



เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินอย่างง่าย สำหรับการใช้ในปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี

Measuring Tool and Simple Lock-In Amplifier for Undergraduate Physics Laboratory

ปรเมศวร์ อ่อนน้อม¹, จุฑาภรณ์ วรรณภูมิ¹, ทวี ฉิมอ้อย², มนุ เพื่องฟู² และสายันท์ พุดวัตน์²

Paramate Onnom¹, Jutaporn Wannaphum¹, Tawee Chim-oye², Manu Fuangfoong²
and Sayan Pudwat²

¹ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ศูนย์รังสิต

¹ Graduate student, Department of Physics, Faculty of Science and Technology,
Thammasat University, Rangsit Center.

² อาจารย์ประจำ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี

² Academic, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Rangsit Campus.

*Corresponding author, E-mail: paramate.tu@windowslive.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-In Amplifier: LIA) อย่างง่าย สำหรับปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี โดยการออกแบบและสร้างเครื่องวัดอย่างง่ายจะใช้อุปกรณ์จำนวนไม่มากในราคาสุทธิต่ำกว่า 3,000 บาท วงจรที่ออกแบบใช้ชิพวงจรรวมเบอร์ AD630 ของบริษัท Analog Device เป็นไอซีพื้นฐานในการทำงาน โดยมีความสามารถในการผสมและแยกสัญญาณไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับเฟส นอกจากนี้วงจรที่ได้ออกแบบยังประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบปรับอัตราขยาย วงจรเลื่อนเฟส 90 องศา และวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ โดยในเบื้องต้นได้นำวงจรที่ออกแบบมาวัดความต้านทานของหลอดทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.315 มิลลิเมตร ที่ความยาวค่าต่าง ๆ โดยค่าที่ได้นำมาเทียบกับเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอลมาตรฐาน ยี่ห้อ PICOTEST รุ่น M3500A พบว่าการวัดที่ได้มีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนของค่าต่ำสุดและสูงสุดตลอดเส้นแนวโน้มเท่ากับ 0.007% และ 7.366% ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย (R^2) เท่ากับ 0.9995 ของค่าความต้านทานที่วัดได้กับความยาวของเส้นหลอดทองแดง

คำสำคัญ: วงจรขยายสัญญาณ, วงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน, วงจรตรวจจับเฟส, วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ, เครื่องวัดและวงจรขยายสัญญาณ

Abstract

In this work, a simple lock-in amplifier (LIA) that suitable for using in the undergraduate Physics laboratory was investigated. Our designed concept was that the instrument should be easy to construct, used a few components and the total cost was less than 3,000 Bath. This designed circuit was based on the AD630 modulator of Analog Device which can mix and demodulate signal for phase detector. Moreover, the constructed circuit consisted of adjustable amplifier, 90-degree phase shift and 2nd order low pass filter. At first, the constructed circuit was used for measurement resistance of copper wire with diameter of 0.315 mm. and various lengths. The result of resistance from constructed circuit was compared to standard digital multimeter brand PICOTEST with model of M3500A. The results showed that percentage errors of the maximum and minimum were 7.366% and 0.007%; respectively. The coefficient determination (R^2) was 0.9995 for measured resistance with various lengths of the copper wire.

Keywords: Pre-Amplifier, Lock-In Amplifier, Phase detector, 2nd order Low pass filter, Measuring tool and amplifier.

บทนำ

ในงานวิจัยทางด้านฟิสิกส์สมัยใหม่มักเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมาก โดยสัญญาณนั้น อาจถูกบดบังไปด้วยสัญญาณรบกวนที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ไม่สามารถกำจัดออกได้ ซึ่งตรวจพบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อกทั่วไป (Emmanuel O., Alfredo C., & David E., 2018), (Y. Abd Djawad, J. Kiely, P. Wraith, & R. Luxton, 2014), (Yanli L., & Rui Z., 2012), (Libbrecht, Black & Hirata, 2003) การสร้างเครื่องมือตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการศึกษา สำหรับนักศึกษาสาขาฟิสิกส์ ในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับชั้นปีที่ 2 หรือสูงขึ้นไป ให้มีความทันสมัย มีความแม่นยำ และยังมีจำนวนเพียงพอต่อนักศึกษา ซึ่งในมหาวิทยาลัยอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของราคางานวิจัยนี้จึงมีความพยายามในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดที่มีความทันสมัย และมีความแม่นยำสูงขึ้น

ยกตัวอย่างการทดลองในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ เช่น การวัดความต้านทานของทองแดง ที่มีค่าน้อย การวัดความต่างเฟสของปรากฏการณ์ฟาราเดย์และปรากฏการณ์เคอร์ เป็นต้น ซึ่งดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบพกพาในห้องปฏิบัติการจะไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็กและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก (Emmanuel O., Alfredo C., & David E., 2018), (Y. Abd Djawad, J. Kiely, P. Wraith, & R. Luxton, 2014) เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-In Amplifier; LIA) เป็นทางเลือกที่จะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง มีความแม่นยำ และมีสัญญาณรบกวนต่ำ สามารถตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าได้ทั้งแบบอนาล็อกและดิจิตอล

