

การทดลองเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ บนโปรแกรม TINKERCAD

AN EXPERIMENT TO MEASURE THE INTERNAL RESISTANCE OF A MULTIMETER ON THE TINKERCAD PROGRAM

รัชฌ์ กัดมัน¹ นพดล สีสุข² และ อนุชา แก้วพูลสุข^{3*}

Ratchanoo Katman¹, Noppadon Sisuk², and Anucha Kaewpoonsuk^{3*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

³ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

³Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

*corresponding author e-mail: anuchak@nu.ac.th

(Received: 30 January 2022; Revised: 1 April 2022; Accepted: 4 April 2022)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดลองเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ของโปรแกรม Tinkercad โดยมัลติมิเตอร์ดังกล่าวนี้มีโหมดใช้งานสามโหมด ได้แก่ โหมดโอห์มมิเตอร์ โหมดแอมมิเตอร์ และโหมดโวลต์มิเตอร์ การทดลองได้ถูกออกแบบโดยอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโหมดโอห์มมิเตอร์เป็นสัญญาณอินพุตให้กับความต้านทานที่ต้องการตรวจวัด ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในวงจรได้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานของมัลติมิเตอร์ในแต่ละโหมดสามารถพิจารณาได้จากค่าความชันของเส้นกราฟ ผลการทดลอง พบว่า โหมดโอห์มมิเตอร์และโหมดแอมมิเตอร์นั้นจะมีค่าความต้านทานภายในเท่ากับ $100 \pm 1 \mu\Omega$ และ $100 \pm 33 \mu\Omega$ ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นค่าที่ต่ำมาก ในขณะที่โหมดโวลต์มิเตอร์มีค่าความต้านทานภายในเท่ากับ $100 \pm 1 M\Omega$ ซึ่งถือเป็นค่าที่สูงมาก นอกจากนี้ยังพบว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของโหมดโอห์มมิเตอร์มีค่าเท่ากับ $1.00 \pm 0.01 V$ ทั้งนี้คุณสมบัติของเส้นกราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นที่ดีเหมาะสำหรับการทดลองดังกล่าวนี้ไปประยุกต์เป็นชุดปฏิบัติการทดลองของนักศึกษาสาขาด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ และเทคโนโลยีการวัด

คำสำคัญ: โปรแกรม Tinkercad ความต้านทานภายใน มัลติมิเตอร์ ชุดปฏิบัติการทดลอง

Abstract

This paper presents an experiment to measure the internal resistance of a multimeter in the Tinkercad program. This multimeter has three operating modes: ohmmeter mode, ammeter mode and voltmeter mode. The experiment is designed using a DC voltage source in ohmmeter mode as the input signal to the resistance to be measured. The relationship of the variables in a circuit is arranged in the form of a linear equation. The resistance analysis of the multimeter in each mode can be determined from the slope of the curve. The results showed that the ohmmeter mode and the ammeter mode have internal resistances of $100 \pm 1 \mu\Omega$ and $100 \pm 33 \mu\Omega$, respectively, which are very low values. The voltmeter mode has an internal resistance of $100 \pm 1 M\Omega$ which is very high resistance. It is also found that the ohmmeter mode has the 1.00 ± 0.01 V DC voltage source. The properties of the resulting curves have good linearity. These experiments are suitable for applying to the experimental kit of students in the fields of electrical–electronics, physics and measurement technology.

Keywords: Tinkercad program, Internal resistance, Multimeter, Experiment kit

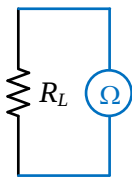
บทนำ

ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 ซึ่งส่งผลกระทบต่อรูปแบบการเรียนการสอนในทุกระดับ ทั้งนี้การจัดการเรียนการสอนในรูปแบบต่างๆ ต้องเป็นไปตามมาตรการเว้นระยะห่าง สำหรับรายวิชาเกี่ยวกับไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน (ในระดับอุดมศึกษา) โดยปกติแล้วจะมีทั้งส่วนที่เป็นภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ในส่วนที่เป็นภาคทฤษฎีนั้นการสอนแบบออนไลน์ถือว่าได้รับผลกระทบไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เป็นภาคปฏิบัติ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยสนับสนุนให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเนื้อหาทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น วัตถุประสงค์ที่สำคัญของปฏิบัติการทดลองในรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์อีกด้านหนึ่ง คือ การฝึกฝนให้ผู้เรียนมีทักษะการต่อวงจรไฟฟ้า การตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า แนวทางการบรรเทาปัญหาเกี่ยวกับการเรียนการสอนภาคปฏิบัติในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 ดังกล่าวนี้อยู่ เช่น การใช้คลิปปิดิโอเป็นสื่อแสดงวิธีการทำปฏิบัติการทดลอง โดยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการหรืออาจารย์ผู้สอนจะทำหน้าที่เป็นผู้ทดลอง และให้ผู้เรียนบันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์ผล วิจัย และสรุปผลการทดลอง ซึ่งข้อดีของวิธีการดังกล่าวนี้คือ ต้นทุนในการผลิตต่ำ ผลการทดลองเป็นข้อมูลเดียวกันทั้งหมดไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้เรียน ทำให้ผู้สอนสามารถประเมินผลรายงานได้โดยง่าย แต่มีข้อจำกัด คือ ผู้เรียนจะไม่มีประสบการณ์การทำการทดลองด้วยตนเอง แนวทางที่สอง ได้แก่ การออกแบบชุดปฏิบัติการทดลองหรือ

