varepsilon_i) i_s \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อพิจารณาที่ OC ตัวที่ 2

$$i_{x3} = i_1 + I_{off} \quad (\text{ข.3})$$

$$i_4 = (1 - \varepsilon_c) i_{x3} \quad (\text{ข.4})$$

นำสมการ (ข.2) แทนในสมการ (ข.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{x3} = (1 - \varepsilon_c)i_s + I_{off} \quad (\text{ข.5})$$

นำสมการ (ข.5) แทนในสมการ (ข.4) จะได้

$$i_4 = (1 - \varepsilon_c)^2 i_s + (1 - \varepsilon_c)I_{off} \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อพิจารณาที่ Node  $v_1$  จะได้ว่า

$$v_1 = i_1 R_1 + v_{x3} \quad (\text{ข.7})$$

นำ  $i_1$  ในสมการ (ข.2) แทนในสมการ (ข.7) และเมื่อ  $v_{x3} = v_{off,op}$  จะได้สมการ

$$v_1 = (1 - \varepsilon_c)R_1 i_s + v_{off,op} \quad (\text{ข.8})$$

เมื่อพิจารณาที่ OC ตัวที่ 3

$$i_2 = \frac{k(v_1 + v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \quad (\text{ข.9})$$

$$i_3 = (1 - \varepsilon_c)i_2 \quad (\text{ข.10})$$

นำ  $v_1$  ในสมการ (ข.8) แทนในสมการ (ข.9) จะได้

$$i_2 = \frac{k((1 - \varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \quad (\text{ข.11})$$

นำ  $i_2$  ในสมการ (ข.11) แทนในสมการ (ข.10) จะได้  $i_3$  ดังในสมการ

$$i_3 = (1 - \varepsilon_c) \frac{k((1 - \varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \quad (\text{ข.12})$$

พิจารณาที่ Node  $v_o$  จะได้ว่า

$$i_5 = i_3 - i_4 \quad (\text{ข.13})$$

$$v_o = R_g i_5 \quad (\text{ข.14})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำ  $i_3$  กับ  $i_4$  ในสมการที่ (ข.6) และ (ข.12) แทนในสมการที่ (ข.13) จะได้

$$\begin{aligned} i_5 &= \left[ (1-\varepsilon_c) \frac{k((1-\varepsilon_c)R_1 i_s + 2v_{off,op})}{(1+k)(R_2 + R_x)} \right] - \left( (1-\varepsilon_c)^2 i_s + (1-\varepsilon_c) I_{off} \right) \\ &= \frac{(1-\varepsilon_c)^2 v_{ref}}{(R_s + R_x)} \left[ \frac{kR_1}{(1+k)(R_2 + R_x)} - 1 \right] + \frac{2k(1-\varepsilon_c)v_{off,op}}{(1-k)(R_2 + R_x)} - (1-\varepsilon_c) I_{off} \end{aligned} \quad (ข.15)$$

นำ  $i_5$  ในสมการ (ข.15) แทนในสมการ (ข.14) จะได้  $v_o$

$$v_o = (1-\varepsilon_c) R_g \left[ \frac{(1-\varepsilon_c)v_{ref}}{(R_s + R_x)} \left( \frac{kR_1}{(1+k)(R_2 + R_x)} - 1 \right) + \frac{2kv_{off,op}}{(1-k)(R_2 + R_x)} - I_{off} \right] \quad (ข.16)$$

กำหนดให้  $k \gg 1$ ,  $R_s \gg R_x$ ,  $R_2 = R_0$ ,  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$  แทนในสมการที่ (ข.16) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$v_o = (1-\varepsilon_c) R_g \left[ \frac{(1-\varepsilon_c)v_{ref}}{R_s} \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} - 1 \right) + \frac{2v_{off,op}}{R_0} - I_{off} \right] \quad (ข.17)$$

เมื่อ  $v_{off,op}$  และ  $I_{off}$  มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ (ข.18)

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} (1-\varepsilon_c)^2 \quad (ข.18)$$

ภาคผนวก ค  
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วงจรถ่ายสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว

