

## การออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินตันทุนต่ำสำหรับการทดลองทางฟิสิกส์ในห้องปฏิบัติการระดับปริญญาตรี

นัฐชยพงศ์ ธีระตระกูล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง อำเภอห้างฉัตร

จังหวัดลำปาง 52190

อีเมลของผู้ประพันธ์บทความ: natchayapong@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินตันทุนต่ำ (Dual-Phase Lock-in Amplifier) ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี วงจรหลักประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณขั้นต้น วงจรเลื่อนเฟส และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟลำดับที่สี่ โดยใช้ไอซี AD630 เป็นองค์ประกอบสำคัญของวงจรตรวจจับเฟส ระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO รุ่น R3 และจอ LCD การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือทำโดยการวัดความถี่สั่นพ้องของวงจรอนุกรม RLC ด้วยตัวต้านทานสองค่า (30  $\Omega$  และ 100  $\Omega$ ) ผลการทดลองแสดงความแม่นยำและประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยความถี่ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าทฤษฎีน้อยกว่าร้อยละ 2 และค่ามุมเฟสคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.02 เครื่องมือนี้เหมาะสำหรับการวิจัยที่ต้องการวัดสัญญาณขนาดเล็ก อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นสื่อการสอนในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย และสามารถประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการวัดสัญญาณรบกวนต่ำ ด้วยต้นทุนที่คุ้มค่าและโครงสร้างที่สามารถปรับปรุงได้ง่าย

**คำสำคัญ:** วงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน, ตรวจจับเฟส, วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟอันดับ 4, วงจรเลื่อนเฟส, ความถี่สั่นพ้องวงจร RLC, ห้องปฏิบัติการระดับปริญญาตรี

## Construction of a Low-Cost Lock-in Amplifier for Physics Experiments in Undergraduate Laboratory

Natchayapong Teerachtragoon

*Thammasat University, Lampang Center, Hang Chat District, Lampang 52190, Thailand*

Corresponding author's e-mail: Natchayapong@hotmail.com

### Abstract

This research presents the design and construction of a cost-effective, dual-phase lock-in amplifier with a simplified architecture that is well-suited for undergraduate physics laboratory experiments. Its core circuitry comprises a pre-amplifier, a phase-shifting circuit, and a fourth-order, active, low-pass filter, utilizing the AD630 IC as the primary phase-sensitive detector. The control system incorporates an Arduino UNO R3 microcontroller and an LCD display. Performance was evaluated by measuring the resonant frequency of a series RLC circuit using two resistor values ( $30\ \Omega$  and  $100\ \Omega$ ). Experimental results demonstrated high accuracy: the measured frequency deviated by less than 2% from the theoretical values, and the phase angle error was only 0.02%. This highlights the developed circuit's precision and efficiency, making it applicable for small-signal research. Furthermore, its cost-effectiveness and modifiable design render it an ideal educational tool for university physics laboratories and for low-noise-signal measurement applications in industrial settings.

**Keywords:** Lock-in amplifier circuit, Phase detection, 4th-order active low-pass filter circuit, Phase shifter circuit, Resonance frequency of RLC circuit, Undergraduate laboratory

## บทนำ

การตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความก้าวหน้าในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองทางฟิสิกส์ที่ต้องจัดการกับสัญญาณที่มีขนาดต่ำกว่าระดับไมโครโวลต์ อาทิ การศึกษาปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในวงจร RLC หรือการวัดผลกระทบขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ [เพิ่มการอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง] อย่างไรก็ตาม สัญญาณขนาดเล็กเหล่านี้มักปนเปื้อนด้วยสัญญาณรบกวนทางความร้อนหรือสัญญาณจากสภาพแวดล้อม ทำให้เครื่องขยายสัญญาณทั่วไปไม่สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

ด้วยเหตุนี้ เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-in Amplifier: LIA) ซึ่งใช้เทคนิคการตรวจจับที่ไวต่อเฟส (Phase Sensitive Detection, PSD) จึงถูกพัฒนาขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Liu & Zhang, 2012; Park & Lee, 2015) เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษในการกรองสัญญาณรบกวนได้อย่างดีเยี่ยมและสามารถวัดสัญญาณเป้าหมายได้อย่างแม่นยำสูง แม้ว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) จะต่ำมาก

แม้ว่าเครื่อง LIA เชิงพาณิชย์จะมีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับ แต่ปัญหาหลักที่สำคัญคือราคาสูง ซึ่งเกินกว่างบประมาณของห้องปฏิบัติการในสถาบันการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับปริญญาตรี (Sengupta et al., 2005) ความท้าทายนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเรียนการสอน เนื่องจากจำกัดโอกาสให้นักศึกษาได้สัมผัสหรือลงมือปฏิบัติ (hands-on) กับเครื่องมือวัดที่มีความซับซ้อนและไวต่อสัญญาณสูง ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่มักเป็นลักษณะ "กล่องดำ" (Black Box) ทำให้นักศึกษาขาดความเข้าใจในหลักการทำงานเชิงลึก ของวงจรตรวจจับสัญญาณที่มีความไวสูง ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญในสาขาอิเล็กทรอนิกส์และฟิสิกส์

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการแก้ไขช่องว่างดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินต้นทุนต่ำ ที่มีความน่าเชื่อถือทางเทคนิคและมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ สำหรับการประยุกต์ใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ในห้องปฏิบัติการระดับปริญญาตรี การพัฒนาเครื่องมือนี้จะช่วยส่งเสริมให้สถาบันการศึกษาสามารถเข้าถึงชุดการทดลองที่ซับซ้อนได้ง่ายขึ้น และเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้นักศึกษาเรียนรู้หลักการของ Phase Sensitive Detection (PSD) ผ่านโครงสร้างวงจรที่สามารถเข้าใจและปรับปรุงต่อยอดได้ง่าย งานวิจัยนี้ได้นำเครื่อง LIA ที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้กับวงจรอนุกรม RLC เพื่อยืนยันความสามารถในการตรวจวัดพฤติกรรมเรโซแนนซ์และเฟสได้อย่างแม่นยำ (Yan, 2017; Nikzamir & Capolino, 2024)

## หลักการและทฤษฎี

### หลักการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

เครื่อง LIA ใช้ PSD เพื่อตรวจวัดสัญญาณขนาดเล็กแม้อยู่ท่ามกลางสัญญาณรบกวน โดยจะเลือกเฉพาะองค์ประกอบที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณอ้างอิง ขณะที่สัญญาณรบกวนที่เหลือถูกกรองออก (Kay, 2012; Atia & Davis, 1997) เทคนิคนี้นิยมใช้ตั้งแต่การตรวจวัดแสงระดับต่ำ (Rieke, 2003) จนถึงงานไมโครเวฟ (Lyu et al., 2025; Kestner & Kostinski, 2025)

ต่อไปนี้จะมาพิจารณาการทำงานของ LIA ในเชิงทฤษฎี โดยสมมติว่าสัญญาณที่จะตรวจวัด  $V_m$  และสัญญาณอ้างอิง  $V_{ref}$  มีสมการเป็น

$$V_{meas} = V_{sig} \sin(\omega_{sig}t + \theta_{sig}) \quad (1)$$

เมื่อ  $V_{sig}$ ,  $\omega_{sig}$  และ  $\theta_{sig}$  เป็นแอมพลิจูด ความถี่เชิงมุมและเฟสของสัญญาณที่จะวัด ตามลำดับ

$$V_{ref} = V_L \sin(\omega_{ref}t + \theta_{ref}) \quad (2)$$

เมื่อ  $V_L$ ,  $\omega_{ref}$  และ  $\theta_{ref}$  เป็นแอมพลิจูด ความถี่เชิงมุมและเฟสของสัญญาณอ้างอิง ตามลำดับ