(Stanford Research Systems, 2022), (Carrato, Paolucci, Tommasini, & Rosei, 1989) ดังนั้น เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอิน จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมาก สำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาและงานวิจัยของมหาวิทยาลัย (de Graaf & Wolffenbuttel, 2012) อย่างไรก็ตาม เครื่องวัดดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูงอยู่ในหลักหลายแสนบาท (G. A. Stimpson, M. S. Skilbeck, R. L. Patel, B. L. Green, & G. W. Morley, 2019) สำหรับในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี ที่มีการวัดสัญญาณไฟฟ้าอยู่ในระดับไมโครโวลต์ และมีสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับมิลลิโวลต์นั้น ยังไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่มีราคาสูงอย่างในระดับทำงานวิจัย งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและนำวงจรรวม (IC) เช่น ออปแอมป์ชนิดทั่วไป (General Purpose Op-Amp) อุปกรณ์ตัวขยายสัญญาณ (Instrumentation Amplifier) และชิพวงจรรวมที่มีความไวต่อการตรวจจับเฟส (Phase Sensitive Detector Chip) มาประกอบเป็นเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินอย่างง่ายในราคาถูก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ โดยมีการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกันทั้งหมด 4 วงจรสำคัญ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสามารถหาซื้อได้ง่ายในร้านอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปในประเทศไทย และมีราคาไม่แพง เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สำหรับการนำไปใช้ในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี โดยเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น ยังสามารถนำไปพัฒนาและสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถตรวจวัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนโวลต์ได้ เพื่อใช้งานวิจัยในระดับสูงต่อไป

เครื่องมือ ทฤษฎีเบื้องต้น และวงจรที่ออกแบบ

เครื่องมือ

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล MCP lab electronics รุ่น SG1003, เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล (Digital Storage Oscilloscope) ยี่ห้อ GW INSTEK รุ่น GDS-1102A-U, เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล ยี่ห้อ MYOUNG รุ่น DM4500A และ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลมาตรฐาน ยี่ห้อ PICOTEST รุ่น M3500A

ทฤษฎีเบื้องต้น

ในการตรวจวัดสัญญาณแบบล็อกอินด้วย LIA นั้น จำเป็นต้องให้สัญญาณอ้างอิงกับ LIA เช่นกรณีสัญญาณที่จะตรวจวัด (V_m) มีสมการดังนี้คือ

$$V_m = V_{sig} \sin(\omega t + \theta_{sig}) \quad (1)$$

เมื่อ $V_{sig}, \omega, \theta_{sig}$ เป็นแอมพลิจูด, ความถี่เชิงมุมและเฟสของสัญญาณที่จะวัด ตามลำดับ โดยเมื่อได้รับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอก LIA จะสร้างสัญญาณอ้างอิงภายในขึ้นมาอีกสัญญาณหนึ่ง โดยอาศัยเทคนิคการล็อกเฟสแบบป้อนกลับ (Phase Locked Loop) เพื่อใช้ในการล็อกสัญญาณที่สร้างขึ้นกับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอก ทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงภายใน (V_{ref}) ดังนี้

$$V_{ref} = V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref}); V_{psd} = V_m V_{ref} \quad (2)$$

เมื่อ $V_L, \omega_L, \theta_{ref}$ เป็นแอมพลิจูด, ความถี่เชิงมุมและเฟสของสัญญาณอ้างอิง ตามลำดับ จากนั้นวงจรตรวจจับความต่างเฟส (Phase Sensitive detector: PSD) จะทำการคูณสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ ที่ตรวจวัด ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็น

$$V_{psd} = V_{sig} V_L \sin(\omega t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \quad (3)$$

เมื่อ V_{psd} เป็นเอาต์พุตของ PSD ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับสองสัญญาณ โดยเป็นสัญญาณผลต่างของความถี่ $(\omega - \omega_L)$ หนึ่งสัญญาณ และอีกสัญญาณคือผลรวมของความถี่ $(\omega + \omega_L)$ โดยเมื่อเอาต์พุตของ PSD ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำให้เหลือแต่สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นสัญญาณผลต่างของความถี่ $(\omega - \omega_L)$ และถ้า $\omega = \omega_L$ จะทำให้เอาต์พุตของ PSD ที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วมีค่าเป็น

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \quad (4)$$

เอาต์พุตของ PSD เป็นสัดส่วนของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต $V_{sig} \cos(\theta)$ โดยที่ $\theta = \theta_{sig} - \theta_{ref}$ ซึ่งเป็นความต่างเฟสระหว่างสัญญาณที่ตรวจวัดกับสัญญาณอ้างอิงของ LIA ในกรณีที่ $\theta = 0$ จะได้เอาต์พุตเท่ากับ V_{sig} แต่เมื่อ $\theta = 90^\circ$ จะไม่มีเอาต์พุตออกมาจาก LIA