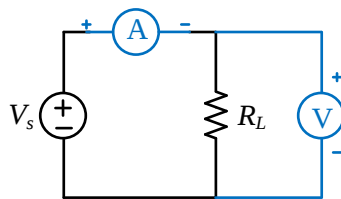
วิธีการทดลองขึ้นใหม่โดยเน้นที่ราคาต่ำ อุปกรณ์การทดลองเรียบง่าย มีขนาดเล็กหรือเป็นชุดการทดลองที่ผู้เรียนสามารถสามารถจัดทำได้ด้วยตนเองที่บ้านหรือหอพัก (Jeffrey, 2019; Pathare, Raghavendra & Huli, 2017; Pili, Violanda & Pili, 2019; Roberto & Christopher, 2020; Silar et al., 2020) ซึ่งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวนี้นี้สามารถสร้างและกระจายให้กับผู้เรียนจำนวนมากได้ แนวทางที่สามได้แก่การใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้เรียนได้ใช้ฝึกปฏิบัติการทดลอง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงประเภทของโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พบเห็นได้บ่อยครั้งจะสามารถแยกออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ โปรแกรมจำลองการทำงานที่เสมือนการวาดวงจรลงบนหน้ากระดาษ และโปรแกรมจำลองการทำงานที่เสมือนการต่อวงจรจริงบนบอร์ดทดลอง โดยประเภทแรกนั้นมักจะให้ผลการทำงานที่ถูกต้องและครอบคลุมมากกว่าประเภทที่สอง ตัวอย่างเช่น โปรแกรม OrCAD (OrCAD, n.d.) และโปรแกรม EasyEDA (Easyeda, n.d.) เป็นต้น ตัวอย่างของโปรแกรมประเภทที่สองที่สำคัญ ได้แก่ โปรแกรม Tinkercad (Tinkercad, n.d.) แม้ว่าโปรแกรกดังกล่าวนี้นี้จะมีข้อจำกัดด้านความถูกต้องในการทำงานของวงจร (กรณีวงจรมีความซับซ้อน) และความสามารถในการแสดงผลที่ต่ำกว่าประเภทแรก เช่น ออสซิลโลสโคปที่มีให้แต่ละตัวจะแสดงผลรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 1 สัญญาณ โดยที่ผู้ใช้ไม่สามารถดูผลความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตได้ แต่โปรแกรกดังกล่าว นี้มีจุดเด่นที่สำคัญ คือ เป็นโปรแกรมฟรี (ไม่เสียค่าใช้จ่าย) การรัน (Run) โปรแกรมเป็นแบบออนไลน์ และให้ความรู้สึกของผู้ใช้งานใกล้เคียงกับการต่อวงจรจริง ดังนั้นสำหรับการฝึกปฏิบัติการต่อวงจรไฟฟ้าและการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าเบื้องต้นนั้นโปรแกรมดังกล่าวนี้ถือได้ว่ามีประโยชน์อย่างยิ่ง อีกทั้งยังได้มีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม Tinkercad เพื่อการเรียนการสอนรวมถึงงานวิจัยด้านอื่นๆ เพิ่มมากขึ้น (Eryilmaz & Deniz, 2021; Kshirsagar et al., 2021; Luchaninov et al., 2021; Patel et al., 2020; Tennison, Gorlewicz & Condoor, 2020)

พิจารณาเครื่องมือวัดเกี่ยวกับไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ได้แก่ โหมดมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า โวลต์มิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และแอมมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งการตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นสามารถทำได้โดยใช้โหม้มิเตอร์ต่อคร่อมตัวต้านทาน ขณะตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่างๆ ออกจากตัวต้านทานที่ต้องการตรวจวัด ดังภาพที่ 1(ก) ทั้งนี้เนื่องจากโหม้มิเตอร์จะมีการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในเพื่อจ่ายกระแสให้กับตัวต้านทานที่ต้องการตรวจวัด จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปประมวลผลหาค่าความต้านทานและแสดงผลต่อไป แนวคิดที่สำคัญของการตรวจวัด คือ เครื่องมือวัดต่างๆ ที่ใช้จะต้องไม่เข้าไปรบกวนระบบที่ต้องการตรวจวัด ในกรณีที่ เป็นโหม้มิเตอร์ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอยู่ภายใน ตามหลักการของ

เทวินิน (Thevenin's Theorem) แล้ว จะมีค่าความต้านทานแฝง (หรือค่าความต้านทานภายใน) ของโอห์มมิเตอร์ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตามอุดมคติแล้วค่าความต้านทานดังกล่าวนี้ควรมีค่าต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ (ใกล้เคียงศูนย์) สำหรับการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โวลต์มิเตอร์นั้นจะมีการต่อขั้วของโวลต์มิเตอร์ขนาน (ต่อคร่อม) กับอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด ในขณะที่การตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์จะใช้แอมมิเตอร์ต่ออนุกรมกับตัวอุปกรณ์ ดังภาพที่ 1(ข) โดยที่ค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์นั้นควรมีค่าสูงมาก ซึ่งมีการทดลองและรายงานว่าค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์มีค่าสูงถึง $10\text{ M}\Omega$ (Stojilovic & Isaacs, 2018) ในทางอุดมคติ คือ อนันต์ ในขณะที่ค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ควรมีค่าต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งตามอุดมคติ คือ ศูนย์



(ก) โอห์มมิเตอร์



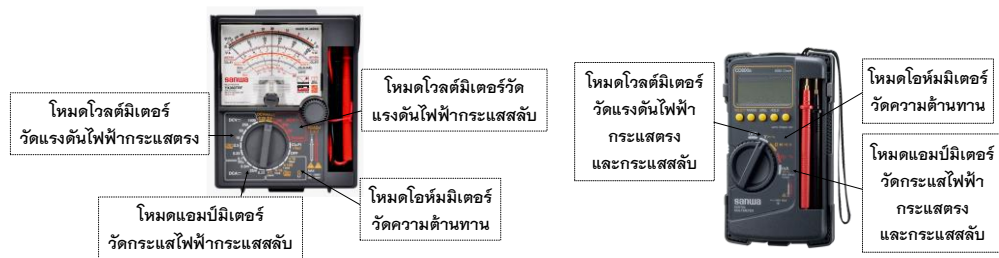
(ข) โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์

ภาพที่ 1 ตัวอย่างการใช้งาน (ก) โอห์มมิเตอร์ และ (ข) โวลต์มิเตอร์ และแอมมิเตอร์

เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า ปัจจุบันนิยมสร้างไว้เป็นเครื่องมือชุดเดียวกัน โดยตั้งชื่อว่า “มัลติมิเตอร์ (Multimeter)” โดยที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกโหมดหรือฟังก์ชันของการวัดได้ สำหรับภาพที่ 2(ก) แสดงตัวอย่างของมัลติมิเตอร์แบบเข็ม (แบบแอนะล็อก) ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF (YX360TRF, n.d.) ซึ่งมีโหมดให้เลือกใช้งานทั้งหมด 5 โหมด และภาพที่ 2(ข) แสดงตัวอย่างของมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a (CD800a, n.d.) ในขณะที่มัลติมิเตอร์ภายในโปรแกรม Tinkercad นั้นจะมีโหมดใช้งาน 3 โหมด ดังภาพที่ 2(ค) ได้แก่ โหมดแอมมิเตอร์ โหมดโวลต์มิเตอร์ และโหมดโอห์มมิเตอร์ ทั้งนี้ผู้พัฒนาโปรแกรมได้ใส่คุณสมบัติค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในแต่ละโหมดไว้ด้วย ซึ่งคุณสมบัติค่าความต้านทานของมิเตอร์ที่ใส่ไว้จะมีค่าใกล้เคียงอุดมคติมาก นั่นคือ โหมดโอห์มมิเตอร์และโหมดแอมมิเตอร์จะมีค่าความต้านทานภายในต่ำมาก ขณะที่โหมดโวลต์มิเตอร์จะมีค่าความต้านทานภายในสูงมาก