## Simple Linearization Circuit for Single Resistive Sensors

วัชรินทร์ นอกกระโทก<sup>1</sup> ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์<sup>1</sup> และ อัมพวัน จุลเสวีวงศ์<sup>1</sup>Watcharin Nokkrathok<sup>1</sup> Prasit Julsereewong<sup>1</sup> and Amphawan Julsereewong<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอวงจรถ่ายสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว การสังเคราะห์วงจรที่นำเสนอใช้วงจรย่อยที่มีวงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างเชิงเส้นกับค่าความต้านทานที่ตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ใช้เพียงวงจรสายพานกระแสซึ่งเคยถูกนำเสนอดีที่พบว่าวงจรถ่ายสัญญาณที่นำเสนอมีการปรับปรุงในเรื่องของความแม่นยำ ประสิทธิภาพของวงจรที่ได้นำเสนอพิสูจน์ให้เห็นได้ด้วยผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลอง

## Abstract

This paper presents a simple linearization circuit for interfacing single resistive sensors. The realization method utilizes hybrid current conveyor-opamp sub-circuits to generate the output voltage, which is linearly proportional to the sensing resistance. Compared to the previously reported technique using only current conveyors, the proposed circuit affords significant improvement in accuracy. Effectiveness of the proposed circuit is evidenced by PSPICE simulation and experimental results.

Keywords: linearization circuit, single resistive sensor, opamp, current conveyor, interface circuit

Email: pooinse05@hotmail.com

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

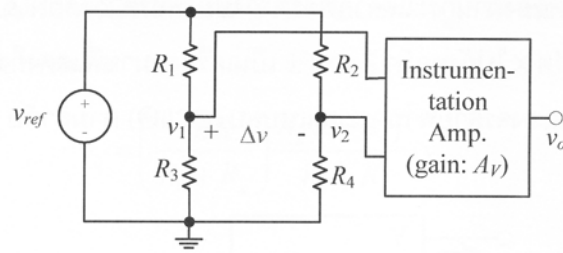
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

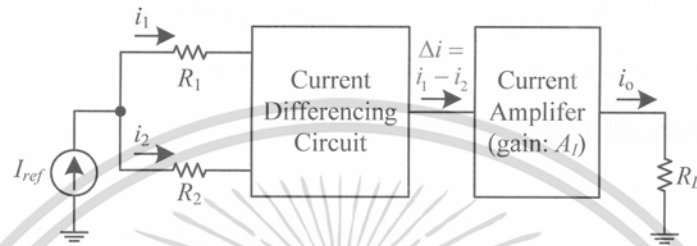
ในการวัดค่าในระบบการวัดคุมทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เซนเซอร์ความต้านทาน (resistive sensor) เพื่อตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความดัน หรือค่าความเค้น โดยประเภทของเซนเซอร์ความต้านทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักด้วยกันคือ แบบเชิงเดี่ยว (single type) และแบบความแตกต่าง (differential type) โดยเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวมีส่วนตรวจวัด (sensing element) เพียงแค่ตัวเดียวที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณหรือตัวแปรที่ต้องการตรวจวัดค่าตัวอย่างเช่น อาร์ทีดี (resistive temperature detector: RTD) และสเตรนเกจ (strain gauge) ส่วนเซนเซอร์แบบความแตกต่างมีส่วนตรวจวัดสองส่วน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของส่วนตรวจวัดที่ตรงข้ามกัน โดยส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามปริมาณหรือค่าตัวแปรที่ตรวจวัดที่มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกส่วนหนึ่งมีค่าความต้านทานลดลงตัวอย่างเช่น เซนเซอร์แบบโพเทนชิโอเมตริก (potentiometric sensor) โดยทั่วไปวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานมีโครงสร้างเป็นวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ที่มีการทำงานในโหมดแรงดัน (voltage-mode) (Julsereewong *et al.*, 2010) หรือบริดจ์ที่มีการทำงานโมดกระแส (current-mode) (Samitier *et al.*, 1998) ดังแสดงใน Figure 1(a) และ Figure 1(b) ตามลำดับโดยสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ของวงจรบริดจ์ทั้งสองสำหรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวและแบบความแตกต่างสามารถสรุปได้ดัง Table 1 เมื่อกำหนดให้  $R_0$  คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่สภาวะบริดจ์สมดุลและ  $\Delta R$  คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณหรือตัวแปรที่กำลังถูกตรวจวัดจาก Table 1 พบว่าในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยววงจรบริดจ์ทั้งสองสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้น (linearization circuit) ในบทความวิจัย (Julsereewong *et al.*, 2011) และ (Azhari and Kaabi, 2000) ได้นำเสนอวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานแบบเชิงเดี่ยวที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาด โดยวงจรที่นำเสนอทั้งสองมีโครงสร้างที่ง่ายและมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย (Julsereewong *et al.*, 2011) เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายกระแสอ้างอิง 2 ตัว โดยค่ากระแสของแหล่งจ่ายทั้งสองต้องเท่ากันและวงจรที่นำเสนอในบทความวิจัย (Azhari and Kaabi, 2000) เป็นวงจรที่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง 2 ตัว โดยค่าแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสองต้องมีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม