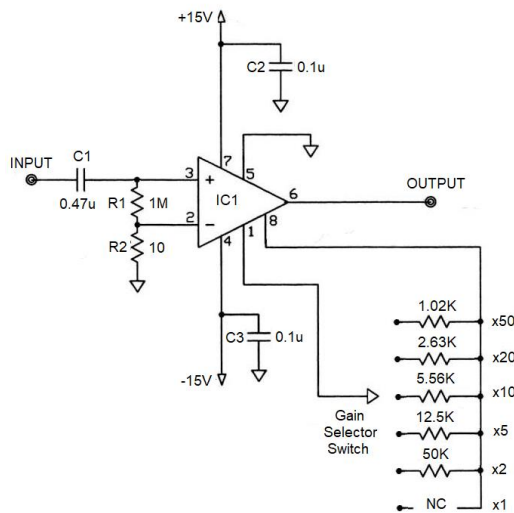
วงจรที่ออกแบบและสร้าง

เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินซินิดเฟสคู่ที่ได้ออกแบบและสร้างประกอบด้วย 4 วงจรทำงานร่วมกัน คือ

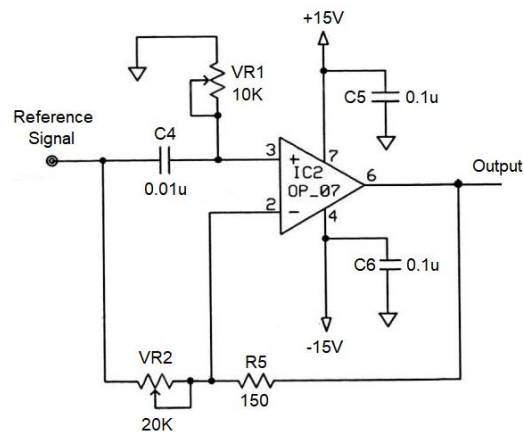
1) วงจรขยายสัญญาณ (Pre-Amplifier: PA) โดยใช้ IC1 ดังรูปที่ 1 เป็นอุปกรณ์ตัวขยายสัญญาณโดยเลือกใช้ออปแอมป์ เบอร์ INA114 เนื่องจากมีราคาต่ำ และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี โดยสามารถหาค่าอัตราขยายสัญญาณ ได้จากสมการที่ 5

$$GAIN = 1 + \frac{50K}{R_G} \quad (5)$$

เมื่อ R_G คือค่าความต้านทานที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณทั้งหมด 6 ค่า คือ 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 เท่า



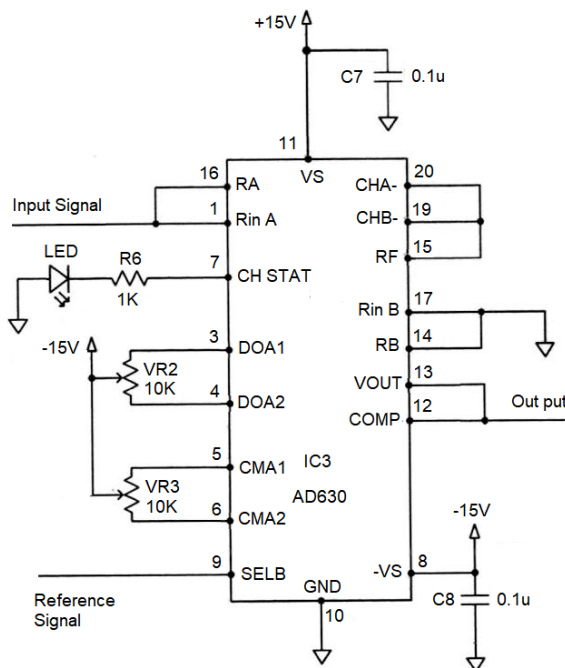
รูปที่ 1 วงจรขยายสัญญาณ



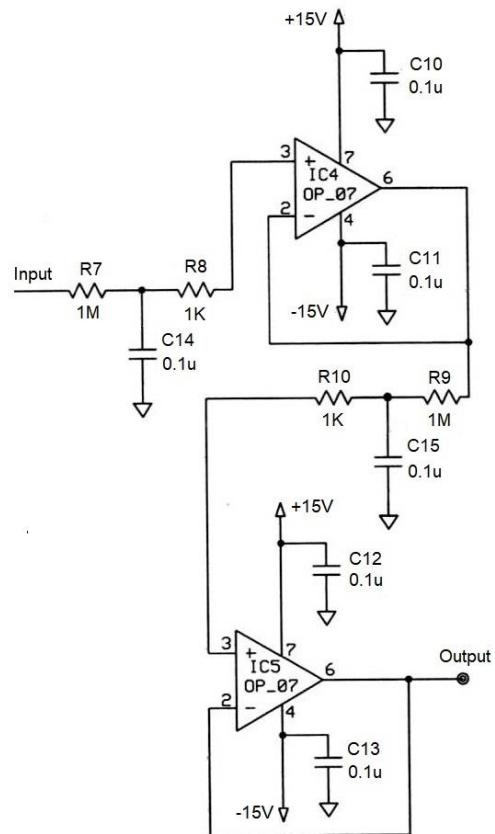
รูปที่ 2 วงจรเลื่อนเฟส

2) วงจรเลื่อนเฟส โดย IC2 ในรูปที่ 2 เป็น Operational Amplifier จะเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP07 โดย VR1 และ VR2 ในรูปที่ 2 เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ที่ใช้ในการกำหนดค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุต และแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 90 องศา และแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าสัญญาณอินพุตเท่ากับ 10 เท่า