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งความสนใจที่การออกแบบปฏิบัติการทดลองสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ของโปรแกรม Tinkercad ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นปฏิบัติการพื้นฐานด้านการต่อวงจรไฟฟ้า รวมถึงการฝึกทักษะการวัดและการวิเคราะห์ปริมาณทางไฟฟ้า-

อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการเรียนการสอนในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 โดยรายละเอียดของหลักการ วิธีการทดลอง และผลการทดลองจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



(ก) แบบแอนะล็อก (Sanwa YX360TRF)

(ข) แบบดิจิทัล (Sanwa CD800a)



(ค) บนโปรแกรม Tinkercad

ภาพที่ 2 มัลติมิเตอร์

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ของโปรแกรม Tinkercad ซึ่งมีโหมดใช้งานสามโหมด ได้แก่ โหมดโอห์มมิเตอร์ โหมดแอมมิเตอร์ และ โหมดโวลต์มิเตอร์ โดยวิธีการใช้โปรแกรม Tinkercad ในเบื้องต้น ผู้ใช้งานสามารถเข้าหน้าเว็บไซต์ของ Tinkercad หลังจากสมัครสมาชิกผู้ใช้งานจะเข้าสู่หน้าต่างโปรแกรม หากต้องการจำลองการต่อวงจรไฟฟ้าให้เลือก Circuits และเลือก Create new Circuit เมื่อต้องการเริ่มสร้างวงจรใหม่ จากนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการมาวางในพื้นที่สำหรับจำลองการทำงานบนหน้าต่างโปรแกรม ซึ่งการต่อสายไฟในวงจรสามารถคลิกลากจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของขาอุปกรณ์ได้โดยง่าย เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้งานสามารถดูผลการทำงานของวงจรได้โดยกด Start Simulation

1. การตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมดโอห์มมิเตอร์

ภาพที่ 3 ด้านซ้ายมือแสดงการใช้มัลติมิเตอร์บนโปรแกรม Tinkercad ที่มีการเลือกโหมดเป็นโอห์มมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทาน R_x ซึ่งหลักการของโอห์มมิเตอร์โดยทั่วไปจะมีการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในตัวมิเตอร์สำหรับจ่าย

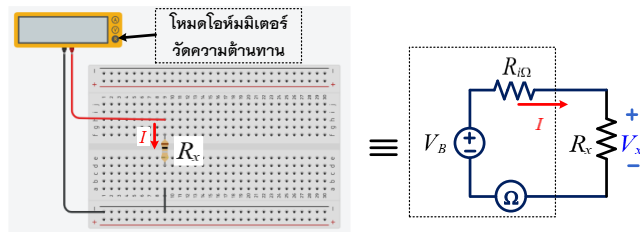
แรงดันไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานที่ต้องการตรวจวัด จากนั้นจะนำกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยวงจรสมมูลในโหมดดังกล่าวนี้ ดังภาพที่ 3 ด้านขวามือ ข้อจำกัดประการหนึ่งของโหมดโอห์มมิเตอร์ คือ หากค่าความต้านทานที่ทำการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า $1\ \Omega$ ผลการวัดจะแสดงค่าเป็น $0\ \Omega$ นั่นคือ มิเตอร์จะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานต่ำกว่า $1\ \Omega$ ได้ แต่อย่างไรก็ตามในโหมดโอห์มมิเตอร์จะยังสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการต่อตัวต้านทานขนาดเล็ก R_x เป็นโหลดให้กับโอห์มมิเตอร์เพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ ดังภาพที่ 4 ทั้งนี้จะใช้โหมดโวลต์มิเตอร์สำหรับทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V_x ที่ตกคร่อม R_x เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรโดยอาศัยหลักการว่าค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ r_{iv} นั้นมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทาน R_x มาก ($r_{iv} \gg R_x$) จะสามารถประมาณความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 1

$$V_x = -r_{i\Omega}I + V_B \quad (1)$$

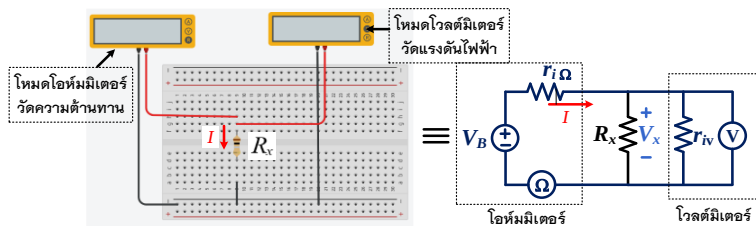
เมื่อ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_x จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้า V_x นั้นจะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า I โดยมีค่าความชันเป็น $r_{i\Omega}$ และมีจุดตัดแกน Y คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของมิเตอร์ V_B อย่างไรก็ตามในที่นี้จะไม่ใช้แอมมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์นั้นมีค่าต่ำ ซึ่งจะเข้าไปมีผลต่อการทำงานของระบบได้ ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าในสมการที่ 1 จะถูกแทนค่าด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า V_x ที่ตรวจวัดได้หารด้วยค่าความต้านทาน R_x ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2

$$V_x = -r_{i\Omega} \frac{V_x}{R_x} + V_B \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 การแปรค่าความต้านทาน R_x จะมีผลทำให้ค่า V_x เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_x กับค่า V_x/R_x จะสามารถวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายใน $r_{i\Omega}$ ของโอห์มมิเตอร์ได้จากค่าความชันของกราฟ นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในโอห์มมิเตอร์ V_B ยังสามารถพิจารณาได้จากค่าจุดตัดแกน Y ซึ่งในส่วนของการทดลองนั้นจะอาศัยการแปรค่าความต้านทาน R_x ในช่วง $1\ m\Omega$ ถึง $10\ m\Omega$ ด้วยความละเอียดเท่ากับ $1\ m\Omega$ โดยจะได้กราฟผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อผลการวิจัย