วัตถุประสงค์ของบทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้ อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดและต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพียงตัวเดียว ทำให้สะดวกในการต่อใช้งานจริง สำหรับการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอได้ทำการทดสอบด้วยการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรบนแผ่นทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันถึงฟังก์ชันในการทำงานว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Traditional Wheatstone bridge (Julsereewong et al.,2010)



(b) Alternative of Wheatstone bridge (Samitier et al.,1998)

Figure 1 Bridge configurations

Table 1 Output signal of the bridge Figure 1

Sensors	Figure1(a)		Figure1(b)	
	Conditions	Output Signal	Conditions	Output Signal
Differential Type	$R_1 = R_4 = R_0 \mp \Delta R$ $R_2 = R_3 = R_0 \pm \Delta R$	$v_o = \pm \frac{\Delta R}{R_0} A_V V_{ref}$	$R_1 = R_0 \mp \Delta R$ $R_2 = R_0 \pm \Delta R$	$i_o = \pm \frac{\Delta R}{R_0} A_I I_{ref}$
Single Type	$R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ $R_4 = R_0 \pm \Delta R$	$v_o = \frac{\mp \Delta R}{4R_0 \pm 2\Delta R} A_V$	$R_1 = R_0$ $R_2 = R_0 \pm \Delta R$	$i_o = \frac{\pm \Delta R}{2R_0 \pm \Delta R} A_I I_{ref}$

รายละเอียดของวงจร

1. วงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสในที่นี้หมายถึงวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor: CCII) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบสามพอร์ตที่ถูกออกแบบให้สามารถรับอินพุตที่เป็นทั้งกระแสและแรงดันได้ โดยทั่วไป นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ดัง Figure 2 คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง คือ

$$i_y = 0, v_x = v_y, i_z = \pm \alpha_i i_x \tag{1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha_i = (1 - \varepsilon_i)$  คือ อัตราการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z โดยที่  $\varepsilon_i$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z และ  $\pm$  เป็นเครื่องหมายที่แสดงถึงชนิดของวงจรสายพานกระแสแบบบวก (CCII $\oplus$ ) และวงจรสายพานกระแสแบบลบ (CCII $\ominus$ ) ตามลำดับ

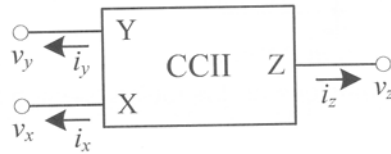


Figure 2 Circuit symbol of CCII

2. วงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์โดยใช้วงจรสายพานกระแส

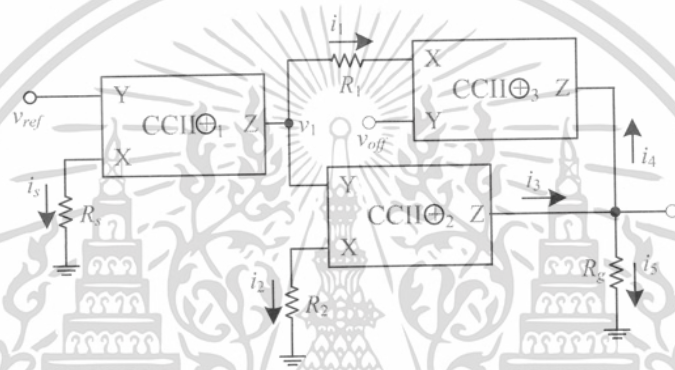


Figure 3 Basic configuration using only CCIIs (Gift,2001)

ใน Figure 3 แสดงวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานโดยใช้วงจรสายพานกระแส (Gift,2001) เมื่อ  $v_{ref}$  คือ ค่าแรงดันอ้างอิง และ  $R_s$  คือ เซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดียว ถ้า  $v_{off} = 0V$ ,  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$ ,  $R_2 = R_0$  และ  $x = \Delta R/R_0$  (resistance variation ratio) จะได้อัตราผิด  $v_o$  ทางอุดมคติ คือ

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} = (\pm x) \frac{R_g}{R_s} v_{ref} \tag{2}$$