3) วงจรตรวจจับความต่างเฟส (Phase Sensitive detector: PSD) IC3 ในรูปที่ 3 จะเลือกใช้ชิพวงจรรวมของบริษัท Analog Device เบอร์ AD630 ซึ่งมีคุณสมบัติในการตรวจจับความต่างเฟส โดยวงจรตรวจจับความต่างเฟสจะทำหน้าที่ตรวจจับและล็อกสัญญาณระหว่างสัญญาณอินพุต ที่ขา 1 กับสัญญาณอ้างอิง ที่ขา 9 ที่มีความถี่ตรงกัน จากนั้นชิพจะผสมและขยายสัญญาณทั้งสอง จึงได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา ที่ขา 13 ที่เชื่อมต่อกับขา 12 (COMP)



รูปที่ 3 วงจรตรวจจับความต่างเฟส



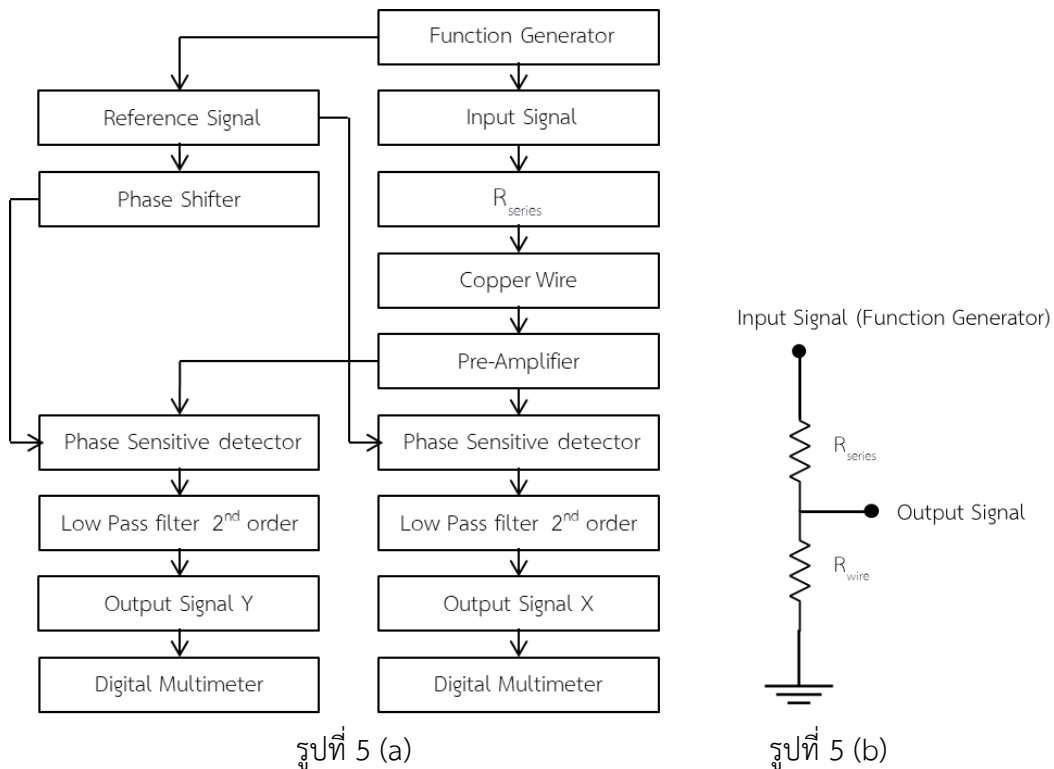
รูปที่ 4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ

ในการกำหนดสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Function Generator) และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลื่อนเฟส จะเป็นสัญญาณอ้างอิงที่เชื่อมต่อกับขา 9 (SELB) ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 ของวงจรตรวจจับความต่างเฟส แสดงในรูปที่ 3 และ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ จะเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรตรวจจับความต่างเฟส แสดงในรูปที่ 3

4) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ (2nd order low pass filter)

โดย IC4 และ IC5 ในรูปที่ 4 เป็น Operational Amplifier จะเลือกใช้โอปแอมป์ เบอร์ OP07 โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำหน้าที่ตัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ออกจากสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับความต่างเฟส ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะกำหนดค่าตัวต้านทาน R7, R8 และตัวเก็บประจุ C14 ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่หนึ่ง และกำหนดค่าตัวต้านทาน R9, R10 และตัวเก็บประจุ C15 ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่สอง เพื่อให้ได้ค่า cut-off frequency น้อยที่สุด โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับความต่างเฟส จะเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แสดงในรูปที่ 4 และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะตรวจวัดค่าด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอล ยี่ห้อ MYOUNG รุ่น DM4500A และ PICOTEST รุ่น M3500A

5) แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ สำหรับการวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง

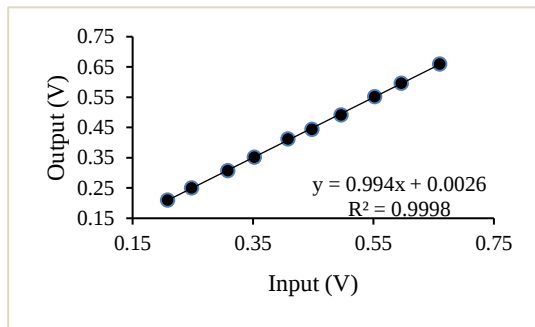


รูปที่ 5 (a) แผนภาพการวัดความต้านทานลวดทองแดงของวงจรวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ และ (b) วงจรร่วมสำหรับการวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง

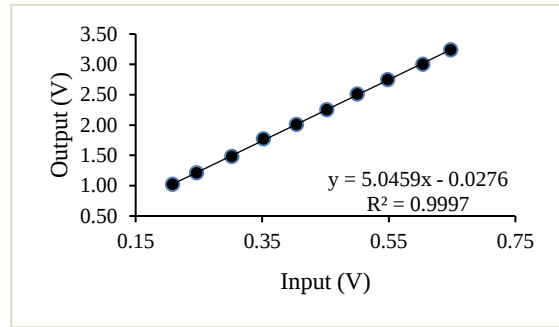
แผนภาพการวัดสัญญาณ แสดงในรูปที่ 5 (a) โดยในการวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณ จึงเลือกใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ ในโหมดเฟส X แคเพียเฟสเดียว และการวัดสัญญาณเอาต์พุตผ่านวงจรแบ่งแรงดัน โดย R_{series} เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า และ R_{wire} เป็นความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะกำหนดค่า R_{series} ให้มีค่ามากกว่า R_{wire} เท่ากับ 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 5 (b)

ผลการทดลอง

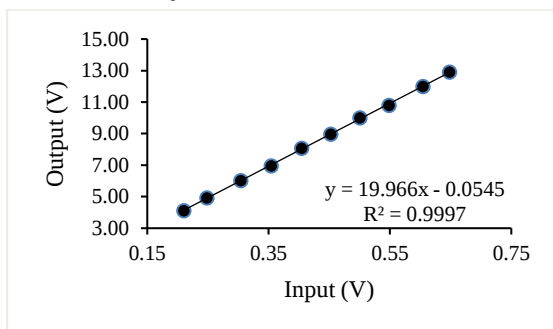
1. วงจรขยายสัญญาณ เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุต 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650 mV โดยกำหนดค่าความถี่ 1 kHz พบว่าสามารถขยายสัญญาณทั้งหมด 6 ค่าได้แก่ 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 เท่า ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะแสดงให้เห็น 4 ค่า คือ 1, 5, 20 และ 50 เท่า ดังรูปที่ 6 (a), (b), (c), (d)



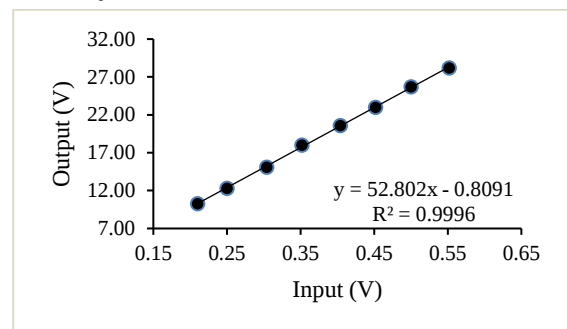
รูปที่ 6 (a) อัตราขยาย 1 เท่า



รูปที่ 6 (b) อัตราขยาย 5 เท่า

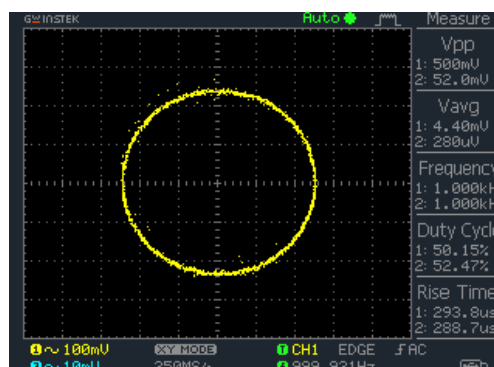


รูปที่ 6 (c) อัตราขยาย 20 เท่า



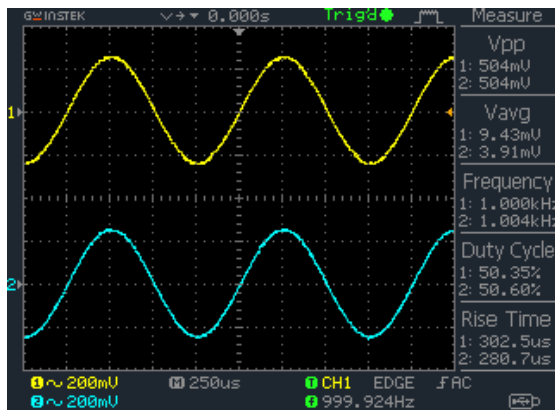
รูปที่ 6 (d) อัตราขยาย 50 เท่า

2. วงจรเลื่อนเฟส จากการปรับค่าเลื่อนเฟสและแอมพลิจูด พบว่าสามารถปรับค่าเลื่อนเฟสได้ตั้งแต่ 0-180 องศา จากการปรับค่าเลื่อนเฟส 90 องศา และแอมพลิจูดให้มีขนาดลดลง 10 เท่า โดยค่าความถี่ 1 kHz พบว่าสามารถเลื่อนเฟสได้ 90 องศา และแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต 500 mV มีขนาดลดลงได้สัญญาณเอาต์พุต 52 mV แสดงในรูปที่ 7 ตรวจวัดค่าด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอล (Digital Storage Oscilloscope) ยี่ห้อ GW INSTEK รุ่น GDS-1102A-U ช่อง 1 คือ สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรเลื่อนเฟส และช่อง 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตออกจากวงจรเลื่อนเฟส