จากนั้น วงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (Phase Sensitive Detector, PSD) จะนำสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ตรวจวัดมาคูณกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็น

$$\begin{aligned} V_{psd1} &= V_{meas}V_{ref} = V_{sig}V_L \sin(\omega_{sig}t + \theta_{sig}) \sin(\omega_{ref}t + \theta_{ref}) \\ \text{หรือ} \quad V_{psd1} &= \frac{1}{2}V_{sig}V_L \cos[(\omega_{sig} - \omega_{ref})t + (\theta_{sig} - \theta_{ref})] \\ &\quad + \frac{1}{2}V_{sig}V_L \cos[(\omega_{sig} + \omega_{ref})t + (\theta_{sig} + \theta_{ref})] \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ  $V_{psd1}$  เป็นเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (ชุดที่ 1) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “วงจร PSD ชุดที่ 1” ประกอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับสองสัญญาณ โดยสัญญาณหนึ่งจะเป็นผลต่างของความถี่  $(\omega_{sig} - \omega_{ref})$  และอีกสัญญาณจะเป็นผลรวมของความถี่  $(\omega_{sig} + \omega_{ref})$  เมื่อเอาต์พุตของวงจร PSD ชุดที่ 1 ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะทำให้เทอมที่สองของสมการหายไป จะได้

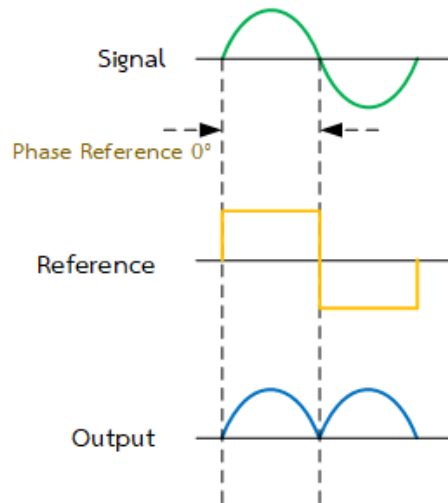
$$V_{psd1} = \frac{1}{2}V_{sig}V_L \cos[(\omega_{sig} - \omega_{ref})t + (\theta_{sig} - \theta_{ref})] \quad (4)$$

ถ้า  $\omega_{sig} = \omega_{ref}$  จะทำให้สมการ (4) มีค่าเป็น

$$V_{psd1} = \frac{1}{2}V_{sig}V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \quad (5)$$

$$\text{หรือ} \quad V_x = V_o \cos \Delta \varphi \quad (6)$$

เมื่อ  $V_o = (1/2)V_{sig}V_L$  และ  $\Delta\varphi = (\theta_{sig} - \theta_{ref})$  เป็นความต่างเฟส (phase difference) และลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PSD ชุดที่ 1 จะเป็นดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (ชุดที่ 1)

จะพบว่าสมการ (6) จะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเฟสของสัญญาณที่จะวัดตรงกันกับเฟสของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะทำให้  $\Delta\varphi = \theta_{sig} - \theta_{ref} = 0^\circ$  และสมการ (6) จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $\Delta\varphi = \theta_{sig} - \theta_{ref} = 90^\circ$  นั่นคือ ในกรณีนี้จะไม่เอาต์พุตออกมาจากวงจร PSD ชุดที่ 1

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาคำกรณีที่  $\Delta\varphi = \theta_{sig} - \theta_{ref} = 90^\circ$  จึงต้องมีวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟสอีกหนึ่งชุด ที่ใช้สัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างจากสัญญาณที่จะวัดเป็นมุม  $90^\circ$  ซึ่งกำหนดได้เป็น

$$V_{ref2} = V_L \sin(\omega_{ref}t + \theta_{ref} + 90^\circ) \quad (7)$$

จะทำให้เอาต์พุตของวงจรที่ไวต่อเฟสชุดที่สองมีค่าเป็น

$$V_{psd2} = \frac{1}{2}V_{sig}V_L \sin[(\omega_{sig} - \omega_{ref})t + (\theta_{sig} - \theta_{ref})] + \frac{1}{2}V_{sig}V_L \sin[(\omega_{sig} + \omega_{ref})t + (\theta_{sig} + \theta_{ref})] \quad (8)$$

เมื่อ  $V_{psd2}$  เป็นเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (ชุดที่ 2) หลังจากที่ได้เอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (ชุดที่ 1,2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะทำให้เทอมที่สองของสมการ (8) หายไป จะได้

$$V_{psd2} = \frac{1}{2}V_{sig}V_L \sin[(\omega_{sig} - \omega_{ref})t + (\theta_{sig} - \theta_{ref})] \quad (9)$$

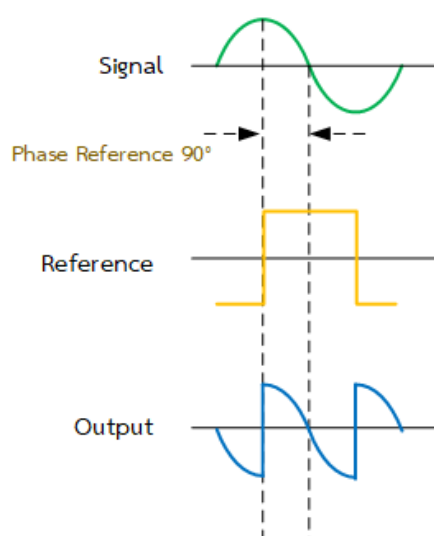
ถ้า  $\omega_{sig} = \omega_{ref}$  จะทำให้สมการ (9) กลายเป็น

$$V_{psd2} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \sin(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \quad (10)$$

หรือ

$$V_y = V_o \sin \Delta \varphi \quad (11)$$

จากสมการ (11) ค่า  $V_y$  จะเป็นศูนย์เมื่อความต่างเฟส  $\theta = 0^\circ$  ดังนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ในทุกค่าความต่างเฟส จำเป็นต้องมีสัญญาณอ้างอิงชุดที่สองซึ่งมีเฟสเลื่อน 90 องศา โดยใช้สมการ (10) ในการประมวลผล ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแสดงลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟสจากชุดอ้างอิงชุดที่สอง



ภาพที่ 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (ชุดที่ 2)

สัญญาณอ้างอิงชุดที่ 2 ถูกสร้างให้มี ความต่างเฟส 90 องศา กับสัญญาณอินพุต ทำให้ได้เอาต์พุต  $V_y$  ตามสมการที่ (11) เมื่อรวมกับผลลัพธ์จากวงจรชุดที่  $V_x$  จะคำนวณขนาดสัญญาณและความต่างเฟสได้สมบูรณ์ ดังแสดงในสมการที่ (12) และสมการที่ (13) ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟสทั้งสองชุด หาได้จาก

$$R = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (12)$$

และความต่างเฟสหาได้จาก

$$\Delta \varphi = \tan^{-1} \left( \frac{V_y}{V_x} \right) \quad (13)$$

สมการ (6) และสมการ (11) เป็นสัญญาณกระแสตรงที่แปรตามกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่วัด หลักการทำงานของวงจรตรวจจับเฟสที่ไวต่อสัญญาณ (Phase-Sensitive Detector, PSD) คือการสร้างสัญญาณกระแสตรงที่มีค่าเป็นบวกสูงสุดเมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสตรงกัน (ความต่างเฟส 0 องศา) และมีค่าเป็นลบสูงสุดเมื่อสัญญาณทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน (ความต่างเฟส 180 องศา) ในการทดสอบวงจร PSD ที่พัฒนาขึ้นนี้ เมื่อสัญญาณอินพุตมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอ้างอิง ผลการทดลองแสดงให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเฉลี่ยเป็นบวก ดังปรากฏในภาพที่ 19 ซึ่งเป็นการยืนยันการทำงานของ PSD ในสภาวะ in-phase สำหรับการวัดในเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินซินิไดเฟสคู่ เมื่อสัญญาณอินพุตมีความต่างเฟส 90 องศาจากสัญญาณอ้างอิง ผลการทดลองแสดงสัญญาณเอาต์พุตดังปรากฏในภาพที่ 20 ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการคำนวณค่าเฟสของสัญญาณอินพุต ทั้งนี้ ผลการทดลองที่นำเสนอเป็นการสาธิตและยืนยันประสิทธิภาพของวงจร PSD ในการแปลงสัญญาณกระแสสลับ (AC) เป็นสัญญาณกระแสตรง (DC) เพื่อบ่งชี้ขนาดและเฟสของสัญญาณอินพุตได้อย่างถูกต้องตามหลักการทางทฤษฎี

### วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก ดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินซินิไดเฟสคู่ (Dual-phase Lock-In Amplifier) ซึ่งมีต้นทุนต่ำ และเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี
2. เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่สร้างขึ้น โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมเรโซแนนซ์และมุมเฟสของวงจรอนุกรม RLC และเปรียบเทียบผลการวัดกับค่าทางทฤษฎี
3. เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องมือตรวจวัดสัญญาณที่มีความไวสูง และใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยและงานอุตสาหกรรมในอนาคต