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรสายพานกระแส จะได้ว่า

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right) \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)^2}{R_s + R_x} v_{ref} + \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)}{R_0 + R_x} (v_{off} + v_{off,CC}) \tag{3}$$

เมื่อ  $R_x$  และ  $v_{off,CC}$  คือ ค่าความต้านทานแฝงที่พอร์ต X และค่าแรงดันออฟเซต (offset voltage) ที่พอร์ต X ในกรณีที่  $v_y = 0$  ของวงจรสายพานกระแส ตามลำดับ จากสมการที่ (3) พบว่า ค่าแรงดันออฟเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{off,CC}$  สามารถชดเชยได้ด้วยการป้อนค่าแรงดันจากภายนอก  $V_{off}$  ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่ได้ภายหลังการชดเชยค่าออฟเซต คือ

$$V_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0 + R_x} \right) \frac{R_g (1 - \varepsilon_i)^2}{R_s + R_x} V_{ref} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) พบว่า ค่าความต้านทาน  $R_x$  เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำงานของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ใน Figure 3 โดยเฉพาะกรณีที่ใช้อิซีสำเร็จรูป เช่น AD844 ซึ่งมีค่า  $R_x$  ประมาณ 50  $\Omega$  มาสร้างเป็นวงจรสายพานกระแส ถ้ากำหนดให้  $V_{ref} = 5$  V,  $R_s = 5$  k $\Omega$ ,  $R_g = 10$  k $\Omega$ ,  $R_0 = 100$   $\Omega$ ,  $\Delta R = 5$   $\Omega$ ,  $R_x = 50$   $\Omega$ , และ  $\varepsilon_i = 0.01$  จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ -35.3%.

### 3. วงจรย่อยที่ใช้วงจรสายพานกระแสและออปแอมป์



Figure 4 Circuit symbol of operational conveyor

ใน Figure 4 แสดงวงจรย่อยที่ใช้วงจรสายพานกระแสต่อทำงานร่วมกับออปแอมป์หรือที่เรียกว่า "operational conveyor" (OC) (Floyd, 2004) โดยขาอินพุตทั้งสองของวงจรสายพานกระแสต่อในส่วนป้อนกลับแบบลบของออปแอมป์ เพื่อชดเชยผลกระทบจากความต้านทาน  $R_x$  ของวงจรสายพานกระแส คุณสมบัติของวงจรย่อย OC คือ

$$i_x = 0, v_x = v_y, i_z = \pm \alpha_c i_x \quad (5)$$

เมื่อ  $\alpha_c = (1 - \varepsilon_c)$  คือ อัตราการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z โดยที่  $\varepsilon_c$  คือ ความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z และ  $\pm$  เป็นเครื่องหมายที่แสดงถึงชนิดของวงจรย่อย OC แบบบวก (OC $\oplus$ ) และวงจรย่อย OC แบบลบ (OC $\ominus$ ) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอ

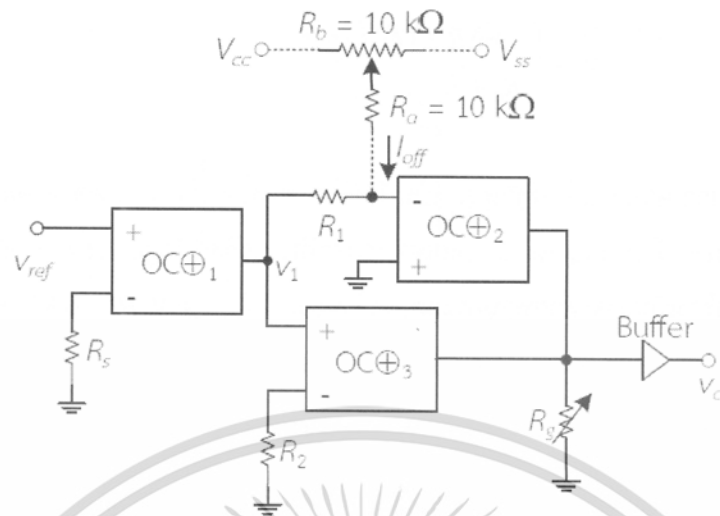


Figure 5-Proposed linearization circuit

เพื่อลดข้อจำกัดอันเนื่องมาจากค่าความต้านทาน  $R_x$  ของวงจรเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานดัง Figure 3 ในบทความวิจัยนี้จึงได้นำเอาวงจรรอย OC มาใช้แทนวงจรสายพานกระแส เพื่อพัฒนาเป็น วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นสำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดียวดังแสดงใน Figure 5 นอกจากนี้ได้มีการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้  $R_g$  และ  $R_b$  เพื่อปรับแต่งวงจรให้อยู่ในสภาวะสมดุล และ ใช้ประโยชน์จากไอซีสำเร็จรูป AD844 ที่มีลัทธิบัฟเฟอร์แรงดันเอาต์พุตอยู่ภายใน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ วงจรบัฟเฟอร์เพิ่มที่ภาคเอาต์พุต เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรใน Figure 5 จะได้ว่า