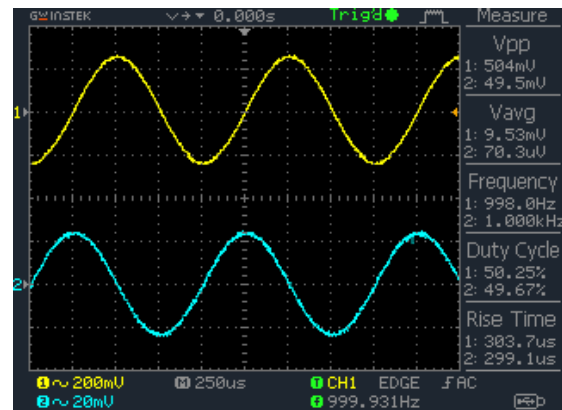


รูปที่ 7 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลื่อนเฟส ในโหมด XY

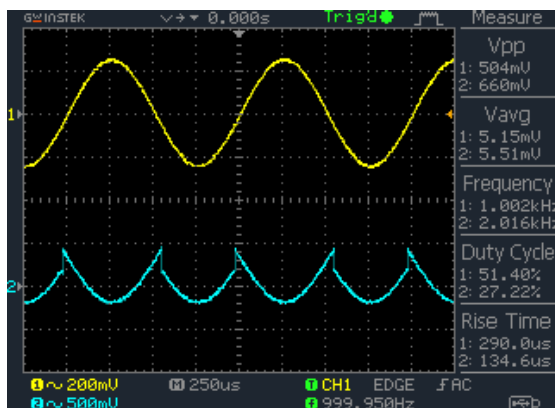
3. วงจรตรวจจับความต่างเฟส จากการตรวจจับความต่างเฟส โดยการเลือกใช้ชิพวงจรรวมเบอร์ AD630 สามารถตรวจจับความต่างเฟสได้ เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุต, สัญญาณอ้างอิง และสัญญาณเอาต์พุต แสดงในรูปที่ 8 ดังต่อไปนี้



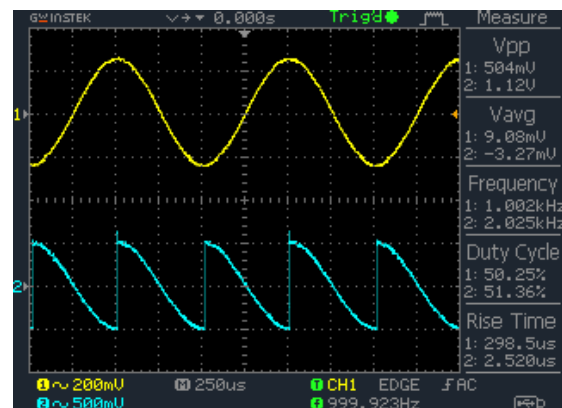
รูปที่ 8 (a)



รูปที่ 8 (b)



รูปที่ 8 (c)



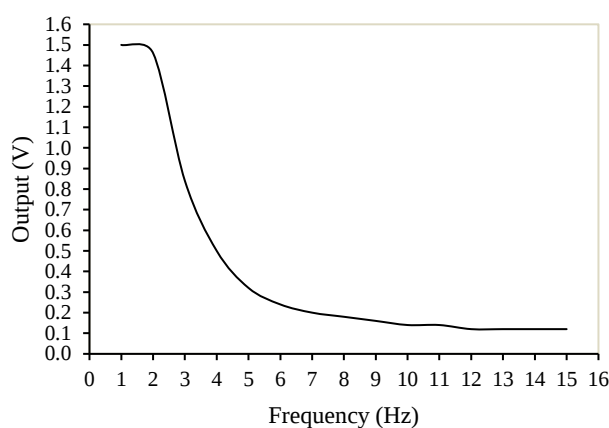
รูปที่ 8 (d)

รูปที่ 8 (a) สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงที่เฟสตรงกัน (b) สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงที่ต่างกัน 90 องศา (c) สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับความต่างเฟสกรณีเฟสตรงกัน (d) สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับความต่างเฟสกรณีเฟสต่างกัน 90 องศา

รูปที่ 8 (a) ช่อง 1 สีเหลือง คือ สัญญาณอินพุต ก่อนเข้าวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 1 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 ช่อง 2 สีฟ้า คือ Reference Signal ก่อนเข้าวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 9 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 โดยไม่มีความต่างเฟส ในขณะที่ รูปที่ 8 (b) เป็นสัญญาณ เอาต์พุตออกจากวงจรเลื่อนเฟส หรือ Reference Signal ก่อนเข้าวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 9 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 โดยมีความต่างเฟส 90 องศา