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ออสซิลโลสโคปดิจิทัล ยี่ห้อ GWInstek รุ่น GDS-1072-U สำหรับวัดและแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า
2. มัลติมิเตอร์ดิจิทัล ยี่ห้อ SANWA รุ่น PC700 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า
3. เครื่องกำเนิดสัญญาณ ยี่ห้อ vantek รุ่น CA1645 สำหรับทดสอบวงจรต้นแบบ
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ QW รุ่น QW-MS3010D ขนาด 0–30 V 10 A

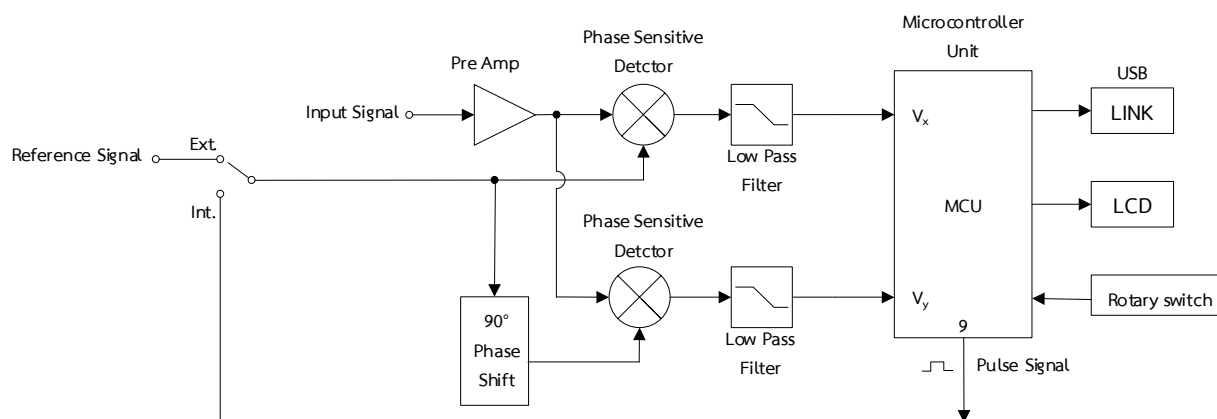
#### การออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินต้นแบบ

ประกอบด้วยส่วนหลัก 5 ส่วน ได้แก่

1. วงจรขยายสัญญาณขั้นต้น (Pre-amplifier)
2. วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter)
3. วงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (Phase-Sensitive Detector)

4. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 (4th order Low pass filter)
5. ส่วนควบคุมและแสดงผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller: MCU)

โดยวงจรรวมทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงแผนภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่

กระบวนการทำงานเริ่มต้นด้วยการเลือกแหล่งสัญญาณอ้างอิง ซึ่งอาจเป็นสัญญาณจากภายนอก (External: Ext.) หรือภายใน (Internal: Int.) โดยในกรณีที่เลือกใช้สัญญาณอ้างอิงภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นภายในตัวเอง สัญญาณอ้างอิงดังกล่าวจะถูกส่งเข้าสู่ขา 12 ของ MCU เพื่อใช้ในการกำหนดโหมดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการ์ด

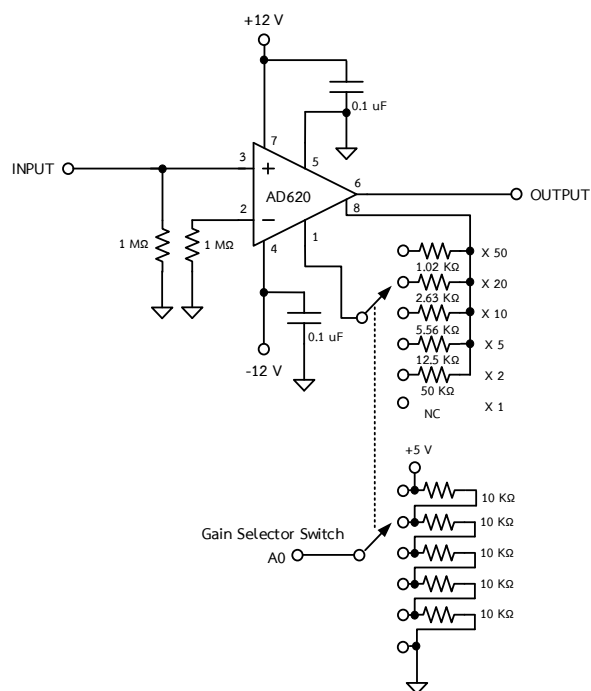
ในขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณไฟฟ้า วงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอินจะทำหน้าที่รับสัญญาณอ้างอิงร่วมกับสัญญาณขาเข้าที่ผ่านการขยายและแยกเฟสมาก่อนแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ซึ่งจะถูกส่งกลับไปยัง MCU เพื่อทำการอ่านค่า ประมวลผล และแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD

ระบบวงจรทั้งหมดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก โดยให้แรงดันไฟฟ้า +5V สำหรับบอร์ด MCU และ  $\pm 12V$  สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

### วงจรขยายสัญญาณขั้นต้น (Pre amplifier)

วงจรขยายสัญญาณขั้นต้น (Pre-amplifier) นี้ได้รับการออกแบบโดยใช้โอปแอมป์ชนิด Instrumentation Amplifier รุ่น AD620 คุณสมบัติเด่นของวงจรนี้คือความสามารถในการกำหนดอัตราขยายได้ 6 ระดับ ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4

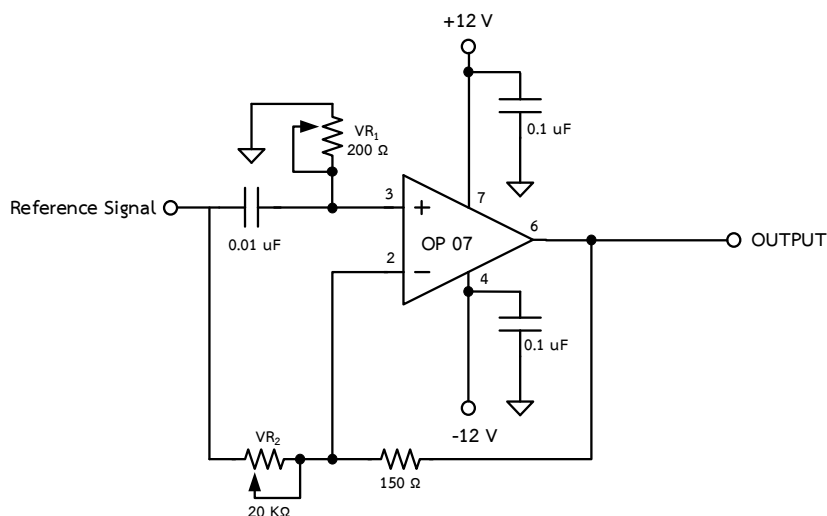
การเลือกอัตราขยายทำได้โดยการเชื่อมต่อ สวิตช์เลือกอัตราขยาย (Gain Selection Switch) เข้ากับวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) สัญญาณแรงดันที่ได้จากวงจรแบ่งแรงดันนี้จะถูกส่งเข้าสู่ขา A0 ของหน่วยประมวลผลกลาง (MCU) ทำให้ MCU อ่านค่าแรงดันดังกล่าว ซึ่งสะท้อนอัตราขยายที่เลือกไว้ได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลอัตราขยายที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูลในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 4 แสดงวงจรขยายสัญญาณขั้นต้น

### วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter)

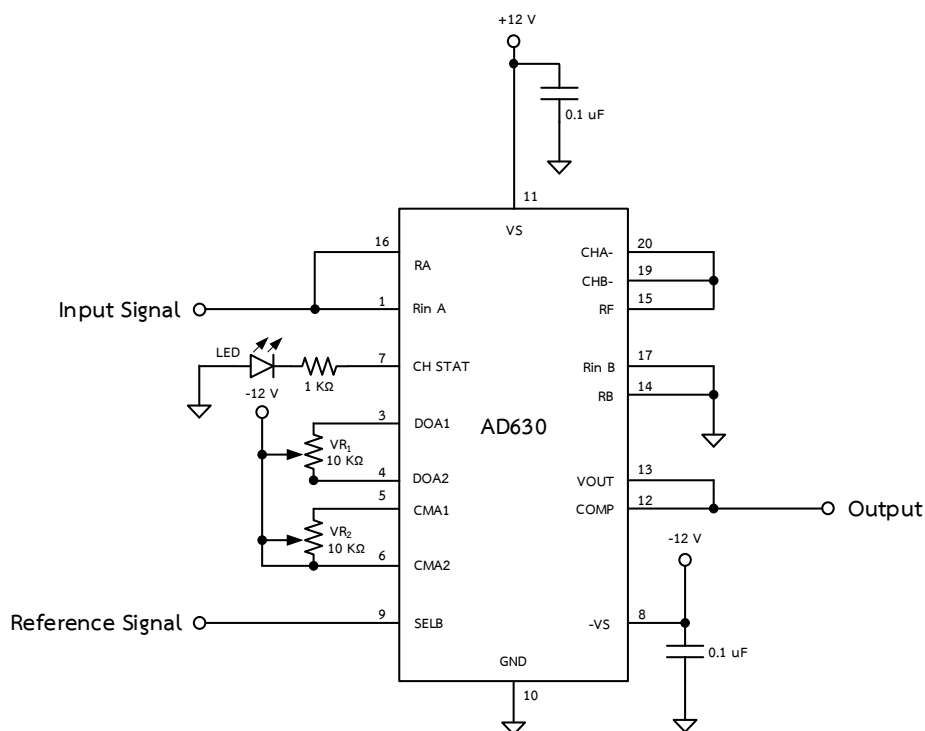
วงจรเลื่อนเฟสที่ออกแบบ (ภาพที่ 5) เป็น Active Phase Shifter โดยใช้โอปแอมป์ OP07 ทำงานแบบ All-Pass Filter ซึ่งสามารถปรับเลื่อนเฟสของสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุตโดยรักษาสัญญาณขนาดคงที่ การใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ VR1 และ VR2 ช่วยให้สามารถควบคุมค่าคงที่เวลาของเครือข่าย RC ได้อย่างละเอียด ช่วยให้สามารถปรับมุมเฟสของสัญญาณเอาต์พุตได้อย่างแม่นยำ เพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงสองชุดที่มีความต่างเฟส 90 องศา สัญญาณอ้างอิงที่เลื่อนเฟส 90 องศาจะถูกป้อนเข้าสู่ขา SELB (ขา 9) ของไอซี AD630



ภาพที่ 5 แสดงวงจรเลื่อนเฟส

### วงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส (Phase-Sensitive Detector)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชิป AD630 ของ Analog Devices ซึ่งเป็นวงจร Balanced Modulator / Demodulator ที่มีความไวสูงต่อความต่างเฟส โดยสร้างขึ้นสองชุด พร้อมติดตั้ง LED ที่ขา 7 เพื่อแสดงสถานะการทำงาน และมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขา 13 ส่งต่อเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำสำหรับประมวลผลต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 6

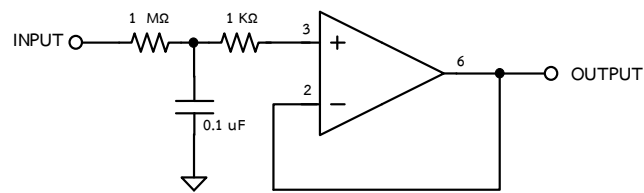


ภาพที่ 6 แสดงวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส

### วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 (4<sup>th</sup> order Low pass filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำที่ใช้ในการวิจัยนี้ออกแบบโดยอิงตามโครงสร้างแบบ T-type RC ซึ่งมีพื้นฐานจากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ของวงจรกรองพาสซีฟ ด้วยเทคนิคการหาความนำรวม (Floating Admittance Technique) ตามที่ Roy et al. (2020) ได้นำเสนอ โดยวงจรกรองแต่ละชุด ประกอบด้วยตัวต้านทานจำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ซึ่งจัดเรียงในรูปแบบ T-type ส่งผลให้ได้วงจรกรองความถี่ต่ำลำดับที่สอง (2nd-order low-pass filter) ดังแสดงในภาพที่ 7

เพื่อให้ได้คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับที่ 4 (4th-order) วงจรจึงประกอบด้วยชุดกรองอันดับที่ 2 จำนวนสองชุดต่อกัน โดยใช้วงจรขยายสัญญาณแบบโวลเทจฟอลโลเวอร์ (Voltage Follower) ด้วยออปแอมป์ (Operational Amplifier) ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ระหว่างชุดกรองแต่ละชุด เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการโหลดของสัญญาณ ซึ่งแนวทางดังกล่าวเป็นแนวทางมาตรฐานในการ ออกแบบวงจรแอคทีฟกรองความถี่ต่ำ (active low-pass filter) ตาม Sedra and Smith (2015)

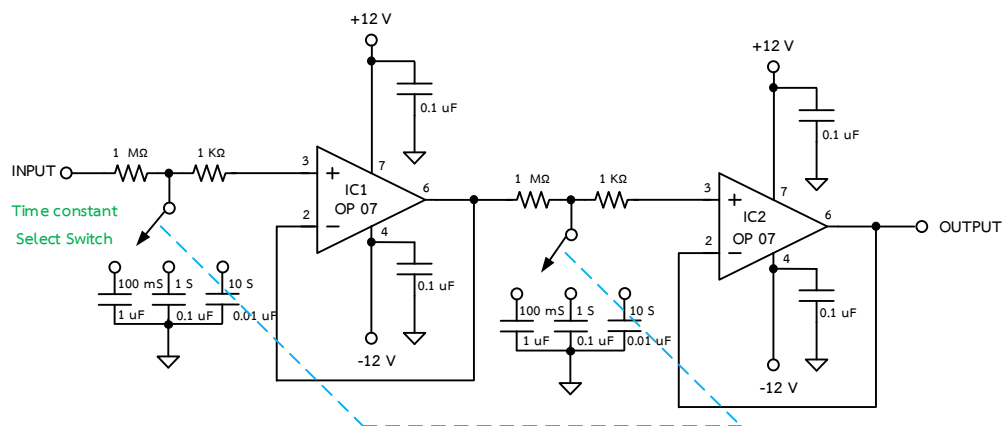


ภาพที่ 7 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 2 อันดับ แบบ T-type RC

ความถี่ตัดของวงจรกรองแต่ละชุดสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐาน:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความต้านทาน  $R = 1 \text{ M}\Omega$  และเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า  $C$  ได้ 3 ค่า ได้แก่  $0.01 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $0.1 \text{ }\mu\text{F}$  และ  $1 \text{ }\mu\text{F}$  เพื่อให้สามารถปรับค่าคงเวลา (Time constant,  $\tau = RC$ ) ได้ 3 ระดับ ได้แก่ 10 วินาที, 1 วินาที และ 0.1 มิลลิวินาที ตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 และ ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิดแอคทีฟแบบอันดับ 4

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณความถี่ตัดของวงจรกรอง T-type RC

| ค่า C<br>( $\mu\text{F}$ ) | R<br>( $\Omega$ ) | ค่าคงเวลา (RC)<br>(วินาที) | $f_c$ (2nd-order)<br>(Hz) | $f_c$ (4th-order)<br>(Hz) |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0.01                       | 1 M $\Omega$      | 10.0                       | 15.90                     | 11.250                    |
| 0.1                        | 1 M $\Omega$      | 1.0                        | 1.590                     | 1.120                     |
| 1                          | 1 M $\Omega$      | 0.1                        | 0.159                     | 0.112                     |

### ส่วนควบคุมและแสดงผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller: MCU)

ส่วนควบคุมของงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO รุ่น R3 ร่วมกับโมดูลขยายพอร์ต (Expansion Shield) เพื่อความสะดวกในการต่อสายควบคุม โดยมีจอ LCD ขนาด 20x4 แสดงผลผ่านบัสสื่อสารแบบ I<sup>2</sup>C แสดงข้อมูลสำคัญ ได้แก่ โหมดสัญญาณอ้างอิง (Internal/External), ความถี่ที่กำหนด, ค่าแรงดัน  $V_x$  และ  $V_y$  และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในภาพที่ 9 และใช้โมดูลสวิตช์โรตารีในการเลือกและตั้งค่าต่าง ๆ

```
Ext. : Stop Freq.
          1000 Hz
4.9081  4.1376 U
          6.4654 Ohm
```