ภาพที่ 3 วงจรสมมูลขณะใช้โอห์มมิเตอร์ตรวจวัดค่าความต้านทาน R_x



ภาพที่ 4 การต่อวงจรสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของโอห์มมิเตอร์

2. การตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมตแอมมิเตอร์

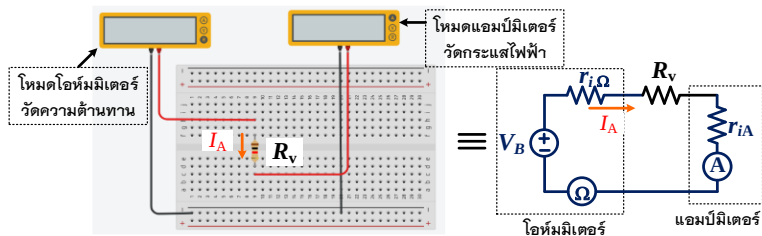
จากการทดลองตอนที่ 1 จะทำให้ทราบค่าความต้านทานภายในและขนาดแรงดันไฟฟ้าของโอห์มมิเตอร์ สำหรับตอนที่ 2 จะเป็นการประยุกต์ใช้โอห์มมิเตอร์สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแอมมิเตอร์เพื่อทำการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ โดยลักษณะการต่อวงจร ดังภาพที่ 5 เมื่อ r_{iA} คือ ค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ และ R_v คือ ตัวต้านทานภายนอกที่ต่อเพิ่มในวงจร ทั้งนี้ค่าความต้านทาน R_v ที่ใช้จะกำหนดให้มีค่าต่ำกว่า $1\ \Omega$ ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของโอห์มมิเตอร์ ดังภาพที่ 5 ค่ากระแสไฟฟ้า I_A ที่ไหลในวงจรมีค่า ดังสมการที่ 3

$$I_A = \frac{V_B}{r_{i\Omega} + r_{iA} + R_v} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 จัดรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ 4

$$(r_{i\Omega} + R_v)I_A = -r_{iA}I_A + V_B \quad (4)$$

เมื่อทำการแปรค่าความต้านทาน R_v จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า I_A เปลี่ยนแปลงไป โดยแทนค่าความต้านทาน $r_{i\Omega}$ จากผลการทดลองตอนที่ 1 ลงในสมการที่ 4 ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า $(r_{i\Omega} + R_v)I_A$ กับค่ากระแสไฟฟ้า I_A จะสามารถวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายใน r_{iA} ของแอมมิเตอร์ได้จากการวิเคราะห์ค่าความชันของกราฟ และจะได้จุดตัดแกน Y ของกราฟมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้า V_B เช่นเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 1 ในการทดลองนี้ได้ทำการแปรค่าความต้านทาน R_v ในช่วง $1\text{ m}\Omega$ ถึง $10\text{ m}\Omega$ ด้วยความละเอียด $1\text{ m}\Omega$ โดยได้กราฟผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อผลการวิจัย

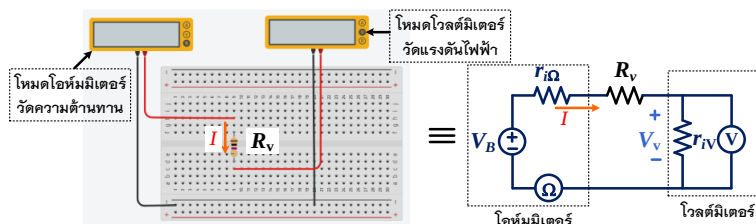


ภาพที่ 5 การต่อวงจรสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์

3. การตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมตโวลต์มิเตอร์

สำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์นั้นจะมีการต่อวงจรรูปแบบเดียวกันกับตอนที่ 2 แต่เปลี่ยนโหมตการวัดของมัลติมิเตอร์เป็นโหมตโวลต์มิเตอร์ ดังภาพที่ 6 โดยอาศัยโหมตมิเตอร์สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจร และใช้ตัวต้านทาน R_v ที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า $1\text{ M}\Omega$ สำหรับการตั้งค่ากระแสที่ไหลในวงจร ดังนั้นในที่นี้จึงสามารถตัดผลของค่าความต้านทานภายในของโหมตมิเตอร์ออกได้ เมื่อกำหนดให้ r_{iV} คือ ค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ จากภาพที่ 6 จะได้ความสัมพันธ์โดยประมาณ ดังสมการที่ 5

$$V_v = -\frac{1}{r_{iV}} R_v V_v + V_B \quad (5)$$



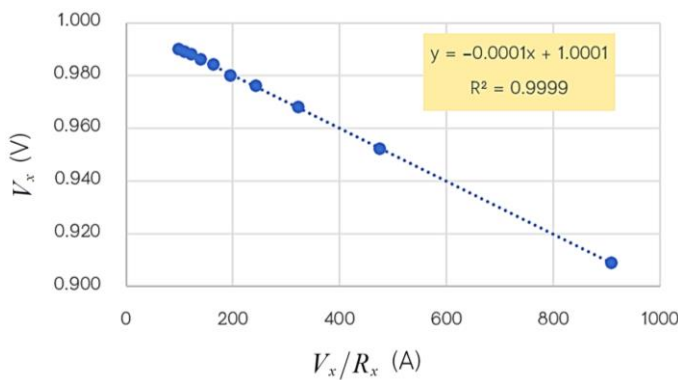
ภาพที่ 6 การต่อวงจรสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์

จากสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่าหากทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า V_V กับค่า R_V V_V จะทำให้ได้ค่าความชันของเส้นกราฟเป็น $-1/r_V$ และมีจุดตัดแกน Y เป็น V_B ซึ่งในส่วนของการทดลองนี้ได้ทำการแปรค่าความต้านทาน R_V ในช่วง $1\text{ M}\Omega$ ถึง $10\text{ M}\Omega$ ด้วยความละเอียด $1\text{ M}\Omega$ โดยกราฟผลการทดลองได้แสดงไว้ในหัวข้อผลการวิจัย