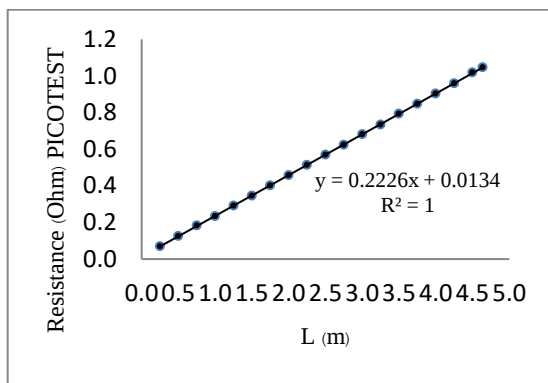
รูปที่ 8 (c) ช่อง 1 สีเหลือง คือ สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 1 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 ช่อง 2 สีฟ้า คือ สัญญาณเอาต์พุตออกจากวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 12-13 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 กรณีสเฟสตรงกัน รูปที่ 8 (d) เป็นสัญญาณ Output ออกจากวงจรตรวจจับความต่างเฟส ที่ขา 12-13 ของชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 กรณีมีความต่างเฟส 90 องศา

4. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ เมื่อกำหนดสัญญาณอินพุตที่ 1,500 mV โดยกำหนดค่าความถี่ตั้งแต่ 1-100 Hz พบว่าวงจรสามารถกรองค่าความถี่ต่ำ โดยมีค่า cut-off frequency อยู่ที่ประมาณ 3 Hz ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอล ยี่ห้อ MYOUNG รุ่น DM4500A โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ จะอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และ ไม่มีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับหลงเหลืออยู่เลย

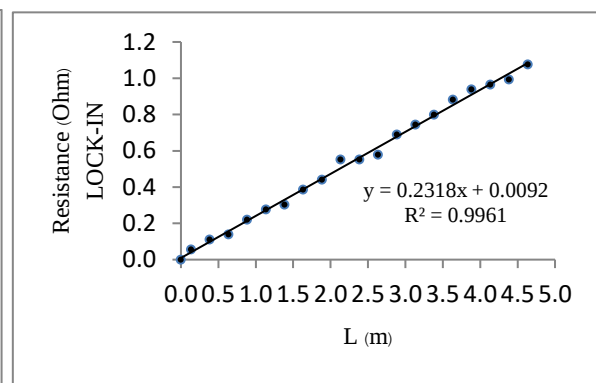


รูปที่ 9 เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ

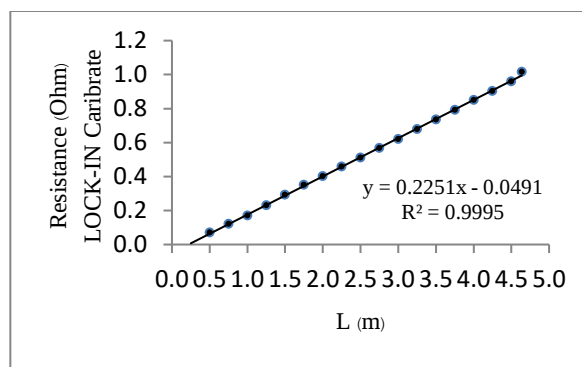
5. การวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง การวัดค่าความต้านทานด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุต 500 mV โดยค่าความถี่ 1 kHz ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Function Generator) ยี่ห้อ MCP รุ่น SG1003 ให้กับวงจรวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้เส้นลวดทองแดง เบอร์ SWG 30 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.315 mm โดยค่าสัญญาณเอาต์พุตออกจากวงจร จะตรวจวัดค่าด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ (เฟส X) อัตราขยาย 1 เท่า และค่าสัญญาณเอาต์พุตออกจากวงจร จะตรวจวัดค่าด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอล ยี่ห้อ MYOUNG รุ่น DM4500A ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 (a)



รูปที่ 10 (b)



รูปที่ 10 (c)

รูปที่ 10 (a) ความต้านทานเส้นลวดทองแดงที่วัดได้จากเครื่องวัด PICOTEST (b) ความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ที่วัดด้วยวงจรมหาสัญญาณแบบล็อกอินซินิดเฟสคู่ (เฟส X) โดยวิธีวัดตรง (c) ความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยวงจรมหาสัญญาณแบบล็อกอินซินิดเฟสคู่ (เฟส X) โดยวิธี Calibration

จากรูปที่ 10 (a) คือความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกับความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอลมาตรฐาน ที่ยี่ห้อ PICOTEST รุ่น M3500A พบว่ากราฟมีแนวโน้มความเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบายเท่ากับ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้เป็นค่ามาตรฐาน รูปที่ 10 (b) คือความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกับความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยวงจรมหาสัญญาณแบบล็อกอินซินิดเฟสคู่ (เฟส X) โดยวิธีวัดตรง พบว่ากราฟมีแนวโน้มความเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบายเท่ากับ 0.9961 รูปที่ 10 (c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกับความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยวงจรมหาสัญญาณแบบล็อกอินซินิดเฟสคู่ (เฟส X) โดยวิธี Calibration โดยการเลือกใช้แรงดัน เพื่อนำไปหาสมการแนวโน้มเชิงเส้น จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความต้านทานของเส้นลวดทองแดง และแรงดันที่เหลือจะถูกแทนค่าลงในสมการแนวโน้มเชิงเส้นที่ได้ เพื่อนำไปวัดหาความต้านทานของเส้นลวดทองแดง จากความสัมพันธ์ระหว่าง