(ก) เมื่อกดเลือก Ref เป็น Ext. หรือสัญญาณ Ref จากภายนอก

```
Int. : Stop Freq.
          1000 Hz
2.8853  4.9995 U
          5.4660 Ohm
```

(ข) เมื่อกดเลือก Ref เป็น Int. หรือสัญญาณ Ref จากภายใน

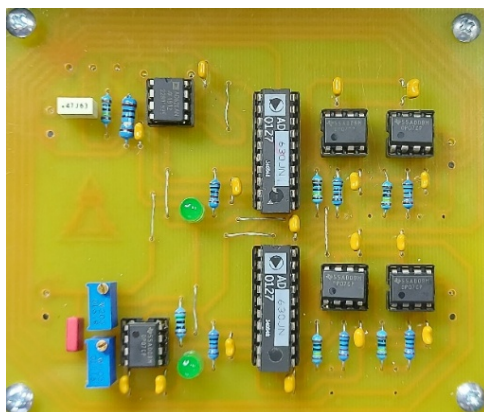
```
Int. : Run Freq.
          999 Hz
4.7273  0.9730 U
          4.6286 Ohm
```

(ค) เมื่อกดเลือก ให้เครื่องกำเนิดสัญญาณ

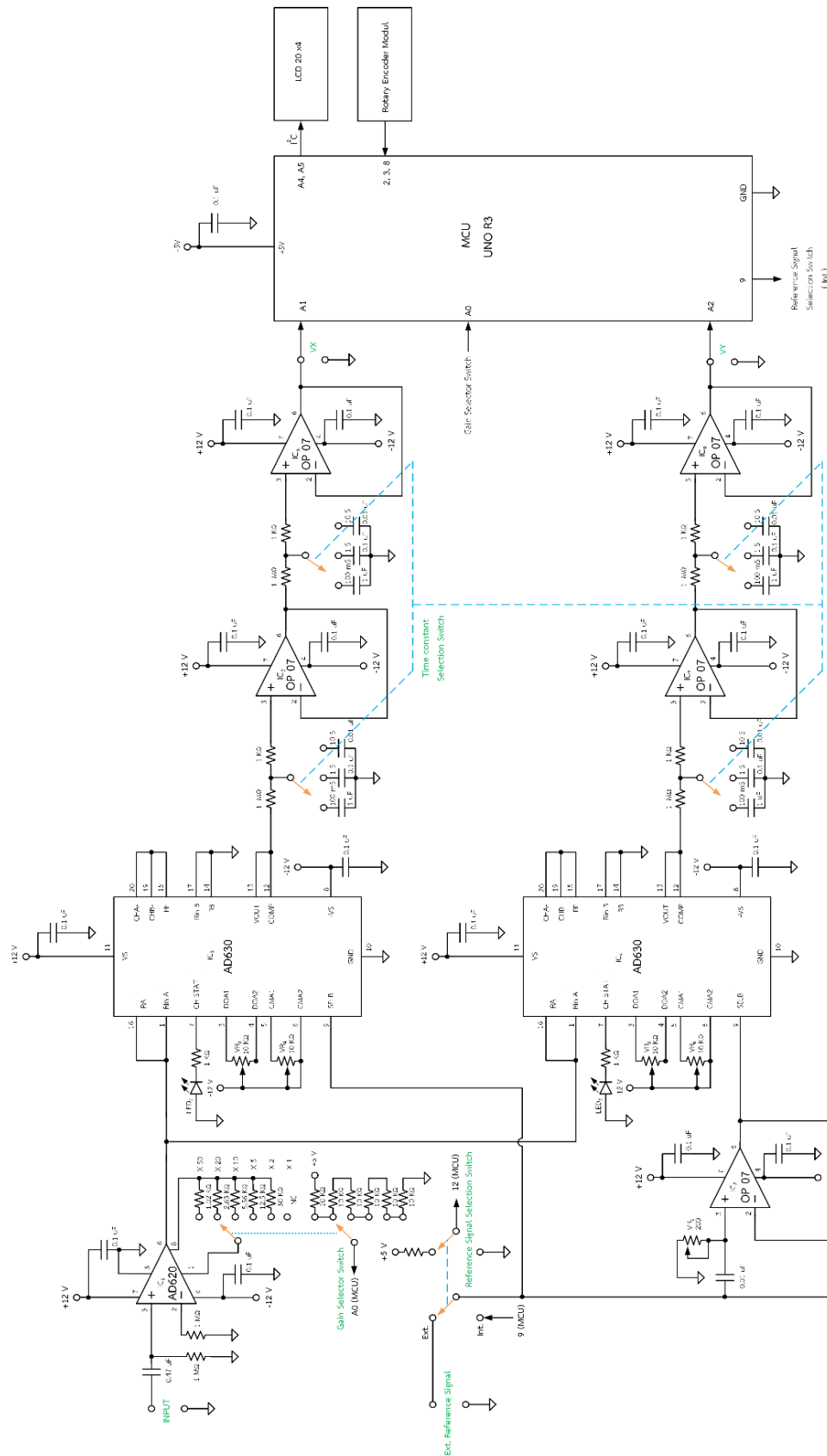
ภาพที่ 9 แสดงการออกแบบหน้าจอ LCD

### โครงสร้างโดยรวม

โครงสร้างโดยรวมของระบบเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ แสดงดังภาพที่ 10 และภาพที่ 11 โดยภาพที่ 10 แสดงแผงวงจรต้นแบบที่ติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบจริง และภาพที่ 11 แสดงผังวงจรไฟฟ้าของระบบทั้งหมด ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อของวงจรในภาพรวม



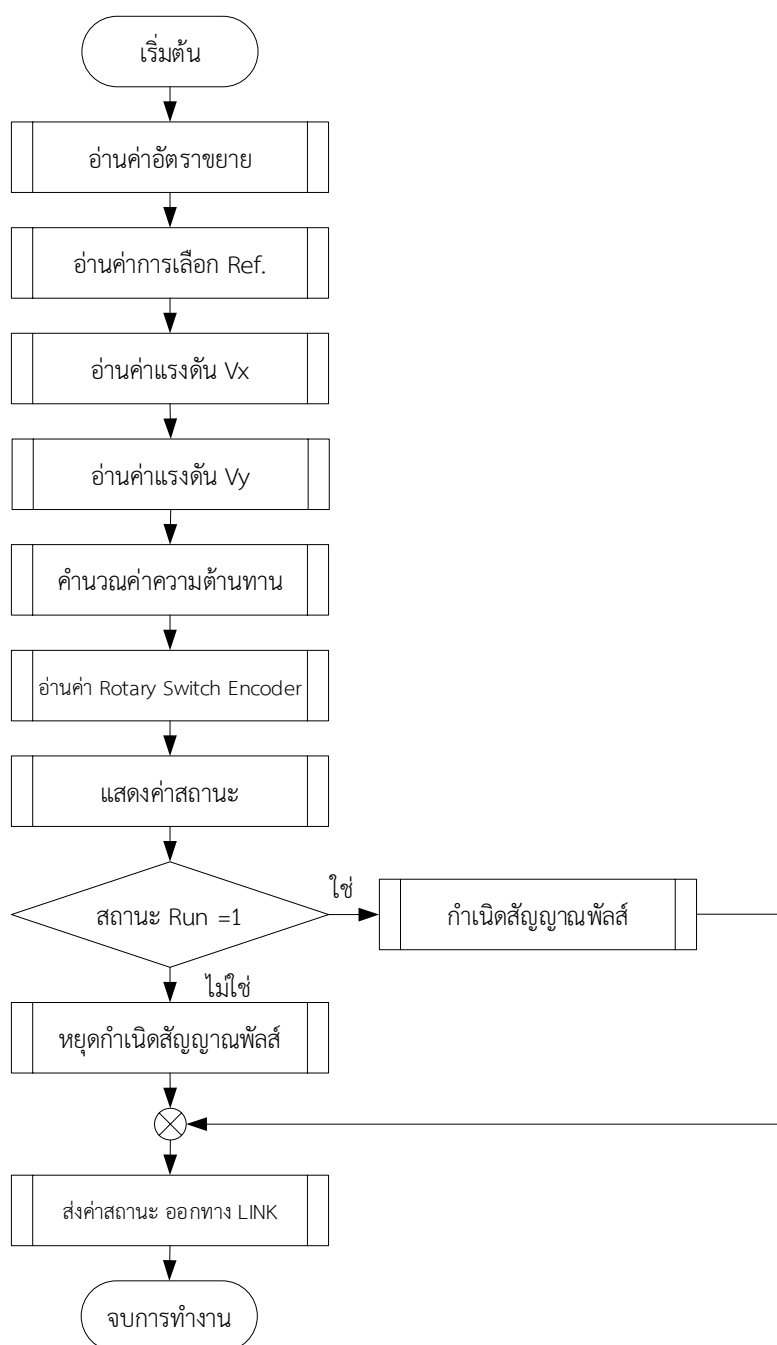
ภาพที่ 10 แสดงแผงวงจรต้นแบบที่ติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบจริง



ภาพที่ 11 แสดงผังวงจรไฟฟ้าฉบับสมบูรณ์ของระบบ

### โปรแกรมควบคุมการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อเปิดเครื่อง หน้าจอจะแสดงชื่อเครื่องมือเป็นเวลา 3 วินาที จากนั้นเข้าสู่โหมดพร้อมทำงาน โดยแสดงข้อมูลการเลือกสัญญาณอ้างอิง (Ref.), สถานะการทำงาน, ความถี่, แรงดันไฟฟ้าสองตำแหน่ง และค่าความต้านทาน ระบบจะทำงานวนลูปตามลำดับ ได้แก่ อ่านค่าอัตราขยาย, เลือกสัญญาณอ้างอิง, อ่านแรงดันไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง, คำนวณค่าความต้านทาน, อ่านค่าจาก Rotary Encoder และแสดงผลทั้งหมดบนหน้าจอ หากมีคำสั่งให้เริ่ม ระบบจะกำเนิดความถี่ตามที่กำหนด และจะหยุดเมื่อได้รับคำสั่งหยุด ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงผังการทำงานของโปรแกรมควบคุม

### การทดสอบประสิทธิภาพ

ในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่พัฒนาขึ้น การทดสอบได้ดำเนินการในสองส่วนหลัก

1. การทดสอบองค์ประกอบย่อย ได้แก่ วงจรเลื่อนเฟสและวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส โดยผลการทดสอบของแต่ละส่วนแสดงในภาพที่ 17 ถึง 20
2. การประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ผ่านการประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรอนุกรม RLC แสดงในภาพที่ 21 และ 22

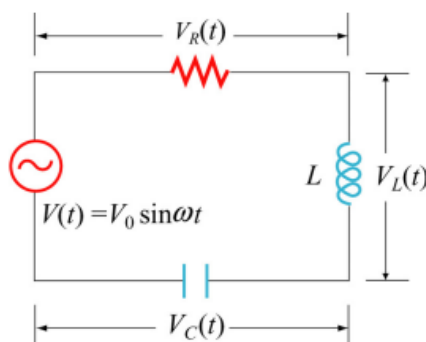
### การทดสอบองค์ประกอบวงจร

ขั้นตอนการทดสอบ

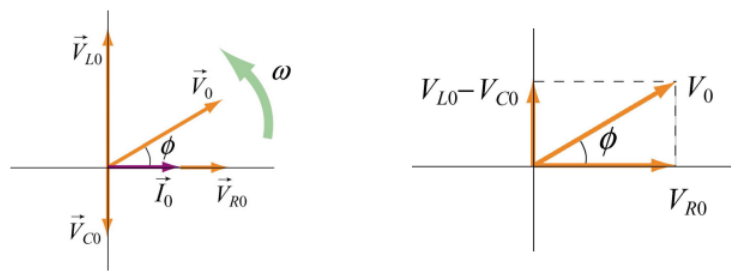
- เชื่อมต่อวงจรต้นแบบกับอุปกรณ์ตรวจวัด
- ป้อนสัญญาณอ้างอิงและอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ
- วัดความต่างเฟสด้วยออสซิลโลสโคปดิจิทัล และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยดิจิทัลมิเตอร์

### การประยุกต์ใช้กับวงจรอนุกรม RLC

การประยุกต์ใช้เครื่องวัดแบบล็อกอิน (LIA) ในการตรวจวัดการสั่นพ้องของวงจร RLC ทำให้สามารถหาค่าความถี่สั่นพ้องและมุมเฟสได้อย่างแม่นยำ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการออกแบบวงจรกรองความถี่และอุปกรณ์ปรับแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Zhong et al., 2022) โดยวงจร RLC อนุกรมประกอบด้วยตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่ต่อเรียงกันในลักษณะอนุกรม ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงวงจรอนุกรม RLC



ภาพที่ 14 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ (phasor) ของวงจรอนุกรม RLC

จากภาพที่ 14 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad (15)$$

เมื่อ  $V_L = I\chi_L$  และ  $V_C = I\chi_C$  ในกรณีที่  $V_L = V_C$  จะทำให้ได้

$$\begin{aligned} \chi_L &= \chi_C \\ \omega L &= \frac{1}{\omega C} \end{aligned}$$

หรือ

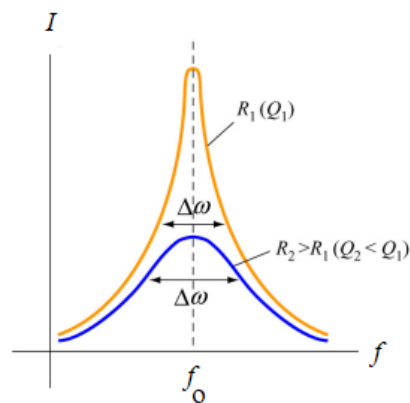
$$\begin{aligned} 2\pi f_0 &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \\ f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \end{aligned} \quad (16)$$

เมื่อ  $f_0$  เรียกว่าความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency)

สำหรับมุมเฟสหาได้จาก

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\chi_L - \chi_C}{R} \right) \quad (17)$$

ถ้าเขียนกราฟระหว่างกระแส กับความถี่ จะได้กราฟดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงกราฟระหว่างกระแส  $I$  กับความถี่

จากกราฟจะสามารถหาค่าองค์ประกอบ  $Q$  ได้จาก

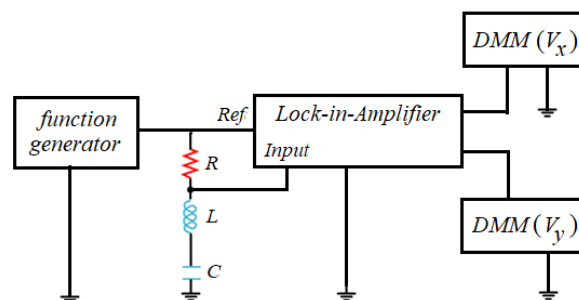
$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (18)$$

หรือ

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (19)$$

### ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองนี้ ได้ป้อนสัญญาณไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีแรงดันไฟฟ้าและความถี่ตามค่าที่กำหนดเข้าสู่วงจร RLC จากนั้นใช้ฮอสซิลโลสโคปดิจิทัลเพื่อตรวจวัดรูปคลื่นสัญญาณ และใช้มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (DMM) จำนวน 2 เครื่อง โดยตั้งย่านวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) สำหรับตรวจวัดค่าแรงดัน  $V_x$  และ  $V_y$  จากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของวงจรภายใต้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จำนวน 2 ค่า ได้แก่ 30 โอห์ม และ 100 โอห์ม โดยวงจรประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด 4.7 มิลลิเฮนรี และตัวเก็บประจุขนาด 2.2 นาโนฟารัด ดังแสดงในภาพที่ 16 ผลการวัดที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์และจัดทำกราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจร เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมเรโซแนนซ์และมมเฟสภายใต้เงื่อนไขแตกต่างกัน



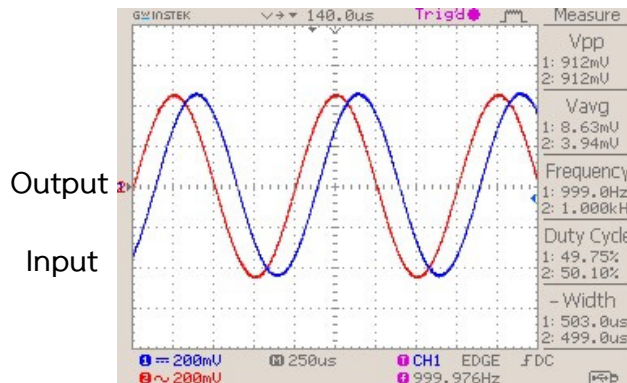
ภาพที่ 16 แสดงแผนภาพการทดลองวงจรอนุกรม RLC ด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