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมดโอห์มมิเตอร์

ภาพที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_x กับค่า V_x/R_x ซึ่งเป็นผลจากการทดลองตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดโอห์มมิเตอร์ โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายใน r_{Ω} ของโอห์มมิเตอร์ได้จากค่าความชันของกราฟ โดยที่ค่าจุดตัดแกน Y แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในโอห์มมิเตอร์ V_B ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2 จากการแปรค่าความต้านทาน R_x ในช่วง $1\text{ m}\Omega$ ถึง $10\text{ m}\Omega$ จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีค่า $R^2=0.9999$ นั่นคือ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นสูงมาก (เข้าใกล้ 1) และมีค่าความชันของเส้นกราฟเท่ากับ $-10^{-4}\text{ }\Omega$ นั่นคือ ค่าความต้านทานภายในของโอห์มมิเตอร์ r_{Ω} มีค่าเท่ากับ $10^{-4}\text{ }\Omega$ หรือเท่ากับ $100\text{ }\mu\Omega$ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ในขณะที่จุดตัดแกน Y ของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ 1 V แสดงว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงภายในโอห์มมิเตอร์มีขนาดเท่ากับ 1.00 V



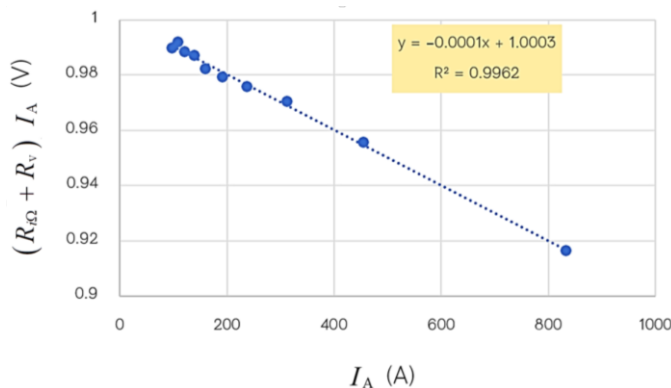
ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_x กับค่า V_x/R_x

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนและเลขนัยสำคัญของผลการทดลองนั้น เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการอาศัยโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของระบบการวัด เมื่อทำการทดลองซ้ำ ผลการทดลองจะได้ตัวเลขเดิม ทำให้ไม่สามารถนำค่าผลต่างของการวัดในแต่ละ

ครั้งมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวัดได้ ดังนั้นภายในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด (มัลติมิเตอร์ในแต่ละโหมด) โดยจะถือว่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทาน R_x มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นค่าอินพุตที่กำหนดได้จากโปรแกรม ซึ่งพบว่าในตอนต้นที่ 1 เลขนัยสำคัญของโวลต์มิเตอร์มีจำนวน 3 ตัว (909 mV ถึง 990 mV) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 0.5 mV (เท่ากับ 0.5 เท่าของค่าความละเอียดสูงสุด) เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณหา $r_{i\Omega}$ และ V_B จะได้ว่า $r_{i\Omega} = 100 \pm 1 \mu\Omega$ และ $V_B = 1.00 \pm 0.01$ V

2. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมดแอมมิเตอร์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า $(r_{i\Omega} + R_v)I_A$ กับค่ากระแสไฟฟ้า I_A ซึ่งได้จากการทดลองตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดแอมมิเตอร์ ดังภาพที่ 8 โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายใน r_{iA} ของแอมมิเตอร์ได้จากการวิเคราะห์ค่าความชันของกราฟ โดยที่ค่าจุดตัดแกน Y แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้า V_B ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4 จากการแปรค่าความต้านทาน R_v ในช่วง 1 m Ω ถึง 10 m Ω จากกราฟผลการทดลองจะได้ค่าความต้านทานภายใน แอมมิเตอร์ r_{iA} เท่ากับ 100 $\mu\Omega$ (เท่ากับค่าลบความชันของเส้นกราฟ) และเส้นกราฟมีค่า $R^2=0.9962$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงมาก นอกจากนี้จุดตัดแกน Y ของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ 1.00 V ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4 และตรงกับผลการทดลองตอนที่ 1



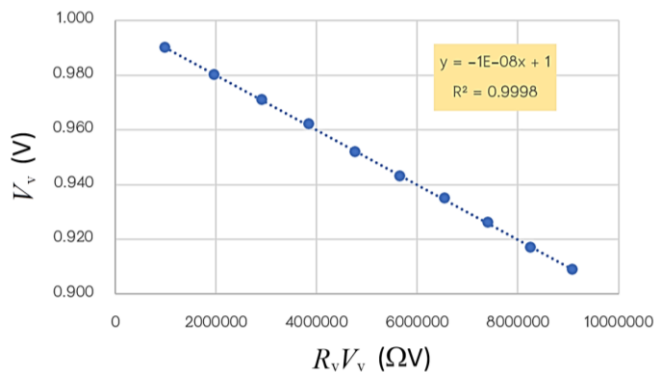
ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า $(r_{i\Omega} + R_v)I_A$ กับค่ากระแสไฟฟ้า I_A

การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนและเลขนัยสำคัญของผลการทดลองในตอนต้นที่ 2 นั้น พิจารณาจากผลการตรวจวัดกระแสในโหมดแอมมิเตอร์ ซึ่งได้เลขนัยสำคัญ จำนวน 3 ตัว (98.0 A ถึง 833 A) ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดและสูงสุด คือ ± 0.05 A และ ± 0.5 A ตามลำดับ และ

อาศัยความคลาดเคลื่อนของความต้านทาน $r_{i\Omega}$ ที่ได้จากตอนที่ 1 มาใช้สำหรับการคำนวณ ($\Delta r_{i\Omega} = \pm 1 \mu\Omega$) ซึ่งจะได้ว่า $r_{iA} = 100 \pm 33 \mu\Omega$ และ $V_B = 1.00 \pm 0.01 \text{ V}$

3. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมดโวลต์มิเตอร์

ผลการศึกษาการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์เมื่อใช้โหมดโวลต์มิเตอร์สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_V กับค่า $R_V V_V$ ได้ดังภาพที่ 9 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความชันของเส้นกราฟเป็น $-1/r_{iV}$ และมีจุดตัดแกน Y เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า V_B ดังสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีค่า $R^2 = 0.9998$ มีค่าจุดตัดแกน Y เท่ากับ 1.00 V (ตรงกับการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2) และมีค่าความชันของเส้นกราฟเท่ากับ $-1/10^{-8} \Omega$ นั่นคือค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ r_{iV} มีค่าเท่ากับ $10^8 \Omega$ หรือเท่ากับ $100 \text{ M}\Omega$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก



ภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_V กับค่า $R_V V_V$

ในการทำงานเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะอาศัยการพิจารณาจากความคลื่อนของโวลต์มิเตอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm 0.5 \text{ mV}$ (ช่วง 909 mV ถึง 990 mV) และทำการตัดผลของค่าความต้านทาน $r_{i\Omega}$ เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าความต้านทาน R_V และ r_{iV} มาก โดยมีผลทำให้ได้ $r_{iV} = 100 \pm 1 \text{ M}\Omega$ และ $V_B = 1.00 \pm 0.01 \text{ V}$