$$v_o = (1 - \epsilon_c) R_g \left( \frac{(1 - \epsilon_c) k v_{ref}}{(1 + k) R_s + R_x} \left( \frac{(1 + k) R_1 + R_x}{(1 + k) R_2 + R_x} - 1 \right) + \frac{k v_{off.op}}{(1 + k) R_2 + R_x} - I_{off} \right) \quad (6)$$

เมื่อ  $k$  และ  $v_{off.op}$  คือ ค่าอัตราขยายสำหรับสัญญาณความถี่ต่ำ และค่าแรงดันออฟเซตของออปแอมป์ ตามลำดับ ถ้า  $k = 10^5$  และ  $R_x = 50 \Omega$  และกำหนดให้  $R_1 = R_0 \pm \Delta R$  และ  $R_2 = R_0$  จะเขียนสมการใหม่ ได้ว่า

$$v_o = (1 - \epsilon_c) R_g \left( \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \frac{(1 - \epsilon_c) v_{ref}}{R_s} + \frac{v_{off.op}}{R_0} - I_{off} \right) \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) พบว่า ค่าแรงดันออฟเซต  $v_{off.op}$  และความคลาดเคลื่อนของค่าเอาต์พุต  $v_o$  สามารถ ชดเชยได้ด้วยวิธีการปรับค่ากระแสจากภายนอก  $I_{off}$  และการปรับแต่งค่าความต้านทาน  $R_g$  ตามลำดับ ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ที่ได้ภายหลังการชดเชยคือ ค่าที่แน่นอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = \left( \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) \left( \frac{R_g}{R_s} \right) v_{ref} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) แสดงให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอใน Figure 5 สร้างสัญญาณเอาต์พุต  $v_o$  ที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ  $\Delta R$  เมื่อนำไปใช้ในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว

### ผลการเลียนแบบการทำงานและผลการทดลอง

เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรที่ได้นำเสนอใน Figure 5 เทียบกับวงจรใน Figure 3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ด้วยการใช้อิซึสำเร็จรูป AD844 และ LM358 สำหรับวงจรถ่ายพานกระแสและออปแอมป์ตามลำดับ โดยจำลองการเชื่อมต่ออาร์ทีดีแบบ Pt100 ด้วยการกำหนดค่า  $R_0 = 100 \Omega$  พร้อมทั้งได้กำหนดค่า  $v_{ref} = 5 \text{ V}$  และ  $R_s = 5 \text{ k}\Omega$  ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ใช้เพียงวงจรถ่ายพานกระแสใน Figure 3 และวงจรที่นำเสนอใน Figure 5 สามารถสรุปได้ดัง Table 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ใช้เพียงวงจรถ่ายพานกระแสมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 20% ในขณะที่วงจรจัดการสัญญาณที่นำเสนอมีค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตต่ำกว่า 1.5% นอกจากนี้ การวิเคราะห์วงจรทางทฤษฎีและผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอยังได้รับการยืนยันด้วยผลการทดลองจากการต่อวงจรจริงดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งเห็นได้ว่า วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นที่นำเสนอมีฟังก์ชันการทำงานที่ถูกต้อง