## ผลการวิจัย

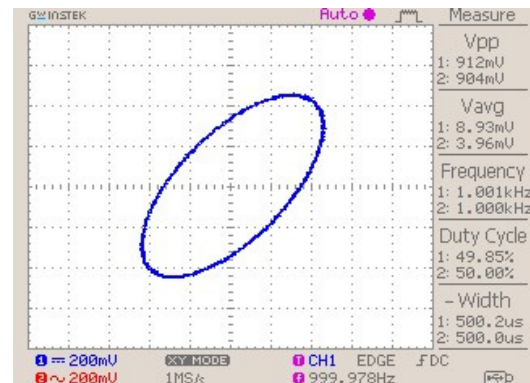
### ผลการทดสอบองค์ประกอบวงจร

#### ผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟส

จากภาพที่ 17 และ ภาพที่18 ผลการทดสอบสามารถปรับค่าความต่างเฟสได้ทั้ง 45 และ 90 องศา ตามที่ออกแบบไว้ และสัญญาณเอาต์พุตมีแอมพลิจูดลดลงตามที่คาดการณ์ไว้

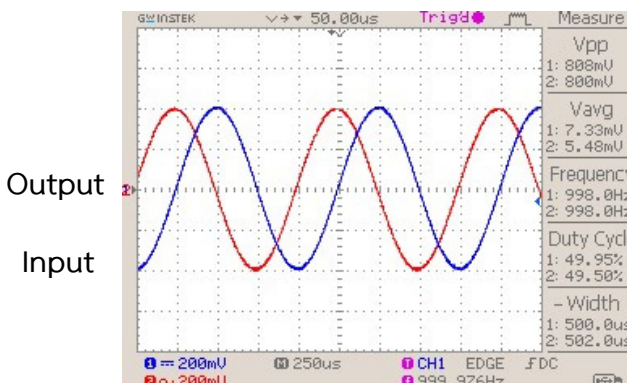


(ก) สัญญาณ Input และ Output

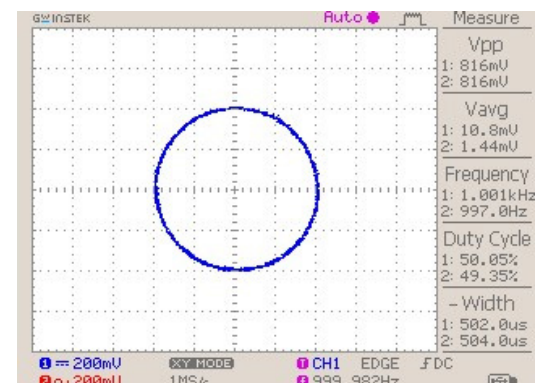


(ข) XY Mode

ภาพที่ 17 แสดงสัญญาณจากวงจรเลื่อนเฟส 45 องศา



(ก) สัญญาณ Input และ Output

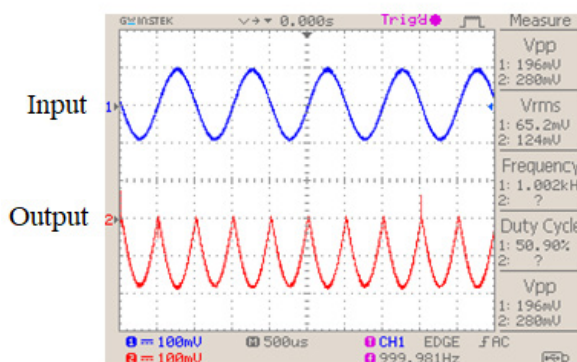


(ข) XY Mode

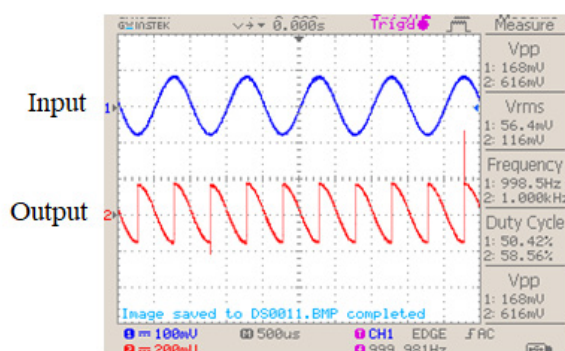
ภาพที่ 18 แสดงสัญญาณจากวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา

#### ผลการทดสอบวงจรตรวจจับที่ไวต่อเฟส

จากภาพที่ 19 และ ภาพที่ 20 ผลการทดสอบให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมตามทฤษฎี โดยมีการกลับเฟส 180 องศาที่สามารถชดเชยได้ในขั้นตอนวิเคราะห์ผล



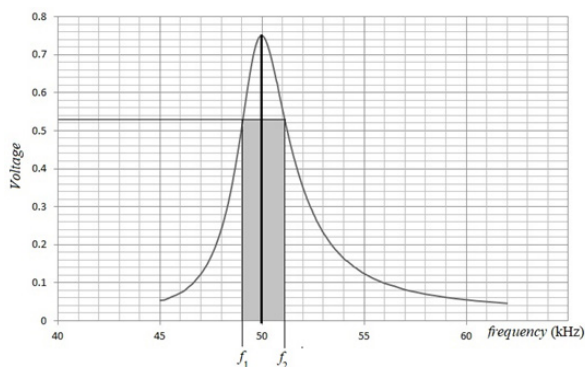
ภาพที่ 19 แสดงสัญญาณเอาต์พุต AD630 ตัวที่ 1 ในกรณีที่สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสตรงกัน



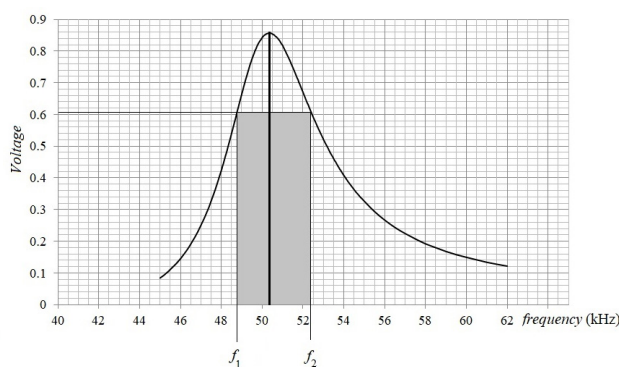
ภาพที่ 20 แสดงสัญญาณเอาต์พุต AD630 ตัวที่ 2 ในกรณีที่สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน 90 องศา

### ผลการทดลองการประยุกต์ใช้กับวงจรอนุกรม RLC

ภาพที่ 21 แสดงกราฟการตอบสนองความถี่ของวงจรอนุกรม RLC ที่วัดด้วยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุดบริเวณความถี่สั่นพ้องของวงจร และลักษณะการตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน



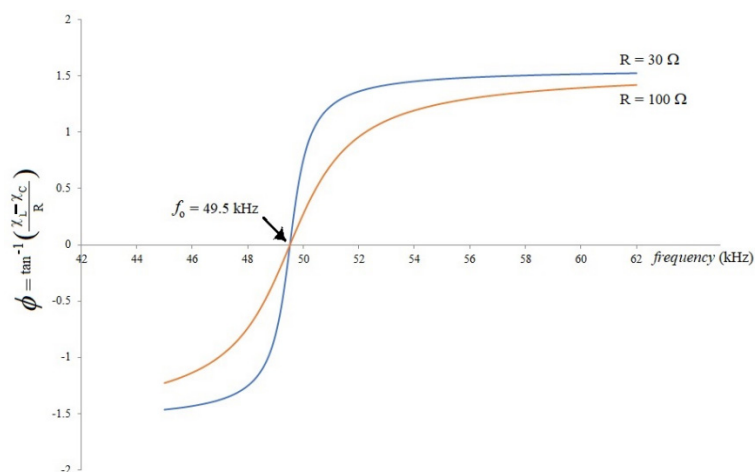
(ก) เมื่อใช้  $R = 30 \Omega$



(ข) เมื่อใช้  $R = 100 \Omega$

ภาพที่ 21 แสดงกราฟการตอบสนองความถี่

ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับความถี่ของวงจรอนุกรม RLC โดยมุมเฟสเปลี่ยนผ่านศูนย์องศาในช่วงความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้อง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมเรโซแนนซ์ตามทฤษฎี



ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสเชิงทฤษฎีกับความถี่

จากผลการทดลองที่สรุปในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อค่าความต้านทาน R เท่ากับ 30  $\Omega$  และ 100  $\Omega$  ความถี่สั่นพ้องที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 49.95 kHz และ 50.35 kHz ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้ 49.49 kHz โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ 2 สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ ค่ามุมเฟสที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.02 แสดงถึงความสามารถของระบบในการตรวจวัดพฤติกรรมเรโซแนนซ์และเฟสของวงจร RLC ได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลองวงจรอนุกรม RLC

| รายการทดลอง | ค่าความต้านทาน (R)<br>( $\Omega$ ) | ความถี่สั่นพ้อง<br>(คำนวณ) : (kHz) | ความถี่สั่นพ้อง<br>(ทดลอง) : (kHz) | ร้อยละค่าความ<br>คลาดเคลื่อน | ค่า<br>Q-factor |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| ทดลองที่ 1  | 30                                 | 49.49                              | 49.95                              | 0.93                         | 24.37           |
| ทดลองที่ 2  | 100                                | 49.49                              | 50.35                              | 1.74                         | 13.79           |
| กราฟมุมเฟส  | 30/100                             | 49.49                              | 49.50                              | 0.02                         | -               |

### อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดขนาดสัญญาณและมุมเฟสของวงจรอนุกรม RLC ได้อย่างถูกต้อง โดยความถี่ที่ให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องที่คำนวณได้จากทฤษฎี ซึ่งสะท้อนถึงความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองทางทฤษฎีกับผลการทดลองจริง

จากการวิเคราะห์หุ้มเฟสพบว่าค่ามุมเฟสเปลี่ยนผ่านใกล้ศูนย์องศาที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องทางทฤษฎี โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจวัดเฟสได้อย่างแม่นยำ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของ Phase Sensitive Detection และแนวทางที่รายงานไว้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Yan, 2017; Nikzamir & Capolino, 2024)

เมื่อพิจารณาในเชิงการออกแบบ เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาในลักษณะต้นแบบเชิงวิศวกรรมที่เน้นความเรียบง่ายของโครงสร้างและต้นทุนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ที่มีความซับซ้อนสูง เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นยังคงสามารถให้ผลการวัดที่สอดคล้องกับทฤษฎีและเหมาะสมต่อการใช้งานในห้องปฏิบัติการ

ดังนั้น ผลการวิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ครบถ้วน ทั้งในด้านการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงการพัฒนาเป็นต้นแบบสำหรับการเรียนการสอนและการทดลองทางฟิสิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ระดับปริญญาตรี

### สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิด เฟสคู่ (Dual-Phase Lock-in Amplifier) ต้นทุนต่ำ ในครั้งนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์หลักที่ตั้งไว้ เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงและมีความน่าเชื่อถือ โดยวงจรย่อยทั้งหมด (วงจรเลื่อนเฟสและวงจรตรวจจับเฟส) ทำงานอย่างถูกต้องตามหลักการทางทฤษฎี

ผลการประยุกต์ใช้ในการทดลองวงจรอนุกรม RLC ยืนยันว่าเครื่องมือสามารถตรวจวัดความถี่สั่นพ้องและมุมเฟสได้อย่างแม่นยำ (ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 2) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณระดับต่ำที่มีความน่าเชื่อถือ

ผลลัพธ์ที่ได้สรุปได้ว่า เครื่องมือดังกล่าวมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำไปใช้เป็น อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดด้านต้นทุนในการจัดซื้อเครื่องมือเชิงพาณิชย์ราคาแพง และที่สำคัญที่สุดคือการ ส่งเสริมให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของระบบตรวจจับสัญญาณไวต่อเฟส (Phase Sensitive Detection) ได้อย่างชัดเจน รวมถึงการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณระดับต่ำในอนาคต

### ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

จากผลการวิจัยและการใช้งานจริงของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่ สามารถเสนอแนวทางการพัฒนาและต่อยอดสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้ดังนี้

#### 1. การเพิ่มความสามารถในการวัดสัญญาณระดับนาโนโวลต์

ควรพัฒนาให้รองรับการวัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กยิ่งขึ้น โดยปรับปรุงอัตราขยายของวงจร และเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีสัญญาณรบกวนต่ำร่วมกับ ADC ความละเอียดสูง

## 2. การพัฒนาเชื่อมต่อระบบดิจิทัลภายนอก

เพิ่มฟังก์ชันการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์หรือระบบ IoT ผ่าน USB หรือ Wi-Fi เพื่อการจัดเก็บข้อมูลวิเคราะห์ผล และควบคุมการทำงานจากระยะไกล

## 3. การพัฒนาอินเทอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิก (GUI)

พัฒนาโปรแกรมสำหรับแสดงผลและควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์หรือแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพา เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและเพิ่มขีดความสามารถของผู้ใช้งาน

## 4. การประยุกต์ใช้งานในบริบทที่หลากหลาย

ทดลองใช้กับการวัดสัญญาณชีวภาพ เช่น คลื่นหัวใจ (ECG), คลื่นสมอง (EEG) หรือในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวนต่ำ เพื่อประเมินศักยภาพของอุปกรณ์ในสถานการณ์ที่แตกต่าง

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง เป็นอย่างสูงสำหรับการให้การสนับสนุนทั้งในด้านสถานที่ปฏิบัติงาน ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์บูรณาการ ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ ChatGPT และ Gemini สำหรับความช่วยเหลือในการตรวจสอบไวยากรณ์และการเรียบเรียงประโยคในบทความฉบับนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Atia, W. A., & Davis, C. C. (1997). A phase-locked shear-force microscope for distance regulation in near-field optical microscopy. *Applied Physics Letters*, 70(4), 405–407. <https://doi.org/10.1063/1.118318>
- Kay, A. (2012). *Operational amplifier noise: Techniques and tips for analyzing and reducing noise*. Newnes.
- Kestner, D., & Kostinski, A. (2025). Polarization statistics of thermal microwave radiation. *Physical Review E*, 111(4), 044125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.111.044125>
- Liu, Y., & Zhang, R. (2012). AD630 Lock-In Amplifier Circuit for Weak Signal. *Advanced Materials Research*, 482-484, 975-980. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.975>

- Lyu, Z., Dong, T., Du, Y., Chen, H., & Wang, C. (2025). All-optical polarization-filtered subwavelength imaging in microwave regime via atom-based polarization holography. *Communications Physics*, 8, 175. <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02096-z>
- Nikzamir, A., & Capolino, F. (2024). Exceptional-point degeneracy as a desirable operation point for an oscillator array with discrete nonlinear gain and radiative elements. *Physical Review Applied*, 21(2), 024037. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.024037>
- Park, S., & Lee, Y. J. (2015). Precision Electrical Measurement Experiment Using a Lock-in Amplifier that is Suitable for Science and Engineering Undergraduates. *New Physics: Sae Mulli*, 65(4), 328–332. <https://doi.org/10.3938/NPSM.65.328>
- Rieke, G. H. (2003). *Detection of light: From the ultraviolet to the submillimeter* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Roy, S. K., Singh, M., Sharma, K. K., Bhargava, C., & Singh, B. P. (2020). Mathematical modelling of simple passive RC filters using floating admittance technique. *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298230>
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic circuits* (7th ed.). Oxford University Press.
- Sengupta, S. K., Farnham, J. M., & Whitten, J. E. (2005). A simple low-cost lock-in amplifier for the laboratory. *Journal of Chemical Education*, 82(9), 1399–1401. <https://doi.org/10.1021/ed082p1399>
- Yan, G. (2017). Design of active low-pass filter based on multiple feedback circuit. *2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 258–261. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2017.9>
- Zhong, M., Cumming, D. R. S., & Li, C. (2022). Numerical and experimental investigations of self-mixing effect of a planar Gunn diode oscillator. *2022 16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, United Kingdom. <https://doi.org/10.23919/EuMIC50153.2022.9783700>