อภิปรายผล

การใช้โหมดมิเตอร์สำหรับการจ่ายกระแสให้กับโหลดที่มีค่าความต้านทานขนาดเล็กระดับ $\mu\Omega$ นั้นจะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลผ่านโหลดที่มีค่าสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามโหมดมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปนั้นไม่สามารถทำได้ และตัวต้านทานระดับ $\mu\Omega$ โดยทั่วไปจะไม่มีให้ใช้

ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งข้อจำกัดทั้งสองข้อนี้จะไม่เกิดขึ้นสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ เนื่องจากโปรแกรม Tinkercad สามารถเลือกใช้ค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำได้ถึงระดับ $p\Omega$ ทำให้การออกแบบหรือการวิเคราะห์วงจรสามารถดำเนินการได้ในช่วงขนาดที่กว้างมาก

ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ทั้งสามโหมดมีค่า R^2 ที่สูงเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟผลการทดลองมีความเป็นเชิงเส้นสอดคล้องกับสมการที่ 2 สมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับที่ได้แสดงไว้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความถูกต้องของโมเดล (หรือวงจรสมมูล) ของมิเตอร์แต่ละรูปแบบที่นำมาใช้ ประกอบกับการทดลองนี้เป็นการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้การทดลองที่ได้มีความแม่นยำ (Precision) สูง นอกจากนี้กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ทั้งสามโหมดยังแสดงให้เห็นว่าได้ค่าจุดตัดแกน Y เป็นค่าเดียวกันเท่ากับ 1.00 V ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะสามารถยืนยันได้ว่า โอห์มมิเตอร์นั้นจะมีการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทาน ดังนั้นในการใช้งานโอห์มมิเตอร์จำเป็นจะต้องตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าอื่นๆ ออกจากตัวต้านทานที่ต้องการตรวจวัดก่อน มิฉะนั้นอาจจะมีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดได้ หรืออาจส่งผลรุนแรงถึงขั้นก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวมิเตอร์ได้ ผลการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของโอห์มมิเตอร์ พบว่า มีค่าต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในตัวโอห์มมิเตอร์มีคุณสมบัติของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ดี ซึ่งสามารถนำหลักการและวิธีการทดลองการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในมิเตอร์ในโหมดของโอห์มมิเตอร์ไปใช้สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ได้ ในส่วนของผลการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ พบว่า มีค่าความต้านทานต่ำมาก โดยผู้ทดลองจะได้ตระหนักว่าการต่อแอมมิเตอร์เพื่อวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์นั้น (การต่อแบบอนุกรม) ตัวแอมมิเตอร์จะเข้าไปรบกวนระบบน้อยมาก (ค่าความต้านทานของแอมมิเตอร์ต่ำกว่าค่าความต้านทานภายในวงจรมาก) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อควรระวังสำหรับการใช้งานแอมมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการในประเด็นที่ว่า จะต้องไม่ต่อแอมมิเตอร์ขนาน (ต่อคร่อม) กับอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด มิฉะนั้นจะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลผ่านแอมมิเตอร์โดยไม่ไหลผ่านอุปกรณ์เดิมของวงจร ซึ่งจะมีผลทำให้แอมมิเตอร์ได้รับความเสียหาย ซึ่งหลักการและวิธีการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดแอมมิเตอร์สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดค่าความต้านทานของลวดตัวนำหรืออุปกรณ์ที่มีความต้านทานขนาดเล็กได้ และในลำดับสุดท้ายการทดลองตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ ผลที่ได้คือ โวลต์มิเตอร์มีค่าความต้านทานภายในสูงมาก ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อสังเกตให้กับผู้ทดลองได้ว่าการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยการต่อโวลต์มิเตอร์ขนานกับอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัดจะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลผ่านโวลต์มิเตอร์ด้วยค่าที่ต่ำมาก นั่นคือ โวลต์มิเตอร์จะไม่เข้าไปรบกวนระบบ

ที่ต้องการตรวจวัด ซึ่งสามารถนำหลักการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดโวลต์มิเตอร์ไปใช้ตรวจวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่มีค่าความต้านทานขนาดใหญ่ได้

แม้ว่ามัลติมิเตอร์ภายในโปรแกรม Tinkercad จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล (Digital Multimeter) ในห้องปฏิบัติการมากกว่าแบบแอนะล็อก (Analog Multimeter) เนื่องจากการแสดงผลในรูปแบบตัวเลขบนหน้าจอแสดงผลเหมือนกัน แต่จากการศึกษาและตรวจสอบคุณสมบัติการทำงานของมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a และมัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF ในห้องปฏิบัติการ พบว่า การทดลองที่ใช้มัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก จะให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับโปรแกรม Tinkercad มากกว่าแบบแบบดิจิตัล โดยผลการทดลองเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 1 สิ่งที่เหมาะสมระหว่างมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล และมัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก คือ มัลติมิเตอร์ทั้งสองแบบจะแบ่งย่านการวัดออกเป็นช่วงๆ ในขณะที่มัลติมิเตอร์ในโปรแกรม Tinkercad นั้นจะสามารถวัดได้ตลอดย่าน แต่ก็จะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำกว่า $1\ \Omega$ ได้ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างมัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อกกับมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ประการแรก ได้แก่ การปรับย่านการวัดของมัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF นั้นผู้ใช้งานจะเป็นผู้กำหนด (จากการหมุนสวิตช์ด้านหน้า) ในขณะที่มัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a จะเป็นแบบอัตโนมัติ (คุณสมบัติของมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัลยุคใหม่) ประการที่สอง คือ มัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF จะอาศัยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมัลติมิเตอร์เพื่อขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่ (Moving-coil) ที่อยู่ภายใน แต่สำหรับมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a จะอาศัยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตัลสำหรับการรับข้อมูลไปแสดงผล ซึ่งในกรณีที่ถูกใช้งานในโหมดโอห์มมิเตอร์ จะอาศัยค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์แบ่งแรงดันไฟฟ้ากับตัวต้านทานที่ต้องการตรวจวัด ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้ความต้านทานภายในที่มีค่าสูงกว่าโอห์มมิเตอร์แบบแอนะล็อก ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านกลับเข้าไปมีค่าสูงเกินกว่าค่าสูงสุดที่ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตัลจะสามารถรับได้ (จากการทดลอง พบว่า มีค่าประมาณเท่ากับ 350 mV)