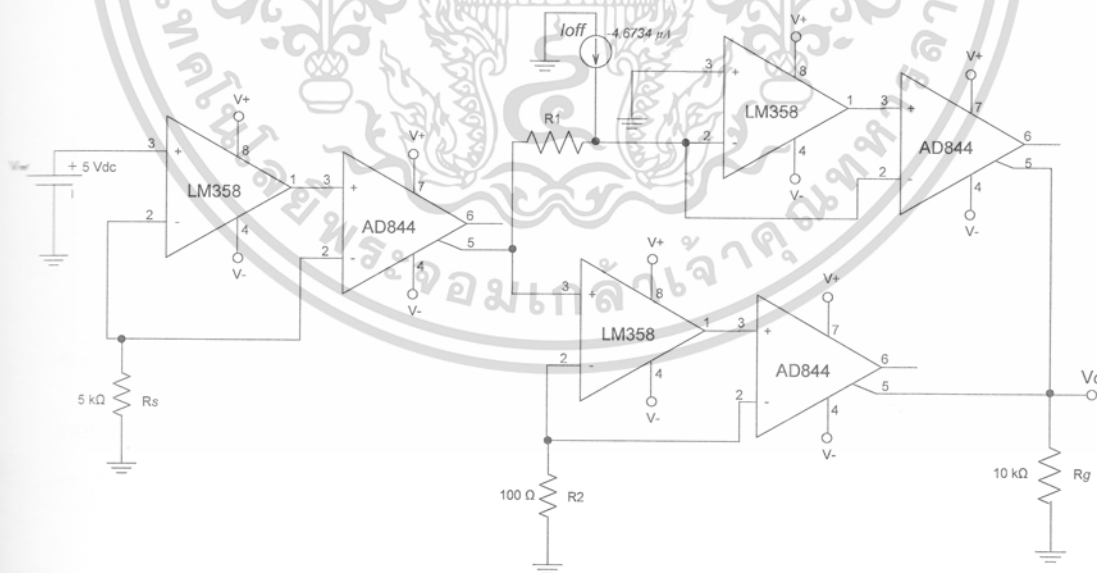


Figure 6 Detail Schematic for Proposed linearization circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Simulation results for Pt100

R1	X	Ideal	Scheme of Figure 3 (with offset compensation)		Scheme of Figure 5 (with offset compensation)		Scheme of Figure 5 (with offset and gain compensations)	
			$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)	$v_o$ (V)	Error (%)
125	-0.25	-2.5	-1.9693	-21.228	-2.4630	-1.480	-2.5000	-0.000
120	-0.20	-2.0	-1.5808	-20.960	-1.9704	-1.480	-2.0000	-0.000
115	-0.15	-1.5	-1.1895	-20.700	-1.4778	-1.480	-1.5000	-0.000
110	-0.10	-1.0	-0.7955	-20.450	-0.9851	-1.490	-1.0000	-0.000
105	-0.05	-0.5	-0.3990	-20.200	-0.4927	-1.483	-0.5000	-0.000
115	0.00	0.0	-0.000005	-0.0005	0.000002	0.0002	0.00000	0.0002
100	0.05	0.5	0.4015	-19.700	0.4926	-1.482	0.49998	-0.004
95	0.10	1.0	0.8052	-19.480	0.9852	-1.482	1.0000	-0.000
90	0.15	1.5	1.212	-19.200	1.4778	-1.480	1.5000	-0.000
85	0.20	2.0	1.6194	-19.030	1.9704	-1.480	2.0000	-0.000
80	0.25	2.5	2.0295	-18.820	2.4629	-1.484	2.5000	-0.000



Figure 7 DC transfer characteristics of the proposed circuit with only offset correction.

สรุป

วงจรจัดการสัญญาณเชิงเส้นสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ มีจุดเด่นในด้านโครงสร้างของวงจรที่เรียบง่าย ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในท้องตลาดในการออกแบบ และมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานต่ำ ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองสามารถยืนยันได้ถึงควมมีประสิทธิภาพของวงจรที่ได้นำเสนอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- 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), 2010, pp.1985-1990.
- J. Samitier, M. P. Vidal, S. A. Bota, C. Rubio, S. K. Siskos, and T. Laopoulos, "A Current-mode Interface Circuit for A Piezoresistive Pressure Sensor", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 47, No. 3, 1998, pp. 708-710.
- P. Julsereewong, A. Julsereewong, and J. Waeophet, "Operational Conveyor-based Interface Circuit for Single Resistive Sensors", ECTI-CON 2011, pp.102-105.
- 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, 2000, pp. 1277-1284.
- S. J. Gift, "Hybrid Current Conveyor-Operational Amplifier Circuit", Int. J. of Electron., Vol. 88, No. 12, 2001, pp. 1225-1235
- T. L. Floyd, Electric Circuits Fundamentals, Pearson Education International, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวัชรินทร์ นอกระโทก
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 9 ตุลาคม 2528
ที่อยู่	108/134 ม.7 ต.ทับมา อ.เมือง จ.ระยอง 21000 โทร. 085-763-6711
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2550 และในปีการศึกษา 2552 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้