ความยาวกับความต้านทานของเส้นลวดทองแดง โดยวิธี Calibration พบว่ากราฟมีแนวโน้มความเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบายเท่ากับ 0.9995

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณและตรวจวัด เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุตในช่วง 200-650 mV และกำหนดค่าความถี่ 1 kHz พบว่าสามารถขยายสัญญาณทั้งหมด 6 ค่าได้ คือ 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 เท่า ที่ค่าค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย มากกว่า 0.9995 ทุกค่า กรณีกังจรเลื่อนเฟส สามารถปรับเลื่อนเฟสได้ โดยกรณีปรับค่าเลื่อนเฟส 90 องศา แอมพลิจูดมีขนาดลดลง 10 เท่า วงจรตรวจจับความต่างเฟส โดยการเลือกใช้ชิพวงจรรวม เบอร์ AD630 สามารถตรวจจับความต่างเฟสได้ ทั้งกรณีเฟสตรงกัน และมีเฟสต่างกัน วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ 2 อันดับ เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุต ในช่วงค่าความถี่ 1-100 Hz พบว่าวงจรสามารถกรองค่าความถี่ต่ำได้ โดยมีค่า cut-off frequency อยู่ที่ประมาณ 3 Hz ซึ่งวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ยังสามารถนำไปพัฒนาวงจรและปรับปรุงระบบการตรวจวัด ยกตัวอย่างเช่น ไอซีที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และปรับปรุงจุดเชื่อมต่อต่างๆต่อภายในวงจรและระบบตรวจวัด เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนและปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้น เพื่อให้สามารถตรวจวัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับนาโนโวลต์ได้

การวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอินของเส้นลวดทองแดง เบอร์ SWG 30 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.315 mm ที่ความยาวค่าต่าง ๆ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้ารวมสูงสุด 1 โอห์ม โดยวิธีตรง และวิธี Calibration พบว่าการวัดค่าความต้านทานของเส้นลวดทองแดง ด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน โดยวิธี Calibration มีความแม่นยำมากกว่า วิธีวัดตรง เมื่อเทียบกับเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอลมาตรฐาน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดและต่ำสุดตลอดเส้นแนวโน้มเท่ากับ 7.366 และ 0.007 % ตามลำดับ โดยมีสัมประสิทธิ์การอธิบายเท่ากับ 0.9995

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี ที่สนับสนุนเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

Emmanuel O., Alfredo C., & David E. (2018). Simple and portable low frequency lock-in amplifier designed for photoacoustic measurements and its application to thermal effusivity determination in liquids. Review of Scientific Instruments 89, 034904.



- Y. Abd Djawad, J. Kiely, P. Wraith, & R. Luxton (2014). Lock-in Amplifier as a Sensitive Instrument for Biomedical Measurement : Analysis and Implementation. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol 12, no. 10, 7214-7222.
- Yanli L., & Rui Z. (2012). AD630 Lock-in Amplifier Circuit for Weak Signal. Advanced Materials Research, vol. 482-484, 975-980.
- K. G. Libbrecht, E. D. Black & C. M. Hirata (2003). A basic lock-in amplifier experiment for the undergraduate laboratory. American Journal of Physics, vol. 71, no. 11, 1208-1213,
- Stanford Research Systems. About Lock-In Amplifiers. Retrieved from <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/applicationnotes/AboutLIAs.pdf>
- Stanford Research Systems (2022). Lock-In Amplifier Basics. Retrieved from <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/applicationnotes/Lock-In%20Basics.pdf>
- Carrato, S., Paolucci, G., Tommasini, R. & Rosei, R. (1989). Versatile low-cost digital lock-in amplifier suitable for multichannel phase-sensitive detection. Review of Scientific Instruments, Vol. 60, Issue 7, 2257-2259.
- G. de Graaf & R.F. Wolffenbuttel (2012, May 13-16). Lock-in amplifier techniques for low-frequency modulated sensor applications. Organized by IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- G. A. Stimpson, M. S. Skilbeck, R. L. Patel, B. L. Green, & G. W. Morley (2019). An open-source high-frequency lock-in amplifier. Review of Scientific Instruments 90, 094701.
- ANALOG DEVICES (2011). Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier. AD620. Retrieved from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf>
- BURR-BROWN (1998). INA114. Precision INSTRUMENTATION AMPLIFIER. Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>
- ANALOG DEVICES (2011). Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier. Data Sheet OP07. Retrieved from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/op07.pdf>



ANALOG DEVICES (2016). Balanced Modulator/Demodulator, Data Sheet AD630.

Retrieved from

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad630.pdf>