จากตารางที่ 1 ค่าความต้านทานภายใน $r_{i\Omega}$ ต่ำสุด (Min) ของมัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a มีค่าประมาณเท่ากับ 2 k Ω ทั้งนี้ได้จากการทดลองที่มีการใช้ R_x ที่มีค่าอยู่ในช่วง 10 Ω ถึง 3 k Ω (ซึ่งถ้า R_x มีค่าสูงกว่านี้ มัลติมิเตอร์จะมีการเปลี่ยนย่านการวัดเป็นย่านใหม่ และจะได้ค่าความต้านทาน $r_{i\Omega}$ ที่มีค่าสูงกว่า 2 k Ω) ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวนี้ทำให้ไม่สามารถใช้มัลติมิเตอร์แบบดิจิตัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a สำหรับทำการทดลองตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดแอมมิเตอร์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ในโหมดโอห์มมิเตอร์ $r_{i\Omega}$ มีค่าสูงกว่าค่าความต้านทาน r_{iA} ของมัลติมิเตอร์ในโหมดแอมมิเตอร์มาก (มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่อ่านกลับเข้าไปมีค่าต่ำมาก ตัวแปลงสัญญาณ

แฉะลือกเป็นสัญญาณดิจิทัลจึงมองว่ามีค่าประมาณเท่ากับศูนย์) แต่สำหรับมัลติมิเตอร์แบบแฉะลือก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF นั้นพบว่าสามารถให้ผลการทำงานที่สอดคล้องกับโปรแกรม Tinkercad โดยพบว่า ค่า $r_{i\Omega}$ ของมัลติมิเตอร์ในย่าน Rx1 (ย่านต่ำสุดของความต้านทานที่ต้องการตรวจวัด ซึ่งมัลติมิเตอร์จะต้องจ่ายกระแสสูงสุดเมื่อเทียบกับย่านอื่นๆ) มีค่าประมาณเท่ากับ $20\ \Omega$ โดยค่าความต้านทานดังกล่าวนี้มีผลทำให้สามารถทำการทดลองในโหมดแอมมิเตอร์ได้ ทั้งนี้ค่าความต้านทานขนาดดังกล่าวนี้มีความใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ยี่ห้อไมครอนต้า (Micronta) รุ่น 22-221 ซึ่งมีการทำการทดลองและรายงานไว้ว่ามีค่าประมาณเท่ากับ $24\ \Omega$ ในย่าน Rx1 (King & French, 1995) ผลจากการทดลองประยุกต์ใช้มัลติมิเตอร์ Sanwa รุ่น YX360TRF ในโหมดโอห์มมิเตอร์สำหรับตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์โหมดแอมมิเตอร์ พบว่าค่าความต้านทานโหมดแอมมิเตอร์มีค่าประมาณเท่ากับ $2\ \Omega$ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะสามารถใช้มัลติมิเตอร์แบบแฉะลือก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF ทำการทดลองในโหมดของแอมมิเตอร์ได้ แต่เนื่องจากความต้านทานโหลดในระบบมีค่าต่ำ แบตเตอรี่ภายในมัลติมิเตอร์จึงต้องจ่ายกระแสค่าสูงออกมา ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุทำให้พลังงานของแบตเตอรี่หมดอย่างรวดเร็ว สำหรับการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดโวลต์มิเตอร์นั้น มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ในโหมดโวลต์มิเตอร์ r_{iV} นั้นมีค่าสูงกว่า $r_{i\Omega}$ มาก จึงมีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏที่ตัวแปลงสัญญาณแฉะลือกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีค่าสูงเกินกว่าค่าที่สามารถตรวจวัดได้ จากการศึกษาจากเอกสารข้อมูลของตัวมัลติมิเตอร์รุ่นดังกล่าวนี้ พบว่า ค่าความต้านทานภายในโหมดโวลต์มิเตอร์ จะมีค่าสูงกว่า $10\ M\Omega$ ขึ้นไป และเมื่อทำการศึกษาผลการวิจัยที่มีการรายงานไว้พบว่ามีค่าสอดคล้องกันกับมัลติมิเตอร์ต่างๆ โดยทั่วไป นั่นคือจะมีค่าประมาณเท่ากับ $10\ M\Omega$ (Gingl & Mingesz, 2019; Stojilovic & Isaacs, 2018) แต่สำหรับมัลติมิเตอร์แบบแฉะลือก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF นั้นพบว่า สามารถใช้ทำการทดลองได้ เนื่องจากการแสดงผลอาศัยขนาดของกระแสที่จ่ายออกมาเป็นตัวขับเคลื่อนที่ชัดเจนเคลื่อนที่ ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า r_{iV} ในย่าน $2.5\ V$ นั้นมีค่าประมาณเท่ากับ $50\ k\Omega$ (โดยสาเหตุที่เลือกย่านการวัดนี้มาทำการทดลองเนื่องจากมีความใกล้เคียงกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาในโหมดโอห์มมิเตอร์ ซึ่งจะมีผลทำให้การอ่านค่าผลการทดลองมีความละเอียดสูง)

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้โปรแกรม Tinkercad และมัลติมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	โปรแกรม Tinkercad	Sanwa CD800a	Sanwa YX360TRF	หมายเหตุ
V_B	$1.00 \text{ V} \pm 0.01 \text{ V}$	$0.45 \text{ V} \pm 0.01 \text{ V}$	$3.0 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$	การทดลองใน โหมตโอห์มมิเตอร์
r_{Ω}	$100 \text{ } \mu\Omega \pm 1 \text{ } \mu\Omega$	$2.0 \text{ k}\Omega \pm 0.1 \text{ k}\Omega$ (min)	$20 \text{ } \Omega \pm 5 \text{ } \Omega$ (ย่าน $\times 1$)	
r_{iA}	$100 \text{ } \mu\Omega \pm 33 \text{ } \mu\Omega$	– (ไม่สามารถตรวจวัดได้)	$2 \text{ } \Omega \pm 2 \text{ } \Omega$ (ย่าน 0.25 A)	การทดลองใน โหมต แอมมิเตอร์
r_{iV}	$100 \text{ M}\Omega \pm 1 \text{ M}\Omega$	– (ไม่สามารถตรวจวัดได้)	$50 \text{ k}\Omega \pm 5 \text{ k}\Omega$ (ย่าน 2.5 V)	
				การทดลองใน โหมต โวลต์มิเตอร์

สรุปผลการวิจัย

ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 การทดลองต่อวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม Tinkercad ถือเป็นทางเลือกที่สำคัญอีกทางหนึ่งสำหรับนำมาประยุกต์ใช้จัดการเรียนการสอน แม้ว่าต่อไปในอนาคตสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 จะดีขึ้น แต่โปรแกรมจำลองการทดลองก็ยังถือเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการเตรียมความพร้อมของผู้เรียนก่อนการจับเครื่องมือการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการหรือใช้เป็นเครื่องมือสาธิตการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อแสดงผลการทำงานของวงจรไฟฟ้าก่อนทดลองจริงได้ มัลติมิเตอร์บนโปรแกรม Tinkercad มีโหมดการใช้งานสามโหมด ได้แก่ โหมตโอห์มมิเตอร์ โหมตแอมมิเตอร์ และโหมตโวลต์มิเตอร์ ในการออกแบบปฏิบัติการทดลองเพื่อการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ทั้งสามโหมตนั้นอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของมัลติมิเตอร์ในโหมตโอห์มมิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจร และอาศัยวิธีการจัดรูปของสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์แต่ละโหมต จากการพิจารณาค่าความชันของเส้นกราฟ พบว่า มัลติมิเตอร์ในโหมตโอห์มมิเตอร์และโหมตแอมมิเตอร์มีค่าความต้านทานภายในต่ำมากประมาณเท่ากับ $100 \text{ } \mu\Omega$ โหมตโวลต์มิเตอร์มีค่าความต้านทานภายในสูงมากประมาณเท่ากับ $100 \text{ M}\Omega$ โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในโหมตโอห์มมิเตอร์มีค่าเท่ากับ $1.00 \pm 0.01 \text{ V}$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้มัลติมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการ พบว่า มัลติมิเตอร์แบบแอนะล็อก ยี่ห้อ Sanwa รุ่น YX360TRF นั้นสามารถใช้ทำการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ได้ทั้งสามโหมต แต่ต้องมี

การปรับเปลี่ยนขนาดของตัวต้านทานภายนอก R_v ให้สอดคล้องกับคุณสมบัติแต่ละย่านของมัลติมิเตอร์ ในส่วนของมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD800a นั้นสามารถใช้ทำการทดลองได้เฉพาะปฏิบัติการทดลองการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดโอห์มมิเตอร์ เนื่องจากการออกแบบมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัลจะมีการใส่ตัวต้านทานภายในในโหมดโอห์มมิเตอร์ไว้มีค่าสูงแตกต่างกับค่าความต้านทานภายในในโหมดแอมมิเตอร์เป็นอย่างมาก และค่าความต้านทานภายในในโหมดโวลต์มิเตอร์ก็มีค่าสูงมากจนมีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะสามารถอ่านค่าได้ ซึ่งวิธีการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดของโอห์มมิเตอร์สามารถนำไปใช้สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ได้ หากต้องการตรวจวัดค่าความต้านทานของลวดตัวนำหรืออุปกรณ์ที่มีความต้านทานขนาดเล็กสามารถใช้หลักการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในมิเตอร์ในโหมดของแอมมิเตอร์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำการทดลองวัดค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์ในโหมดของโวลต์มิเตอร์ไปใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่มีค่าความต้านทานขนาดใหญ่ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- CD800a. (n.d.) Retrieved from https://overseas.sanwa-meter.co.jp/pdf/catalog/digital_multimeters/CD800a_EN_catalog.pdf
- Easyeda. (n.d.). Retrieved from www.easyeda.com.
- Eryilmaz, S., & Deniz, G. (2021). Effect of Tinkercad on students' computational thinking skills and perceptions: A case of Ankara province. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 20(1), 25–38.
- Gingl, Z. & Mingesz, R. (2019). Voltmeter in series?. *Phys. Educ.*, 54, 045017, 1–7.
- Jeffrey, R.G. (2019). Estimating RC time constants using sound. *The Physics Teacher*, 57, 393–396.
- King, J.G., & French, A.P. (1995). Using a multimeter to study an RC circuit. *The Physics Teacher*, 33, 188–189.
- Kshirsagar, C., Kulal, V., Kudal, P., Kulkarni, A., & Kuche, K. (2021). IoT based temperature sensing through Tinkercad simulation platform. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 8(6), e719–e724.
- Luchaninov, D., Bazhenov, R., Sabirova, V., Mamyrova, M., & Zholdosheva, A. (2021). Online Training of Students of Applied Physics in the Field of Circuitry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1889, 022030, 1–6.
- OrCAD. (n.d.). Retrieved from www.orcad.com.

- Patel, K., Borole, S., Ramaneti K., Hejib, A., & Singh, R.R. (2020). Design and implementation of Sun Tracking Solar Panel and Smart Wiping Mechanism using Tinkercad. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, **906**, 012030, 1–12.
- Pathare, S.R., Raghavendra, M.K., & Huli, S. (2017). Low-cost alternative for signal generators in the physics laboratory. **The Physics Teacher**, **55**(5), 301–305.
- Pili, U., Violanda, R., & Pili, J. (2019). Using a digital voltmeter and a smartphone camera to investigate the RC circuit. **Phys. Educ.**, **54**, 033004, 1–4.
- Roberto, R., & Christopher, D. (2020). The iPad as a virtual oscilloscope for measuring time constants in RC and LR circuits. **Phys. Educ.**, **55**, 023003, 1–4.
- Silar, R., Glasscock, M., Mitchell, B., & Ekey J.R. (2020). A fan-C exploration of RC circuits. **The Physics Teacher**, **58**, 552–555.
- Stojilovic, N., & Isaacs, D.E. (2018). Resistance of a digital voltmeter: teaching creative thinking through an inquiry-based lab. **Phys. Educ.**, **53**, 053005, 1–3.
- Tennison, J.L., Gorlewicz, J.L., & Condoor, S.S. (2020, June). **Project-based smart systems module for early-stage mechanical engineering students**. Paper presents in 2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access, Virtual On line. 10.18260/1–2—35099.
- Tinkercad. (n.d.). Retrieved from <https://www.tinkercad.com>.
- YX-360TRF. (n.d.). Retrieved from https://www.sanwa-meter.co.jp/japan/pdf/catalog/analog_multitester/YX360TRF_EN_catalog.pdf